考虑热网管道铺设方式影响的电热耦合系统优化调度

张 磊¹, 卢天林², 杨 宸², 叶 靖², 陈 庆¹, 黄悦华², 薛田良¹ (1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:热网热损特性作为热力系统温度动态过程的重要驱动因素,在电热联合调度中受热网管道铺设方式的 影响显著。针对不同的热网管道铺设方式,分析了热网热损特性在电热联合调度中的作用机理,以及在不同 热网管道铺设方式下的特性差异,提出了一种计及热损特性影响的热网管道温度动态过程约束模型。基于 此,计及风电出力与负荷的不确定性,建立了考虑热网管道铺设方式影响的多场景电热耦合系统调度模型及 其信息间隙鲁棒优化求解策略。算例仿真结果表明:相比于传统管道约束模型,所提出的管道约束模型反映 了热网实际结构对于热力系统运行约束的影响,提高了系统运行的经济性。

关键词:电热耦合系统;管道铺设方式;热网热损特性;风电不确定性;调度决策 中图分类号:TM73;TK01 **文献标志码**:A D

DOI:10.16081/j.epae.202210009

0 引言

在我国"三北"地区冬季期间,集中供热需求与 风电消纳需求耦合重叠,严重降低了电网可再生能 源的接纳能力。从物理特性角度,电能相对容易传 输但较难存储,热能相对容易存储但较难传输,电力 系统和热力系统间具有天然的互补性^[1-2]。电力系 统和热力系统联合调度能充分挖掘电力网络和热力 网络以及发电机组、热电联产(combined heat and power,CHP)机组、锅炉等设备之间的协调灵活性空 间,成为目前解决大规模可再生能源消纳的重要途 径之一^[34]。

电热联合调度中CHP机组等设备的灵活性释 放会加大热网温度的非均匀分布,进而增加供水管 道与回水管道的热量损失,这是热力系统支撑电网 灵活性的主要运行成本之一。因此,在电热联合调 度时需计及热网管道的热量迁移动态过程^[5-6]。热 网热损与管道温度动态过程建模密切相关,稳态模 型在建模过程中将管道看作一个温度均匀分布的质 点,该质点的温度代表管道平均温度,将管道内温度 的变化过程线性化,即可获得管道出口平均温度与 入口平均温度的关系,该模型在热力系统中被广泛 运用[7]。在此基础上,把管道内的水流分割成独立 的质量块(water mass, WM),针对每个质量块建立 温度与热量传递模型,得到热网管道建模的准动态 模型[8-9]。基于准动态模型,文献[10]提出了将节点 法模型应用于电热联合调度,该模型相比于稳态模 型,在温度动态过程与热损分布描述方面更为精确,

收稿日期:2022-03-24;修回日期:2022-07-28 在线出版日期:2022-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007103) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52007103) 能较好地计算得到热网管道的出口温度。在上述模型中,热网管道采用的是供水管道与回水管道分开 铺设方式(双管直埋方式),此时管道温度动态过程 主要来自于管道与环境间的热量耗散^[11-12]。但是, 在实际工程应用中除双管直埋这一铺设方式之外, 还有双管共壳直埋方式^[13](供水管道与回水管道置 于同一绝缘套管),这类热网管道铺设方式下的热网 热损特性与双管直埋铺设方式相差很大,其温度动 态过程不仅包含管道与环境之间的热量传递,还包 含供、回水管道之间的热量交换。然而在现阶段电 热联合调度中一直使用双管直埋铺设方式的热网动 态模型^[14],忽略了不同热网管道铺设方式下热损特 性变化对电热联合调度经济性的影响。

本文针对不同热网管道铺设方式,提出了考虑 热损特性影响的热网管道温度动态约束模型,分析 了不同管道铺设方式下热损特性的差异,在此基础 上,将风电出力与负荷的不确定性纳入考虑范畴内, 建立了考虑热网热损特性影响的多场景电热联合调 度模型及其信息间隙鲁棒优化求解策略。本文设置 了4种不同的调度模型来分析热网热损特性对电热 联合调度中电力系统、热力系统以及不确定性调度 策略决策的影响。

1 考虑热网热损特性的热力系统模型

1.1 不同热网管道铺设方式下的热损特性分析

热网管道热量损失主要体现在热网高温热水向 低温环境传热以及不同温度的热水之间的传热过 程。图1(a)为双管直埋铺设方式下的热路模型,在 该铺设方式下,管道热量损失只存在供、回水管道分 别通过管壁绝缘层与外界环境换热造成的对称热损 q^x、q^x。图1(b)为双管共壳直埋铺设方式下的热路 模型,该铺设方式下管道的热量损失主要分为以下 2种:一种是供、回水管道分别通过管壁绝缘层与外 界环境换热造成的对称热损 q_s^{*}、q_s^{*};另一种是高温供 水管道通过管内绝缘层向低温回水管道传热,这一 单向传热行为可视为一种非对称热损 q_s^[15]。上述管 道热损可由傅里叶热传导方程^[11]表示:

$$q_{s}^{v} = \frac{T^{v} - T^{b}}{R_{ths}}$$
(1)

$$q_{s}^{r} = \frac{T^{r} - T^{b}}{R_{ths}}$$
(2)

$$q_{a} = \frac{T^{v} - T^{r}}{R_{\text{tha}}}$$
(3)

式中:T^{*}为供水管道平均温度;T^{*}为回水管道平均温 度;T^b为外界环境温度;R_{ths}和R_{tha}分别为对称热损支 路和非对称热损支路的热阻。





Fig.1 Heating loss dynamic process of heating network pipeline and its quasi-dynamic thermal circuit model

将供水管道平均温度 T^{*}、回水管道平均温度 T^{*} 和外界环境温度 T^b视为热势节点,以此建立对应的 管道准动态热路模型^[8],该模型下的节点间管道热 损满足如图1(b)所示的传热关系。此时,计及对称 热损和非对称热损的管道空间温度变化方程为:

$$m^{\mathrm{v}}c\frac{\mathrm{d}T^{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}x} = -\left(q^{\mathrm{v}}_{\mathrm{s}} + q_{\mathrm{a}}\right) \tag{4}$$

$$-m^{r}c\frac{\mathrm{d}T^{r}}{\mathrm{d}x} = -(q_{s}^{r}-q_{a})$$
(5)

式中:c为管道内热水的比热容;m^x、m^r分别为供、回 水管道的质量流量;x为管道中的空间距离。式(5) 中-m^r的负号表示与回水管道水流流向相反的水流 流向。

将式(1)—(3)所示的支路方程代入式(4)、(5), 整理可得:

$$m^{v} c \frac{\mathrm{d}T^{v}}{\mathrm{d}x} = -\frac{R_{\rm ths} + R_{\rm tha}}{R_{\rm ths} R_{\rm tha}} T^{v} + \frac{1}{R_{\rm tha}} T^{r} + \frac{1}{R_{\rm ths}} T^{b} \qquad (6)$$

$$m^{r} c \frac{\mathrm{d}T^{r}}{\mathrm{d}x} = \frac{R_{\rm ths} + R_{\rm tha}}{R_{\rm ths} R_{\rm tha}} T^{r} - \frac{1}{R_{\rm tha}} T^{v} - \frac{1}{R_{\rm ths}} T^{b}$$
(7)

由式(6)、(7)可知,计及非对称热损后,同一绝 缘套管内的供水管道与回水管道的温度动态过程会 产生耦合关系,这种温度变化互相影响的耦合特性 主要有如下2个特点。

1)与传统热网管道双管直埋铺设方式相比,双 管共壳直埋铺设方式能降低管道的整体热损。

对某一供、回水管道而言,调度时段内管道热量 迁移过程中耗散到环境中的对称热损之和即为该管 道的整体热损。不同铺设方式下的管道整体热损比 值如下:

$$\frac{Q_{s}}{Q_{s}'} = \frac{\int (q_{s}' + q_{s}') dt}{\int (q_{s}'' + q_{s}'') dt} = \frac{R_{s}'}{R_{s}}$$
(8)

式中:Q_s为双管共壳直埋方式下的管道整体热损;Q'_s 为双管直埋方式下的管道整体热损;R'_s为双管直埋 方式下的管道对称热阻;R_s为双管共壳直埋方式下 的管道对称热阻。

由式(8)可知,管道在不同铺设方式下的整体热 损比值反比于管道的对称热阻。由工程实测易知 *R*_s>*R*^{*[16]},可得*Q*_s<*Q*'_s。从整个热网的角度,双管共 壳直埋方式下的供、回水管道相比于双管直埋方式, 更能降低整个热网的热量损失。

2)与传统热网管道双管直埋铺设方式相比,双 管共壳直埋铺设方式更能降低热源出力。

在热力系统中,热源与热负荷节点热量平衡主 要由节点温度差决定,其约束如下:

$$Q_{g,t} = cm_n \left(T_{n,t}^{\text{out}} - T_{n,t}^{\text{in}} \right) \quad n \in \psi_{\text{HS}} \tag{9}$$

$$cm_n(T_{n,t}^{\rm in} - T_{n,t}^{\rm out}) = Q_d , \quad n \in \psi_{\rm HL}$$
(10)

$$T_{\min}^{\text{out}} \leq T_{n,t}^{\text{out}} \leq T_{\max}^{\text{out}}, \quad T_{\min}^{\text{in}} \leq T_{n,t}^{\text{in}} \leq T_{\max}^{\text{in}}$$
(11)

式中: $Q_{g,t}$ 和 $Q_{d,t}$ 分别为t时段热源节点 CHP 机组g热 出力和热负荷节点热负荷d需求; m_n 为节点n的热 水质量流量; $T_{n,t}^{\text{in}}$ 为t时段节点n的入口温度; $T_{n,t}^{\text{out}}$ 为t时段节点n的出口温度; T_{max}^{out} 入别为出口温度的 上、下限; T_{max}^{in} 分别为入口温度的上、下限; ψ_{HS} 为 热源节点集合; ψ_{HL} 为热负荷节点集合。

假设热源出口温度控制变量*T_{n,t}*为定值,由于 非对称热损的作用,双管共壳直埋铺设方式下供水 管道将一部分热量补偿给回水管道。此时,双管共 壳直埋铺设方式下热源节点回水温度将高于双管直 埋铺设方式。由式(9)可知,将热源节点回水温度加 热到一样的供水控制温度,双管共壳直埋铺设方式。 下的热源热出力要小于热网双管直埋铺设方式。此 外,调度过程中,在满足节点入口和出口温度上下限 约束的情况下,热源和热负荷热量平衡约束由节点的温差决定,并不会影响热负荷节点的供热质量。

综上可知,从能量守恒的角度,在热负荷需求相同的情况下,双管共壳直埋铺设方式下的热网由于 热损特性的影响会减少热网热损,从而减少热源节 点的热量注入。这一特性在电热联合调度中会影响 CHP机组等设备的下探出力空间,进而影响电热耦 合系统灵活性潜力的挖掘。

1.2 热网双管共壳直埋铺设方式下计及非对称热 损的热力系统模型

基于1.1节的分析,本节建立了考虑热网管道双 管共壳直埋铺设时含非对称热损的热力系统模型。 在该模型中,控制系统的运行调节模式为质调节模 式,即不改变热网管道中热水的质量流量,仅对其温 度进行调节。同时,设定系统的网络结构为通用节 点结构^[17],将热力系统分为管道和节点2个部分,分 别采用下标 *e* 和 *n* 对管道和节点进行编号,设*H*^{*}_n和 *H*^{*}_n分别表示与热网节点*n* 相连并以节点*n* 为结束和 起始节点的管道集合。

1) 热力系统节点温度状态约束。

热力系统节点温度状态约束描述了热水在节点 处的流量平衡和热量守恒,主要包括热源与热负荷 节点的热量平衡方程式(9)和式(10)、网络节点温度 上下限约束式(11)以及网络节点的热量平衡方程式 (12)和式(13)。

$$\sum_{e \in H_a^+} m_e^{\mathsf{v}} T_{e,t}^{\mathsf{v}, \, \text{out}} = \left(\sum_{e \in H_a^-} m_e^{\mathsf{v}} \right) T_{n,t}^{\mathsf{v}} \quad n \in \psi_{\text{HES}}$$
(12)

$$\left(\sum_{e \in H_a^r} m_e^r\right) T_{n,t}^r = \sum_{e \in H_a^r} m_e^r T_{e,t}^{r,\text{out}} \quad n \in \psi_{\text{HES}}$$
(13)

式中: $T_{e,t}^{v,out}$ 、 $T_{e,t}^{r,out}$ 分别为t时段与节点n相连的供、回水管道e出口温度; $T_{n,t}^{v}$ 、 $T_{n,t}^{r}$ 分别为t时段供、回水管道n节点混合温度; m_{e}^{v} 、 m_{e}^{r} 分别为与节点n相连的供、回水管道e的热水质量流量; ψ_{HES} 为热交换站集合。

此外,本文设定在模型中从同一热网节点流出 到各管道的热水温度与该节点温度相同,具体如下:

$$T_{e,t}^{v,in} = T_{n,t}^{v} \quad e \in H_n^+, n \in \psi_{\text{HES}} \cup \psi_{\text{HS}}$$
(14)

 $T_{e,t}^{r,in} = T_{n,t}^{r} e \in H_{n}^{+}, n \in \psi_{HL} \cup \psi_{HES}$ (15) 式中: $T_{e,t}^{v,in}$ 、 $T_{e,t}^{r,in}$ 分别为t时段与节点n相连的供、回水 管道e入口温度。

2)双管共壳直埋铺设方式下热网热量迁移动态 约束。

由式(6)、(7)可知,双管共壳直埋铺设方式下 供、回水管道的动态约束将会耦合。以供水管道为 例,管道温度不仅由自身的热量迁移过程决定,还会 受到来自外界环境温度和回水管道温度的影响,回 水管道同理。推导可得双管共壳直埋铺设方式下热 网动态约束(具体推导过程见附录A)为:

$$T_{e,t}^{v,out} = E_7 E_9 T_{e,t-\tau_1}^{v,in} + E_7 E_{10} T_{e,t-\tau_1}^{r,in} + E_8 E_{12} T_{e,t-\tau_2}^{v,in} + E_8 E_{13} T_{e,t-\tau_2}^{r,in} + (E_7 E_{11} + E_8 E_{14}) T^b \ e \in H_n^{+}$$
(16)
$$T_{e,t}^{r,out} = E_7 E_{15} T_{e,t-\tau_1}^{r,in} + E_7 E_{16} T_{e,t-\tau_1}^{v,in} + E_8 E_{18} T_{e,t-\tau_2}^{r,in} + E_8 E_{19} T_{e,t-\tau_2}^{v,in} + E_8 E_{18} T_{e,t-\tau_2}^{v,in} + E_8 E_{19} T_{e,t-\tau_2}^{v,in} + E_8 E_{18} T_{e,t-\tau_2}^{v,in} + E_8 E_{19} T_{e,t-\tau_2}^{v,in} + E_8 E_{1$$

$$(E_7 E_{17} + E_8 E_{20}) T^{\rm b} \quad e \in H_n^+ \tag{17}$$

式中: $E_7 - E_{20}$ 为常数项参数,在给定管道流量下均为常数^[12]; τ_1 、 τ_2 为管道传输延时。

综上所述,式(9)—(17)即为计及热量迁移非对称热损过程的热力系统模型,该模型为线性模型,可 在调度过程中反映热网管道铺设结构变化对热网温 度动态过程的影响。

2 电热耦合系统调度模型建模与求解

2.1 系统结构

本文研究的电热耦合系统结构如图2所示,该 系统包含大规模风电机组、火电机组、CHP机组以及 电力网络、热力网络等。图中:*P_{i,i}、P_{k,i}和P_{g,i}分别为 t*时段风电机组*i*、火电机组*k*和CHP机组*g*的电出 力;*Q_{g,i}为t*时段CHP机组*g*的热出力;*P_{j,i}为t*时段系 统电负荷*j*需求。



图2 电热耦合系统结构



2.2 电热耦合系统调度模型

2.2.1 目标函数

本文模型以整个联合调度系统的成本最小为优 化目标,并将弃风电量以惩罚项的形式加入目标函 数中,具体如下:

$$\min F_{al} = F_{chp} + F_{con} + F_{wind} \tag{18}$$

式中: F_{al}为系统总调度成本; F_{chp}和F_{con}分别为抽汽 式CHP机组和燃煤火电机组调度成本; F_{wind}为风电 机组弃风成本。

$$F_{\rm chp} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{g} (f_{g,\,p1} P_{g,\,t} + f_{g,\,p2} P_{g,\,t}^2 + f_{g,\,q1} Q_{g,\,t} + f_{g,\,q2} Q_{g,\,t}^2 + f_{g,\,pq} P_{g,\,t} Q_{g,\,t} + f_{g,\,pq0})$$
(19)

$$F_{\rm con} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k} (f_{k0} + f_{k1} P_{k,t} + f_{k2} P_{k,t}^{2} + F_{\rm ST}) \qquad (20)$$

$$F_{\rm ST} = \sum_{k} u_{k,i} (1 - u_{k,i}) f_{k,\rm ST}$$
(21)

$$F_{\text{wind}} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i} \delta_i (P_{i,t,\max} - P_{i,t})$$
(22)

式中:T为调度时段总数; $f_{g,p1}$ 、 $f_{g,p2}$ 、 $f_{g,q2}$ 、 $h_{g,q2}$ ($h_{g,q2}$), $h_{g,q2}$ (

该模型中决策变量包括 CHP 机组电出力 $P_{g,t}$ 、 热出力 $Q_{g,t}$ 、火电机组出力 $P_{k,t}$ 、风电机组出力 $P_{i,t}$ 、状态变量包括热网供回水管道入口温度 $T_{e,t}^{v,in}$ 、 $T_{e,t}^{r,in}$ 和出口温度 $T_{e,t}^{v,out}$ 、 $T_{e,t}^{r,out}$ 。

2.2.2 约束条件

1)CHP机组运行约束。

抽汽式CHP机组运行约束如下:

$$P_{g,\min} \leqslant P_{g,t} \leqslant P_{g,\max} \tag{23}$$

$$Q_{g,t} = r P_{g,t} \tag{24}$$

$$R_{g, \text{down}} \leqslant P_{g, t} - P_{g, t-1} \leqslant R_{g, \text{up}}$$

$$(25)$$

式中: $P_{g,\max}$ 、 $P_{g,\min}$ 分别为CHP机组g的出力上、下限; r为电热比系数; $R_{g,up}$ 、 $R_{g,down}$ 分别为CHP机组g向上、 向下爬坡功率。

2) 热力系统节点方程约束见式(9)—(15)。

3) 热力系统管道方程约束见式(16)和式(17)。

4)火电机组运行约束如下:

$$P_{k,\min} \leqslant P_{k,t} \leqslant P_{k,\max} \tag{26}$$

$$-R_{k, \text{down}} \leq P_{k, t} - P_{k, t-1} \leq R_{k, \text{up}}$$

$$(27)$$

$$\sum_{t=1}^{t} \left| u_{k,t} - u_{k,t-1} \right| \leq U_k \tag{28}$$

式中: $P_{k,\max}$ 、 $P_{k,\min}$ 分别为火电机组k出力上、下限; $R_{k,\min}$ 、 $R_{k,\dim}$ 、分别为火电机组k向上、向下爬坡功率; U_k 为火电机组k的最大允许启停次数。

5)风电机组运行约束如下:

$$0 \leq P_{i,t} \leq P'_{i,t,\max} \tag{29}$$

式中:*P'_{i,t,max}为t*时段风电机组*i*的预测最大电出力。 6)电力网络约束。

电力系统有功功率平衡约束如下:

$$P_{g,t} + P_{k,t} + P_{i,t} = P_{j,t} \tag{30}$$

电力系统网络线路潮流约束如下:

$$L_{l,\min} \leq L_{l,t} \leq L_{l,\max} \tag{31}$$

$$L_{l,t} = G_{l-g}P_{g,t} + G_{l-i}P_{i,t} + G_{l-k}P_{k,t} + G_{l-j}P_{j,t}$$
(32)

式中: $L_{l,t}$ 为t时段线路l传输功率; G_{lg} 、 G_{li} 、 G_{lk} 、 G_{lj} 为功率分配因子; $L_{l,max}$ 、 $L_{l,min}$ 分别为线路l的传输功率

上、下限。本文计算线路潮流采用的是直流潮流 模型。

2.3 电热联合调度模型求解策略

针对上述电热耦合系统调度模型,本文提出一种基于信息间隙鲁棒优化方法的电热联合调度模型 求解方法,其步骤如附录B图B1所示,本节将详细 阐述其求解过程。

2.3.1 负荷随机性与风电不确定性建模

考虑到日前负荷与风电出力的随机性和不确定 性,本文采用场景分析法和基于信息间隙的不确定 性建模方法分别对电-热负荷场景和风电出力不确 定性进行建模。

针对电-热负荷场景选择,本文利用拉丁超立方 抽样技术生成1000个随机场景,由于场景数量较 大,为降低运算量,提高计算效率,采用基于概率距 离的快速前代消除技术进行场景削减^[18],得到负荷 典型场景(电负荷、热负荷各5个场景)及其出现概 率,最终电-热负荷典型场景数为25个。采用该方 法后,目标函数转换为:

min
$$F_{al} = \sum_{s=1}^{N_{u}} p_{\omega,s} \sum_{s=1}^{N_{u}} (F_{chp,s} + F_{con,s}) + F_{wind}$$
 (33)

式中: N_{ω} 为削减后的场景数; $F_{chp,s}$ 、 $F_{con,s}$ 分别为场景s下抽汽式 CHP 机组和燃煤火电机组调度成本; $p_{\omega,s}$ 为场景s出现的概率。

针对风电出力的不确定性,本文采用基于信息 间隙的不确定性建模方案来建立其包络约束模型 如下:

$$U(\alpha, \chi') = \left\{ \left| \chi(t) - \chi'(t) \right| \le \alpha \phi(t) \right\}$$
(34)

式中: $\chi'(t)$ 为t时段不确定量的预测值; $\chi(t)$ 为t时段 不确定量的实际值; $\phi(t)$ 为t时段确定函数; $U(\alpha, \chi')$ 为不确定量 $\chi(t)$ 的波动范围; α 表征不确定量 $\chi(t)$ 的波动幅度,即不确定性半径。

本文设定 $\phi(t) = |\chi'(t)|$,故而风电机组最大电出 力的不确定性模型如下:

$$U(\alpha, P'_{i,t,\max}) = \left\{ \left| P'_{i,t,\max} - P_{i,t,\max} \right| \leq \alpha \left| P'_{i,t,\max} \right| \right\}$$
(35)

基于上述分析,本文还需要对原调度模型进行 修正,用实际最大出力*P_{i,t,max}*代替其预测值,可将式 (29)改写为:

$$0 \leq P_{i,t} \leq P_{i,t,\max} \tag{36}$$

并有:

$$(1-\alpha)P_{i,t,\max} \leqslant P_{i,t,\max} \leqslant (1+\alpha)P_{i,t,\max}$$
(37)

2.3.2 调度模型转换

当不考虑不确定性,即α=0时,所构建的电热 耦合系统调度模型即为确定性调度模型,可计算得 到此时的调度成本,称为确定性成本,记为F₀。然而 当考虑风电随机性时,为了保证模型优化效果,调度 决策者可由调度场景对风险规避的需求^[19]设定一个预期目标成本 *F*₁₀,具体如下:

$$F_{\rm r0} = (1 + \beta) F_0 \tag{38}$$

式中:β为成本偏差系数,即预期目标和确定性成本 间的偏差程度。

此时,原调度模型的目标函数式(33)将转变为 在总调度成本不高于预期目标成本时,寻求对应的 最大不确定性半径。本文所构建的基于信息间隙鲁 棒优化方法的随机电热耦合系统调度模型如下:

$$\begin{array}{l}
\max \ \alpha \\
\text{s.t.} \quad \vec{\mathbf{x}} \ (9) - (17) (23) - (32) (36) \\
\max \ F_{al} \leq F_{r0} = (1 + \beta) F_{0} \\
\text{s.t.} \quad \vec{\mathbf{x}} \ (38)
\end{array} \tag{39}$$

2.3.3 调度模型松弛

鉴于所构建的基于信息间隙鲁棒优化方法的随 机电热耦合系统调度模型具有双层规划的特点,因 此在模型求解之前还需对原规划问题进行合理松 弛。本文将调度模型式(39)中的下层规划等效替换 为其 KKT 条件^[19],具体步骤见附录 C,并采用 big-M 法对其中非线性的互补松弛条件进行描述^[20]。基于 上述松弛策略,原模型被转换为混合整数线性规划 模型,可采用商业求解器对其直接进行求解。

3 算例分析

本文基于IEEE 39节点电力系统和23节点一级 热力网络,建立了电热耦合系统模型,如附录D图 D1所示,各单元典型场景如附录D图D2所示,系统 运行参数如附录D表D1—D4所示。为分析热网热 损特性对电热联合调度的影响,算例设置如下3种 调度模型。

调度模型1:热网采用双管直埋铺设方式,热网 管道运行约束为传统运行约束如式(40)所示,调度 模型如式(39)所示。

 $T_{e,t}^{v,out} = F_1 T_{e,t-\tau_1}^{v,in} + F_2 T_{e,t-\tau_2}^{v,in} + F_3 T^b \quad e \in H_n^+$ (40) 式中: $F_1 - F_2$ 为常系数。

调度模型2:热网采用双管共壳直埋铺设方式, 热网管道运行约束为传统运行约束如式(40)所示, 调度模型如式(39)所示。

调度模型3:热网采用双管共壳直埋铺设方式, 热网管道约束为本文所提约束如式(16)、(17)所示, 调度模型如式(39)所示。

3.1 热网热损特性对调度结果的影响分析

各类调度模型下系统调度成本如表1所示。模型3与模型1针对不同热网铺设方式,采用不同热网特性的运行约束。模型3的总调度成本相比于模型1减少了14964.79元,风电弃风成本降低了14.69%。模型3与模型2是采用相同热网铺设方式,但是采用

不同热网特性约束,相比之下,模型3调度成本减少 了10180.54元,风电弃风成本降低了10.54%。从调 度成本角度考虑,热网热损作为热网支撑电力系统 灵活性的主要代价,针对不同的热网管道铺设方式, 调度模型采用不同的热力系统运行约束,其运行成 本有较明显的差别。因此在电热联合调度中应该针 对不同热网管道铺设方式的热损特性,建立相适应 的热力系统运行约束。

表1 系统调度成本

Table 1 Dispatching cost of system

			里位:元
调度成本	模型1	模型2	模型3
总成本	172538.66	167754.41	157 573.87
CHP机组成本	85787.26	82775.33	76634.13
火电机组成本	33852.20	34534.57	35810.30
风电弃风成本	52899.20	50444.51	45 1 29.44

模型2和模型3在热网铺设结构和相关参数方 面完全相同,唯一的差别在于模型2采用传统热网 运行约束来描述共壳直埋结构的热网动态过程,模 型3采用本文所提约束来描述共壳直埋结构的热网 动态过程。不同模型的机组电出力如图3所示。由 图可知,模型2和模型3的常规机组出力基本相同, CHP机组出力和风电出力调度结果在数值上存在差



异,模型3的CHP机组出力小于模型1,风电机组出 力大于模型1。存在上述差异的主要原因在于模型3 采用的热网运行约束考虑了铺设结构下供、回水温 度的耦合动态过程,这一过程计及了非对称热损的 热量传导,从而引导了调度过程中的CHP机组和风 电的调度出力。可见,只有采用适合热网结构特征 的热网运行约束,调度结果才能更加准确地挖掘热 网中的灵活性潜力。

另外由图3可知,模型3的CHP机组电出力最 小,模型1的CHP机组电出力最大,在风电高峰时 段,模型3风电出力相比于模型1多77.70 MW。可 见,2种调度模型计及不同热网铺设方式的差异会 显著影响电热耦合系统中CHP机组的调峰灵活性, 采用双管共壳直埋铺设方式的模型3相比于采用传 统双管直埋铺设方式的模型1能给电热联合调度带 来更大的风电消纳空间。

由上述调度结果可知:①电热联合调度需要针 对不同热网铺设结构建立与其热损特性相一致的热 网运行约束,只有采用准确的运行约束建模才能准 确地挖掘电热耦合系统的灵活性潜力;②计及热网 管道铺设方式所带来的热损差异会显著影响电热耦 合系统的调度结果。与采用双管直埋管道铺设方式 的热网相比,采用双管共壳直埋管道铺设方式的热 网,能增加电热耦合系统中CHP机组的调峰灵活性 深度,提高风电消纳能力,减少电热耦合系统整体运 行成本。

3.2 热网热损特性对热力系统影响分析

在满足热力系统功率平衡的前提下,CHP机组 调度热出力与热负荷需求之间的功率差额即为热网 的热损。本节为分析电热联合调度中热网热损特性 对热力系统的影响,设置调度模型4:热力系统运行 在"以热定电"模式,不参与电力系统协同调度,其热 网为双管共壳直埋结构,运行约束如式(41)、(42) 所示。

$$T_{e,t}^{v,out} = F_4 T_{e,t}^{v,in} + F_5 T_{e,t}^{r,in} + F_6 T^b \quad e \in H_n^+$$
(41)

$$T_{e,t}^{\mathrm{r,out}} = F_7 T_{e,t}^{\mathrm{r,in}} + F_8 T_{e,t}^{\mathrm{v,in}} + F_9 T^{\mathrm{b}} \quad e \in H_n^+ \qquad (42)$$

式中: $F_4 - F_9$ 为常系数。

热网在质调节控制方式下,为保证热网在某 一温度水平下运行,一般把热源出口节点温度作 为控制节点^[20],本文设置各时段热源出口温度为 363.15 K(1 K=1 ℃+273.15)。基于此,模型1、3、4下 CHP机组的热出力如图4所示。

由图4可知,热出力曲线与热负荷曲线之间的 差额即为调度时段内的热损。在热网管道铺设方式 相同的情况下,模型3和模型4在调度时段的总热损 均为85 MW,但是热网管道热损量在各时段的分布 不同,这是由于2类模型下热力系统调度模式存在





差异。模型4中CHP机组工作在"以热定电"模式, 其强制出力无法参与电力系统协同调度,因此在各 调度时段CHP机组热出力跟随热负荷变化,热损分 布均匀。而模型3下热力系统充分协调电力系统优 化调度,热力系统出力计划会随电力系统出力计划 的变动做出调整,在各时段的热损分布因此发生变 化。01:00—08:00和21:00—24:00为风电出力高峰 时段,模型3下该时段CHP机组热出力较少,低于该 时段的热负荷,热损出现负值;在09:00—20:00时段 风电预测出力逐渐降低,为满足热负荷需求,CHP机 组热出力逐渐增加,热损增大,"抵消"了其他时段的 负值热损。因此,电热联合调度与传统"以热定电" 调度方式相比并不会增加热力系统热损耗,仅影响 热网热损的时空分布。这为热力系统参与电力系统

另外,由图4可知,模型1下调度时段的总热损为395.29 MW,模型3下总热损为85.83 MW,模型3 的总热损相比于模型1降低了78.29%,占热负荷的 9.24%。模型1和模型3在热损方面的不同,主要原 因在于模型3在非对称热损特性作用下,供水管道 向其对应的回水管道传递了部分热量,减少了热量 向外界环境的永久耗散。

不同模型下热源节点及热负荷温度差值如图5 所示。由图5(a)可知,相比于模型1,模型3下热损 的减少使得模型3下热源节点的温差更小,模型3下 热源注入热网的热量随之减少,促进了CHP机组出 力空间的进一步下探。与此同时,由图5(b)可知, 在调度过程中模型1和模型3下热负荷节点的温差 始终保持一致,这表明考虑不同热网管道铺设方式 影响的电热耦合系统调度过程中,CHP机组调度热 出力的减少并不会影响热负荷节点的供热质量。

3.3 热网热损特性对不确定性优化调度策略的影响分析

模型1和模型3下风电出力的不确定性半径α 与成本偏差系数β、调度成本间的关系分别如表2 和表3所示,在电热耦合系统调度过程中,调度决策 者在衡量对调度成本及风电出力不确定性的容忍程





Fig.5 Temperature difference values of heating source node and thermal load under different models

度(偏好程度)之后,设置成本偏差系数β,选择出调 度决策者所需的调度方案。

表2 信息间隙鲁棒优化方法结果(模型1)

Table 2 Results of robust optimization method for information gap(Model 1)

β/%	调度成本 / 元	α
0	172538.66	0
1	174264.05	0.0207
2	175989.44	0.0619
3	177714.82	0.1007
4	179440.21	0.1029
5	181 165.59	0.1051
6	182890.98	0.1233
7	184616.37	0.1415
8	186341.75	0.1597
9	188067.14	0.1779
10	189792.53	0.1960

表3 信息间隙鲁棒优化方法结果(模型3)

Table 3	Results	of robust	optimizati	on method
	for info	rmation ga	p(Model 3)

β/%	调度成本 / 元	α
0	157 573.87	0
1	159149.61	0.0190
2	160725.35	0.0380
3	162301.08	0.0569
4	163 876.82	0.0758
5	165 452.56	0.0947
6	167028.30	0.1136
7	168 604.04	0.1325
8	170179.78	0.1513
9	171755.52	0.1701
10	173331.26	0.1889

以模型1为例,若决策者希望的调度策略调度 成本偏差不超过5%,同时调度方案具有抵御风电 波动15%风险的能力。此时,由表2可知,成本偏差 系数 β =5%时,调度方案的不确定半径 α =0.1051, 无法满足调度决策者的需求,此时决策者要么选择 增加 β 至8%,以保证调度方案的抗风险能力(α = 0.1597),要么选择降低对风险的容忍度,接受该 β 参数下的调度方案。

此外,不同管道铺设方式下的热损特性也会对 不确定优化调度方案产生影响。由表2和表3可知: 当模型3与模型1的调度成本相同时,模型3的不确 定性半径α大于模型1,模型3的抗风险能力要优于 模型1;而当2类模型具有相同的抗风险能力时,模 型3的调度成本要小于模型1,模型3的经济性要优 于模型1。因此,不同热损特性会对不确定性优化 调度策略产生影响,双管共壳直埋结构下的热损特 性使得调度系统能够接纳更大的风电出力不确定风 险,提升调度方案的经济性。

4 结论

本文考虑热网铺设方式变化对热网运行约束的 影响,建立了双管共壳直埋热网结构的热网运行约 束,提出了计及热网铺设方式影响的电热耦合系统 调度模型及其不确定性求解方法,通过算例分析得 到结论如下。

1)热网热损是热力系统支撑电热耦合系统灵活 性协调的主要代价。在高比例新能源并网背景下, 相比于"以热定电"运行模式,电热联合调度并不会 使得热力系统热网热损总量增加,但是会显著改变 热网热损的时空分布。

2)热网管道铺设方式对电热耦合系统的调度 结果影响显著,只有针对不同热网结构建立适配 的热网运行约束,才能准确反映热网的运行状态,充 分挖掘电热耦合系统的灵活性潜力。双管共壳直埋 铺设方式下 CHP机组具有更低的出力下探灵活性, 能消纳更多风电,降低了电热联合调度成本。此外, 在不确定性调度决策中,相比于双管直埋铺设方式, 双管共壳直埋铺设方式显著提升了调度方案的经 济性。

本文的下一步工作将重点关注管道热量迁移空 间动态对热损特性及调度系统的影响。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1]刘书彦,廖扬,柴庆宣,等.考虑交换功率费用的多区互联电热 联合系统协调消纳弃风分析[J].电力自动化设备,2022,42 (4):48-54.

LIU Shuyan, LIAO Yang, CHAI Qingxuan, et al. Coordinated abandoned wind accommodation analysis of multi-area interconnected combined heat and power system considering exchanging power cost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(4):48-54.

- [2] ZHANG Menglin, WU Qiuwei, WEN Jinyu, et al. Optimal operation of integrated electricity and heat system: a review of modeling and solution methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 135:110098.
- [3]汤木易,罗毅,胡博,等. 热力实时定价机制下热电联产机组 多能源市场协同决策研究[J]. 电力自动化设备,2021,41(9): 64-73.

TANG Muyi, LUO Yi, HU Bo, et al. Research on multi-energy market joint decision-making of combined heat and power units under real-time heating pricing mechanism [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):64-73.

 [4] 王雅楠,邵成成,冯陈佳,等.多能源系统中长期协调运行模型 与方法[J].电力自动化设备,2020,40(3):55-61.
 WANG Yanan,SHAO Chengcheng,FENG Chenjia, et al. Medium-

and long-term coordinated operation model and method for multi-energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):55-61.

- [5]谢华宝,戴赛,许丹,等. 热网特性对弃风消纳效果的影响研究
 [J]. 电力自动化设备,2020,40(5):24-31.
 XIE Huabao, DAI Sai, XU Dan, et al. Influence of heat network characteristics on abandoned wind absorption effect[J].
 Electric Power Automation Equipment,2020,40(5):24-31.
- [6] FANG Yuchen, ZHAO Shuqiang, WANG Nan, et al. Power system stochastic optimal dispatch considering thermal and electrical coordination [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 110:772-780.
- [7] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316.
 GU Wei,LU Shuai,WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE,2017, 37(5):1305-1316.
- [8] 王明军,穆云飞,孟宪君,等.考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J].电网技术,2020,44(1): 132-142.

WANG Mingjun, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Optimal scheduling method for integrated electro-thermal energy system considering heat transmission dynamic characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 132-142.

- [9] CHEN Yuwei, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. A water mass method and its application to integrated heat and electricity dispatch considering thermal inertias[J]. Energy, 2019,181:840-852.
- [10] BENONYSSON A, BØHM B, RAVN H F. Operational optimization in a district heating system[J]. Energy Conversion & Management, 1995, 36(5):297-314.
- [11] 韩赫,张沛超,杜炜,等.量调节方式下区域热电系统的联合最 优潮流[J].电力系统自动化,2021,45(2):30-36.
 HAN He,ZHANG Peichao,DU Wei, et al. Joint optimal power flow of district heat-electric system in quantity regulation mode[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(2): 30-36.
- [12] 郝俊红,陈群,葛维春,等.热特性对含储热电-热联供系统的综合调度影响[J].中国电机工程学报,2019,39(9):2681-2689.

HAO Junhong, CHEN Qun, GE Weichun, et al. Influence of thermal characteristics on the synthetic scheduling of an integrated heat and power supply system with heat storage[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(9):2681-2689.

[13] 邵珠贯. 双管共壳直埋保温管道构型和布局优化设计[D]. 哈

尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

SHAO Zhuguan. Optimization design of configuration and layout of directly buried co-insulated pipe [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[14] 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.

- [15] VAN DER HEIJDE B, AERTGEERTS A, HELSEN L. Modelling steady-state thermal behaviour of double thermal network pipes[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 117: 316-327.
- BØHM B, KRISTJANSSON H. Single, twin and triple buried heating pipes: on potential savings in heat losses and costs
 I. International Journal of Energy Research, 2005, 29(14): 1301-1312.
- [17] 顾泽鹏,康重庆,陈新宇,等.考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3596-3604.
 GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation

optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3596-3604.

[18] 魏斌,韩肖清,李雯,等.融合多场景分析的交直流混合微电网 多时间尺度随机优化调度策略[J].高电压技术,2020,46(7): 2359-2369.

WEI Bin, HAN Xiaoqing, LI Wen, et al. Multi-time scale stochastic optimal dispatch for AC/DC hybrid microgrid incorporating multi-scenario analysis[J]. High Voltage Engineering, 2020,46(7):2359-2369.

- [19] 王祺,王承民,谢宁,等. 混合 CVaR-IGDT 的区域综合能源系统扩展规划模型[J]. 电网技术,2020,44(2):505-515.
 WANG Qi,WANG Chengmin,XIE Ning, et al. A hybrid CVaR-IGDT expansion planning model for regional integrated energy system[J]. Power System Technology,2020,44(2):505-515.
- [20] MAZIDI M,MONSEF H,SIANO P. Design of a risk-averse decision making tool for smart distribution network operators under severe uncertainties: an IGDT-inspired augment ε-constraint based multi-objective approach [J]. Energy, 2016, 116: 214-235.

作者简介:



张 磊(1986—),男,副教授,博士,主 要从事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 控制中的应用等方面的研究工作(E-mail: leizhang3188@163.com);

卢天林(1998—), 男, 硕士研究生, 主 要从事综合能源系统运行优化调度方面的 研究工作(**E-mail**:1228172636@qq.com);

叶 婧(1986-),女,讲师,博士,通信

作者,主要从事大规模新能源接入后电力系统优化运行与控制方面的研究工作(E-mail:yejing2000310@163.com)。

Optimal dispatching of electric-thermal coupling system considering influence of laying method of heating network pipeline

ZHANG Lei¹, LU Tianlin², YANG Chen², YE Jing², CHEN Qing¹, HUANG Yuehua², XUE Tianliang¹

(1. College of Electrical Engineering & Renewable Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: As an important driving factor of the temperature dynamic process in the heating system, the heating loss characteristics of heating network are significantly affected by the laying method of heating network pipeline in the combined electric-thermal dispatching. Aiming at the different laying methods of heating network pipeline, the mechanism of heating loss characteristics of heating network in the combined electric-thermal dispatching. Aiming at the different laying methods of heating network pipeline, the mechanism of heating loss characteristics of heating network in the combined electric-thermal dispatching and the characteristic differences under different laying methods of heating network pipeline are analyzed. A dynamic process constraint model of heating network pipeline temperature considering the influence of heating loss characteristics is proposed. On this basis, considering the uncertainties of wind power output and load, the dispatching model of multi-scene electric-thermal coupling system considering the influence of laying method of heating network pipeline is established, and the robust optimization solution strategy with information gap is proposed. The simulative results of case study show that compared with the traditional pipeline constraint model, the proposed pipeline constraint model reflects the influence of the actual structure of heating network on the operation constraints of heating system, and improves the operation economy of system.

Key words: electric-thermal coupling system; pipeline laying method; heat loss characteristics of heating network; uncertainty of wind power; dispatching decision

(上接第28页 continued from page 28)

Optimal allocation model of community integrated energy system considering off-design performance of device and flexible supply-demand matching

WANG Qianggang¹, WU Xuehui¹, YANG Longjie¹, ZHOU Niancheng¹, ZHANG Hao², LI Zhe³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design & Consultation Co.,Ltd.,Hangzhou 310014,China;

3. State Grid Chongqing Electric Power Company Research Institute, Chongqing 401120, China)

Abstract: The establishment of reasonable and effective optimal allocation model is important for the economic operation and multi-energy supply-demand balance in the integrated energy system. Thereby, an optimal allocation model is proposed considering the off-design performance and the flexible supply-demand matching for the community integrated energy system. The off-design performance model of equipment affected by multiple factors is proposed, in which the uncertainty of equipment energy efficiency in the system is considered. Then, the flexible supply-demand matching index is developed to improve the system's ability for coping with the uncertainty of renewable energy generally and power demand. The optimal allocation model of community integrated energy system is developed to minimize the system allocation cost, in which the constraint that corresponds to flexible supply-demand matching index is taken into account. Finally, a community integrated energy system in northern China is taken as an example for simulation analysis. Simulative results show that the system allocation can be scientifically and reasonably optimized considering the off-design performance and the degree of flexible supply-demand matching.

Key words: community integrated energy system; off-design performance; flexible supply-demand matching; optimal allocation

附录 A

附录 A 详细阐述了双管共壳直埋方式下热网管道方程约束(式(16)、(17))的推导过程。为了使得后续的计算结果简洁,对式(6)、(7)中的复杂部分用参数 A、B、C 进行等价表示:

$$A = \frac{\left(R_{\text{tha}} + R_{\text{ths}}\right)}{mcR_{\text{tha}}R_{\text{ths}}} \tag{A1}$$

$$B = -\frac{1}{mcR_{\text{tha}}}$$
(A2)

$$C = \frac{1}{mcR_{\rm ths}} \tag{A3}$$

据上述式(A1)-(A3),可将式(6)、(7)简化为:

$$-mc\frac{\mathrm{d}T^{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}x} = AT^{\mathrm{v}} + BT^{\mathrm{r}} - CT^{\mathrm{b}}$$
(A4)

$$mc\frac{\mathrm{d}T^{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}x} = AT^{\mathrm{r}} + BT^{\mathrm{v}} - CT^{\mathrm{b}}$$
(A5)

式(A4)、(A5)是一个标准的一阶微分方程组,可采用高斯消元法逐次消去一个未知数,使得原式变为一个二阶非齐次 微分方程,再采用解二阶非齐次微分方程的常规方法进行求解,可得:

$$T^{\mathsf{v}}(x) = D_1 \xi(x) + D_2 \xi(-x) + \frac{C}{A+B} T^{\mathsf{b}}$$
(A6)

$$T^{\mathrm{r}}(x) = D_3 \xi(x) + D_4 \xi(-x) + \frac{C}{A+B} T^{\mathrm{b}}$$
(A7)

$$\xi(x) = \exp(ax) = \exp(\sqrt{(A-B)(A+B)}x)$$
(A8)

式中: D₁-D₄均为待定系数。

将式(A6)-(A8)代入式(A4)、(A5),整理可得待定系数关系式如下:

$$D_1 = \frac{a - A}{B} D_3 \tag{A9}$$

$$D_2 = -\frac{A+a}{B}D_4 \tag{A10}$$

同时引入式(A4)、(A5)的初始值,即已知的供水和回水管道的入口温度 $T^{v,in}$ 和 $T^{r,in}$ 。由于在同一绝缘套管内的供/回水管道入口位置不同,本文以供水管道入口为零坐标并沿管道建立坐标轴。可得供水管道的入口温度 $T^{v,in} = T^{v}(0)$,同理可得回水管道的入口温度 $T^{r,in} = T^{r}(0)$ 。并联立式(A4)、(A5)求解可得待定系数的确定值。

$$D_{1} = \frac{(a-A)(A+B)B(T^{v,in}-T^{b})}{B(A+B)[\xi(l)^{2}(A+a)+(a-A)]} + \frac{(a-A)(A+B)(A+a)\xi(l)(T^{r,in}-T^{b})}{B(A+B)[\xi(l)^{2}(A+a)+(a-A)]}$$
(A11)

$$D_{2} = \frac{(A+a)\xi(l)^{2} B(A+B)(T^{\text{v,in}} - T^{\text{b}})}{B(A+B)[\xi(l)^{2}(A+a) + (a-A)]} + \frac{(A+a)(A-a)(A+B)(T^{\text{r,in}} - T^{\text{b}})}{B(A+B)[\xi(l)^{2}(A+a) + (a-A)]}$$
(A12)

$$D_{3} = \frac{(A+B)B(T^{\text{v,in}} - T^{\text{b}})}{(A+B)[\xi(l)^{2}(A+a) + (a-A)]} + \frac{(A+B)(A+a)\xi(l)(T^{\text{r,in}} - T^{\text{b}})}{(A+B)[\xi(l)^{2}(A+a) + (a-A)]}$$
(A13)

$$D_{4} = \frac{-\xi(l)^{2}(A+A)B(T^{\text{v,in}}-T^{\text{b}})}{B(A+B)[\xi(l)^{2}(A+a)+(a-A)]} + \frac{(a-A)(A+B)(T^{\text{r,in}}-T^{\text{b}})}{(A+B)[\xi(l)^{2}(A+a)+(a-A)]}$$
(A14)

再将式(A1)-(A3)、式(A6)-(A8)和式(A11)-(A14)联立整理,可得:

$$\begin{split} T_{e,t}^{v,\text{out}} &= \frac{4\xi\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)(R_s + R) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{\left(\xi^2 - 1\right)(R_s - R)}{\left(\xi^2 - 1\right)(R_s + R) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{r,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R + \left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}\right)}{\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T^b \\ T_{e,t}^{r,\text{out}} &= \frac{4\xi\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)(R_s + R) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{\left(\xi^2 - 1\right)(R_s - R\right)}{\left(\xi^2 - 1\right)(R_s + R) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R + \left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}\right)}{\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R + \left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}\right)}{\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R + \left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}\right)}{\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R + \left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}\right)}{\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R + \left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}\right)}{\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R + \left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}\right)}{\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}}{\left(\xi^2 - 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R\right) + 2\left(\xi^2 + 1\right)\sqrt{R_sR}} T_{e,t}^{v,\text{in}} + \\ &= \frac{2\left(\xi^2 - 1\right)\left(R_s + R$$

$$\xi = \exp\left(\frac{l}{mc\sqrt{R_{\rm s}R}}\right) \tag{A17}$$

$$R = \frac{R_{\rm s}R_{\rm a}}{2R_{\rm s} + R_{\rm a}} \tag{A18}$$

将式(A15)、(A16)中的复杂参数简化表示,可得:

$$T_{e,t}^{v,\text{out}} = E_1 T_{e,t}^{v,\text{in}} + E_2 T_{e,t}^{r,\text{in}} + E_3 T^b$$

$$e \in H_n^+ \qquad e \in H_n^+ \qquad e \in H_n^+$$
(A19)

$$T_{e,t}^{r,out} = E_4 T_{e,t}^{r,in} + E_5 T_{e,t}^{v,in} + E_6 T^b$$
(A20)
$$E_{e,t}^{r,out} = E_{e,t}^{r,out} + E_5 T_{e,t}^{v,in} + E_6 T^b$$

式中: $E_1 - E_6$ 为替代式(A15)-(A16)中复杂参数的常数项参数。

双管共壳直埋结构下供热管道截面如图 A1 所示,本文采用改进节点法描述管道热能动态过程,针对单根管道,将进入管道的水流按照等时长 Δt 分为 K 个质量块,管道出口的温度通过传输延时 τ_i 和管道入口水温的历史数据及传输热损耗 求得。考虑到管道的 τ_i 不是 Δt 的整数倍,假设该时段介于 $\tau_1 与 \tau_2$ 之间,则本时段流出管道的部分如图 A1 中阴影部分所 示,由 WM_K和 WM_{K+1}各一部分组成,根据两质量块的加权平均可求得管道出口温度如式(A21)所示。

$$T_{e,t}^{\text{out}} = \frac{m(\tau_2 - \tau_j)T_{K,t}^{\text{out}} + m(\tau_j - \tau_1)T_{K+1,t}^{\text{out}}}{m(\tau_2 - \tau_j) + m(\tau_j - \tau_1)} = E_7 T_{K,t}^{\text{out}} + E_8 T_{K+1,t}^{\text{out}}$$
(A21)

式中: E_7 、 E_8 为权重系数。由于 WM_K在管道中传输 K-1 个 Δt 后流出管道,因此 WM_K流出管道时的温度应为 $t - \tau_1$ 时刻 管道人口处温度。同理,对于 WM_{K+1},其流入管道时的温度应是 $t - \tau_2$ 时管道入口处的温度,据此式(A19)-(A21)可改写为:

$$T_{K,t}^{v,out} = E_9 T_{e,t-\tau_1}^{v,in} + E_{10} T_{e,t-\tau_1}^{r,in} + E_{11} T^b$$

$$e \in H_n^+ \qquad e \in H_n^+$$
(A22)

$$T_{K+1,t}^{\text{v,out}} = E_{12} T_{e,t-\tau_2}^{\text{v,in}} + E_{13} T_{e,t-\tau_2}^{\text{r,in}} + E_{14} T^{\text{b}}$$

$$e \in H_n^+ \qquad e \in H_n^+$$
(A23)

$$T_{K,t}^{\mathrm{r,out}} = E_{15} T_{e,t-\tau_{1}}^{\mathrm{r,in}} + E_{16} T_{e,t-\tau_{1}}^{\mathrm{v,in}} + E_{17} T^{\mathrm{b}}$$

$$e \in H_{n}^{+} + E_{17} T^{\mathrm{b}}$$
(A24)

$$T_{K+1,\iota}^{r,\text{out}} = E_{18} \frac{T_{e,\iota-\tau_2}^{r,\text{in}}}{e \in H_n^+} + E_{19} \frac{T_{e,\iota-\tau_2}^{v,\text{in}}}{e \in H_n^+} + E_{20} T^{\text{b}}$$
(A25)

式中: E₉-E₂₀为常数项参数。

将式(A22)-(A25)代入式(A21)整理可得式(16)-(17)。



Fig.A1 Cross profile of heat pipelines

附录 B



图 B1 信息间隙鲁棒优化求解方法框架 Fig.B1 Robust optimization method framework for information gap

附录 C

附录 C 详细阐述了松弛策略中式(39)的下层规划问题到其 KKT 条件的推导过程。KKT 条件的通用推导过程需先设定 如下数学模型为研究对象:

$$\begin{cases} \min f^{\text{lo}}(x^{\text{uo}}, x^{\text{lo}}) \\ \text{s.t.} \quad h^{\text{lo}}(x^{\text{uo}}, x^{\text{lo}}) = 0 \\ g^{\text{lo}}(x^{\text{uo}}, x^{\text{lo}}) \le 0 \end{cases}$$
(C1)

式中: $x^{uo} \pi x^{lo} \beta$ 分别为上层规划和下层规划的决策变量集合; $f^{lo} \wedge h^{lo} \pi g^{lo} \beta$ 别为下层规划的目标函数、等式约束和不等式约束。

通用数学模型的 KKT 条件为:

$$\nabla_{x^{\mathrm{lo}}} f^{\mathrm{lo}}\left(x^{\mathrm{uo}}, x^{\mathrm{lo}}\right) + \lambda^{\mathrm{T}} \nabla_{x^{\mathrm{lo}}} h^{\mathrm{lo}}\left(x^{\mathrm{uo}}, x^{\mathrm{lo}}\right) + \mu^{\mathrm{T}} \nabla_{x^{\mathrm{lo}}} g^{\mathrm{lo}}\left(x^{\mathrm{uo}}, x^{\mathrm{lo}}\right) = 0$$
(C2)

$$\mu^{\mathrm{T}}g^{\mathrm{lo}}\left(x^{\mathrm{uo}},x^{\mathrm{lo}}\right) = 0 \tag{C3}$$

$$\mu \ge 0 \tag{C4}$$

$$\begin{cases} h^{\text{lo}}\left(x^{\text{uo}}, x^{\text{lo}}\right) = 0\\ g^{\text{lo}}\left(x^{\text{uo}}, x^{\text{lo}}\right) \le 0 \end{cases}$$
(C5)

式中: 入和 µ 均为拉格朗日乘子。式(C2)-(C5)分别为 KKT 条件的稳定性判据、互补松弛条件、对偶问题可行性判据和原

问题可行性判据。

本文在
$$x^{uo} = \{P_{g,i}, P_{k,i}, P_{i,i}, Q_{g,i}\}$$
 和 $x^{lo} = \{P_{i,t,max}\}$ 的前提下,式(39)所示调度模型的下层规划原数学模型为:

$$\min \quad F_{chp} + F_{con} + F_{wind}$$
(C6)
(S.t. $(1-\alpha)P'_{i,t,max} \le P_{i,t,max} \le (1+\alpha)P'_{i,t,max}$

其等效 KKT 条件为:

$$-\mu_1 + \mu_2 = \delta_i \tag{C7}$$

$$\mu_1\left(\left(1-\alpha\right)P'_{i,t,\max}-P_{i,t,\max}\right)=0\tag{C8}$$

$$\mu_2 \left((1+\alpha) P'_{i,t,\max} - P_{i,t,\max} \right) = 0$$
(C9)

$$\mu_{\rm l} \ge 0 \tag{C10}$$

$$\mu_2 \ge 0 \tag{C11}$$

$$(1-\alpha)P'_{i,t,\max} \le P_{i,t,\max} \le (1+\alpha)P'_{i,t,\max}$$
(C12)

式中: μ_1 和 μ_2 均为拉格朗日乘子。

附录 D

附录 D 详细说明了本文调度系统的算例设置。其中随机电热耦合系统结构如图 D1 所示,电、热负荷如图 D2 所示,运行参数如表 D1—D4 所示。



Fig.D1 Structure of stochastic electric-thermal coupling system



图 D2 各单元典型场景

Fig.D2 Representative scenarios of units

表 D1 CHP 机组运行参数

Table D1 Operating	parameters of CHP unit	
参数名称	对应符号	数值
最小出力/MW	$P_{g,\min}$	50
最大出力/MW	$P_{g,\max}$	270
电热比系数	r	1.66
每小时爬坡功率/MW	$R_{g,\mathrm{up}}$ $R_{g,\mathrm{down}}$	50

参数类别	参数名称	对应符号	数值
	电出力一次系数	$f_{g,\mathrm{Pl}}$	14.5
	电出力二次系数	f_{g,P^2}	0.0345
	热出力一次系数	$f_{g,{f q}1}$	4.2
CHP 机组出力成本/元	热出力二次系数	$f_{g,\mathbf{q}2}$	0.03
	电热出力耦合系数	$f_{g,\mathrm{pq}}$	0.031
	电热出力常数	$f_{g,\mathrm{pq0}}$	1650
	电出力常数	$f_{ m k0}$	2000
火电机组电出力成本/元	电出力一次系数	f_{k1}	11.339
	电出力二次系数	f_{k2}	0.0533
火电机组最小电出力/MW	火电机组最小电出力	$P_{k,\min}$	50
火电机组最大电出力/MW	火电机组最大电出力	$P_{k,\max}$	210
风电成本惩罚项因子/元	风电成本惩罚项因子	$\delta_{ m i}$	100
	热源供水温度/K	$T_n^{ m out}$	363.15
	热网节点出口温度上限/K	$T_{ m max}^{ m out}$	373.15
****	热网节点出口温度下限/K	$T_{ m min}^{ m out}$	343.15
767万尔范达打参数	热网节点入口温度上限/K	$T_{ m max}^{ m in}$	373.15
	热网节点入口温度下限/K	$T_{ m min}^{ m in}$	343.15
	管道长度/m	L	25000

表 D2 电热耦合系统运行参数

Table D2 Operating parameters of electric-thermal coupling system

表 D3 热网管道运行参数

Table D3 Operating parameters of heating network pipes							
管道编号	管道流量/ (kg h ⁻¹)	管道编号	管道流量/ (kg h ⁻¹)	管道编号	管道流量/ (kg h ⁻¹)	管道编号	管道流量/ (kg h ⁻¹)
1	2200	18	50	35	50	52	50
2	50	19	1600	36	250	53	50
3	50	20	100	37	50	54	50
4	2100	21	50	38	50	55	450
5	50	22	50	39	150	56	50
6	100	23	50	40	50	57	50
7	50	24	1450	41	50	58	350
8	50	25	150	42	50	59	50
9	1950	26	50	43	50	60	50
10	50	27	50	44	50	61	250
11	50	28	50	45	750	62	50
12	1850	29	1300	46	200	63	50
13	50	30	850	47	550	64	150
14	200	31	50	48	50	65	50
15	50	32	50	49	50	66	50
16	50	33	350	50	100	67	50
17	50	34	50	51	50		

表 D4 热损过程热阻

Table D4 Thermal resistance of heat loss

Table D4 Thermal resistance of heat loss				
			单位: mK/W	
·며 나는 4件 파네	对称热损	过程热阻		
调度模型	供水	回水	非对称热烦过程热阻	
2	3.448	3.448	0	
3	3.992	3.992	12.605	