



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110163767 A

(43)申请公布日 2019.08.23

(21)申请号 201910353945.4

(22)申请日 2019.04.29

(71)申请人 东南大学

地址 211102 江苏省南京市江宁区东南大学路2号

(72)发明人 顾伟 潘光胜 周苏洋 吴志
陆帅 姚帅

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) 32204

代理人 徐红梅

(51)Int.Cl.

G06Q 50/06(2012.01)

G06F 17/50(2006.01)

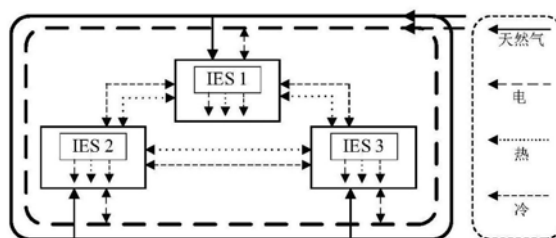
权利要求书6页 说明书14页 附图2页

(54)发明名称

一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法

(57)摘要

本发明公开了一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法,包括对于每个利益主体,建立含惩罚函数的考虑源荷不确定性的三层min-max-min鲁棒规划模型,其中将交互功率项放在三层鲁棒规划模型的最外层;采用C&CG算法进行求解,获取每个利益主体的容量配置结果与各主体间的交互热冷功率;判定各利益主体交互热冷功率是否达成一致,如果不一致,采用取平均值的方法更新交互热冷功率,并更新拉格朗日一次与二次惩罚系数,将更新结果返回到各利益主体目标函数进行下次迭代优化;如果一致,满足收敛条件,跳出循环并结束。本发明方法能有效避免各主体单独规划造成的设备轻载甚至闲置问题,提升系统整体经济性。



1. 一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法, 其特征在于, 该方法包括以下步骤:

(1) 对于每个利益主体, 建立含惩罚函数的考虑源荷不确定性的三层min-max-min鲁棒规划模型, 其中将交互功率项放在三层鲁棒规划模型的最外层;

(2) 采用C&CG算法进行求解, 获取每个利益主体的容量配置结果与各主体间的交互热冷功率;

(3) 判定各利益主体交互热冷功率是否达成一致, 如果不一致, 采用取平均值的方法更新交互热冷功率, 并更新拉格朗日一次与二次惩罚系数, 将更新结果返回到各利益主体目标函数进行下次迭代优化; 如果一致, 满足收敛条件, 跳出循环并结束。

2. 根据权利要求1所述的含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法, 其特征在于, 步骤(1)包括:

(11) 基于能源路由器模型, 建立第*i*个典型区域综合能源系统的多能耦合关系;

(12) 建立第*i*个利益主体的三层鲁棒规划模型的目标函数;

(13) 建立第*i*个利益主体的三层鲁棒规划模型的约束条件。

3. 根据权利要求2所述的含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法, 其特征在于, 步骤(11)中第*i*个典型区域综合能源系统的多能耦合关系具体为:

第*i*个利益主体在*t*时段输出电功率 P_{it}^e 为:

$$P_{it}^{grid} + P_{it}^{gt} + P_{it}^{res} + P_{it}^{bt+} - P_{it}^{bt-} - P_{it}^{hp} = P_{it}^e \quad ;$$

其中, P_{it}^{grid} 表示第*i*个利益主体在*t*时段与电网交互的电功率, P_{it}^{gt} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气轮机输出电功率, P_{it}^{res} 表示第*i*个利益主体在*t*时段可再生能源输出电功率, $P_{it}^{bt+/-}$ 表示第*i*个利益主体在*t*时段蓄电池充/放电功率, P_{it}^{hp} 表示第*i*个利益主体在*t*时段热泵消耗电功率;

第*i*个利益主体在*t*时段输出热功率 Q_{it}^h 为:

$$Q_{it}^{gt} + Q_{it}^{gb} + Q_{it}^{tt+} + \alpha_{it}\eta^{hp,h}P_{it}^{hp} - Q_{it}^{tt-} - Q_{it}^{ac} = Q_{it}^h \quad ;$$

其中, Q_{it}^{gt} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气轮机输出热功率, Q_{it}^{gb} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气锅炉输出热功率, $Q_{it}^{tt+/-}$ 表示第*i*个利益主体在*t*时段蓄热槽充/放热功率, Q_{it}^{ac} 表示第*i*个利益主体在*t*时段吸收式制冷机消耗热功率, $\eta^{hp,h}$ 表示第*i*个利益主体在*t*时段热泵制热效率, α_{it} 表示第*i*个利益主体在*t*时段热泵热泵生成热能用于供应热负荷和冷负荷的调度因子;

第*i*个利益主体在*t*时段输出冷功率 Q_{it}^c 为:

$$COP^{ac}Q_{it}^{ac} + (1 - \alpha_{it})\eta^{hp,c}P_{it}^{hp} = Q_{it}^c \quad ;$$

其中, COP^{ac} 表示第*i*个利益主体在*t*时段吸收式制冷机制冷效率, $\eta^{hp,c}$ 表示第*i*个利益主体在*t*时段热泵制冷效率;

第*i*个利益主体在*t*时段燃气轮机输出电功率 P_{it}^{gt} 为:

$$P_{it}^{gt} = \eta^{gt}P_{it}^{gas}, Q_{it}^{gt} = \lambda^{gt}P_{it}^{gt} \quad ;$$

其中, η^{gt} 表示第 i 个利益主体在 t 时段燃气轮机发电效率, P_{it}^{gas} 表示第 i 个利益主体在 t 时段消耗燃气功率, λ^{gt} 表示第 i 个利益主体在 t 时段燃气轮机热电比。

4. 根据权利要求2所述的含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法, 其特征在于, 步骤(12)中第 i 个利益主体的三层鲁棒规划模型的目标函数为:

$$COST_i = \min (COST_i^I + COST_i^{II} + \max \min COST_i^{III});$$

年投资费用计算公式为:

$$\min COST_i^I = \min_{\substack{x_i^{gt}, x_i^{gb}, x_i^{bt}, x_i^{tt}, \\ x_i^{hp}, x_i^{ac}, x_i^{res}, x_{ij}}} (C_i^{gt} + C_i^{gb} + C_i^{bt} + C_i^{tt} + C_i^{hp} + C_i^{ac} + C_i^{res} + \sum_{j=1}^{N_j} C_{ij}) ;$$

其中, x_i^{gt} , x_i^{gb} , x_i^{bt} , x_i^{tt} , x_i^{hp} , x_i^{ac} , x_i^{res} , x_{ij} 为0-1变量, 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备以及第 i 个利益主体与第 j 个利益主体之间的热网管段 ij 是否安装, C_i^{gt} , C_i^{gb} , C_i^{bt} , C_i^{tt} , C_i^{hp} , C_i^{ac} , C_i^{res} , C_{ij} 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、电储能、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备与热网管段 ij 的投资费用;

年交互费用计算公式为:

$$\min COST_i^{II} = \min_{P_i^{grid+/-}, P_i^{grid-}, Q_{ij}^{MM}} (C_i^{grid} + C_i^{ex} + C_i^{pe}) ;$$

其中, C_i^{grid} 、 C_i^{ex} 与 C_i^{pe} 分别表示与电网年交互费用、与其他利益主体年交互费用和惩罚费用, $P_i^{grid+/-}$ 与 Q_{ij}^{MM} 分别表示与电网买卖电功率和与其他利益主体买卖热冷功率;

年运行费用计算公式为:

$$\min \max \min COST_i^{III} = \min_{\substack{P_i \in P_i^e, L_i^e \in L_i^e \\ L_i^h \in L_i^h, L_i^c \in L_i^c}} \max_{\substack{P_i^{res}, P_i^{gt}, P_i^{bt+/-}, P_i^{hp} \\ Q_i^{gb}, Q_i^{ac}, Q_i^{bt+/-}}} \min_{\substack{P_i^{res}, P_i^{gt}, P_i^{bt+/-}, P_i^{hp} \\ Q_i^{gb}, Q_i^{ac}, Q_i^{bt+/-}}} \left(C_i^{gt,m} + C_i^{gb,m} + C_i^{bt,m} + C_i^{tt,m} + C_i^{res,m} + C_i^{ac,m} + C_i^{hp,m} + C_i^{fuel} \right) ;$$

其中, $C_i^{gt,m}$, $C_i^{gb,m}$, $C_i^{bt,m}$, $C_i^{tt,m}$, $C_i^{res,m}$, $C_i^{ac,m}$, $C_i^{hp,m}$, C_i^{fuel} 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、蓄热槽、可再生能源、吸收式制冷机、热泵的年设备运行维护费用, C_i^{fuel} 为年购燃气费用, P_i^{res} , P_i^{gt} , $P_i^{bt+/-}$, P_i^{hp} 分别表示可再生能源、燃气轮机、蓄电池充/放电功率与热泵消耗电功率, Q_i^{gb} , Q_i^{ac} , $Q_i^{bt+/-}$ 分别表示燃气锅炉、吸收式制冷机和蓄热槽充/放热功率, P_i , L_i^e , L_i^h , L_i^c 分别表示可再生能源出力与电、热、冷负荷的不确定集, 而 p_i , l_i^e , l_i^h , l_i^c 为对应不确定集中的具体元素;

第 x 种设备的年投资费用为:

$$C_i^x = \kappa c^x x_i^x Cap_i^x ;$$

其中, x 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、电储能、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备, κ 为设备资本回收系数, c^x 为设备的单位投资费用, x_i^x 表示第 i 个利益主体中是否安装 x 设备, Cap_i^x 表示第 i 个利益主体中 x 设备的安装容量;

第 i 个利益主体与相邻 j 个利益主体联接的热网管段投资费用为:

$$C_{ij} = \kappa c_{pipe} x_{ij} l_{ij} q_{ij}^{max} / 2 ;$$

其中, c_{pipe} 表示管段的单位投资费用, l_{ij} 表示第 i 个利益主体与相邻 j 个利益主体的管

段长度, q_{ij}^{max} 表示管段ij的最大流量;

设备资本回收系数为:

$$\kappa = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} ;$$

其中, r 是贴现率, y 是投资年限;

第 i 个利益主体与电网的年电功率交互费用为:

$$C_i^{grid} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s (c_{it}^{grid+} P_{it}^{grid+} - c_{it}^{grid-} P_{it}^{grid-}) \Delta t ;$$

其中, s 表示典型日运行场景, t 表示时间段, N_s 表示典型日运行场景总数目, N_t 表示典型日调度周期的时间段总数目, D_s 表示第 s 个典型场景的天数, $c_{it}^{grid+/-}$ 表示第 i 个利益主体在 t 时段与电网的单位买/卖成本, $P_{it}^{grid+/-}$ 表示第 i 个利益主体在 t 时段与电网的买/卖功率;

第 i 个利益主体与其他利益主体的年热冷功率交互费用为:

$$C_i^{ex} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} D_s c_{ij}^{MM} Q_{ijt}^{MM} \Delta t ;$$

其中, c_{ij}^{MM} 表示第 i 个利益主体与第 j 个利益主体之间的单位热/冷功率成本, Q_{ijt}^{MM} 表示第 i 个利益主体与第 j 个利益在在 t 时段的交互功率, N_j 表示利益主体总数目;

第 i 个利益主体中交互功率偏差惩罚项为:

$$C_i^{pe} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} D_s (\rho_{ijt} (Q_{ijt}^{MM} - *Q_{ijt}^{MM}) + \gamma \|Q_{ijt}^{MM} - *Q_{ijt}^{MM}\|_2^2) \Delta t ;$$

其中, ρ_{ijt} / γ 分别是拉格朗日一二次项惩罚因子, $*Q_{ijt}^{MM}$ 是上一次迭代优化出的第 i 个利益主体与第 j 个利益在 t 时段的交互功率;

年设备运行费用为:

$$C_i^{\varphi, m} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c_{it}^{\varphi, m} P_{it}^{\varphi} \Delta t, C_i^{\theta, m} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c_{it}^{\theta, m} Q_{it}^{\theta} \Delta t ;$$

其中, φ 表示燃气轮机、热泵、可再生能源设备、蓄电池, θ 表示燃气锅炉、吸收式制冷机、蓄热槽, $c_{it}^{\varphi, m}$ 表示第 φ 个设备的单位运行费用, $c_{it}^{\theta, m}$ 表示第 θ 个设备的单位运行费用, P_{it}^{φ} 表示第 φ 个设备在 t 时段的电功率, Q_{it}^{θ} 表示第 θ 个设备在 t 时段的热功率;

年购天然气费用为:

$$C_i^{fuel} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c_{gas} (P_{it}^{gt} / \eta^{gt} + Q_{it}^{gb} / \eta^{gb}) \Delta t ;$$

其中, c_{gas} 表示天然气的热价, $\eta^{gt/gb}$ 表示燃气轮机/锅炉的效率。

5. 根据权利要求2所述的含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法, 其特征在于, 步骤(13)中第 i 个利益主体的三层鲁棒规划模型的约束条件为:

第 i 个利益主体中各个设备与热网管段的投资容量不得大于该主体所能配置的最大容量的约束为:

$$\begin{aligned} s.t. \quad & 0 \leq x_i^z Cap_i^z \leq Cap_i^{z, max} ; \\ & 0 \leq x_{ij} q_{ij}^{max} \leq Cap_{ij}^{max} ; \end{aligned}$$

其中, $Cap_i^{x,max}$ 表示第i个利益主体中x设备的最大安装容量;

与电网交互电功率约束:

$$0 \leq P_{it}^{grid+} \leq \varepsilon_{it}^{grid+} P_i^{max}, 0 \leq P_{it}^{grid-} \leq \varepsilon_{it}^{grid-} P_i^{max} \quad ;$$

$$\varepsilon_{it}^{grid+} + \varepsilon_{it}^{grid-} \leq 1 \quad ;$$

其中, $\varepsilon_{it}^{grid+/-}$ 表征第i个利益主体在t时段与电网的交互状态, P_i^{max} 表示第i个利益主体与电网的最大交互电功率;

与其他利益主体的交互热冷功率约束:

$$0 \leq Q_{ijt}^{MM} \leq c_{water} x_{ij} q_{ij}^{max} \Delta \tau \quad ;$$

其中, c_{water} 表示水的比热容, $\Delta \tau$ 表示管段的供回水温差;

系统内各设备的运行出力不大于其设备的配置容量约束:

$$0 \leq P_{it}^o \leq x_i^o Cap^o, 0 \leq Q_{it}^o \leq x_i^o Cap^o \quad ;$$

可再生能源出力不大于其所在场景下的最大可输出功率约束:

$$0 \leq P_{it}^{res} \leq P_{it}^{res,max} \quad ;$$

其中, $P_{it}^{res,max}$ 表示可再生能源在第i个利益主体t时段的最大出力, P_{it}^{res} 表示可再生能源在第i个利益主体t时段的实际出力;

电热储能设备的充放电(热)功率和容量约束为:

$$SOC_i^{bt,min} \leq SOC_{it}^{bt} \leq SOC_i^{bt,max} \quad ;$$

$$SOC_{it}^{bt} = SOC_{i(t-1)}^{bt} + (P_{it}^{bt-} \eta_i^{bt-} - P_{it}^{bt+} / \eta_i^{bt+}) \Delta t \quad ;$$

$$SOC_{it}^{tt,min} \leq SOC_{it}^{tt} \leq SOC_{it}^{tt,max} \quad ;$$

$$SOC_{it}^{tt} = SOC_{i(t-1)}^{tt} + (Q_{it}^{tt-} \eta_i^{tt-} - Q_{it}^{tt+} / \eta_i^{tt+}) \Delta t \quad ;$$

其中, $SOC_{it}^{bt/tt}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第i个利益主体t时段的荷电状态, $P_{it}^{bt,+/-}$ 表示蓄电池在第i个利益主体t时段的充/放电功率, $Q_{it}^{tt,+/-}$ 表示蓄热槽在第i个利益主体t时段的充/放热功率, $\eta_i^{bt,+/-}$ 表示蓄电池在第i个利益主体中的充/放电效率, $\eta_i^{tt,+/-}$ 表示蓄热槽在第i个利益主体中的充/放热效率;

电热储能设备的储能状态始末状态保持相等约束:

$$SOC_{i0}^{bt} = SOC_{iN_t}^{bt} \quad ;$$

$$SOC_{i0}^{tt} = SOC_{iN_t}^{tt} \quad ;$$

其中, $SOC_{i0}^{bt/tt}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第i个利益主体0时刻的荷电状态, $SOC_{iN_t}^{bt/tt}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第i个利益主体 N_t 时刻的荷电状态;

该系统的功率平衡约束,需满足系统内的电热冷等用能需求:

$$P_{it}^e = l_{it}^e \quad ;$$

$$Q_{it}^h + Q_{it}^{MM} = l_{it}^h, Q_{it}^c + Q_{it}^{MM} = l_{it}^c \quad ;$$

其中, P_{it}^e 表示第i个利益主体t时段的输出电功率, l_{it}^e 表示第i个利益主体t时段的电负

荷, Q_{it}^h 表示第 i 个利益主体 t 时段的输出热功率, l_{it}^h 表示第 i 个利益主体 t 时段的热负荷, Q_{it}^c 表示第 i 个利益主体 t 时段的输出冷功率, l_{it}^c 表示第 i 个利益主体 t 时段的冷负荷, Q_{it}^{MM} 表示第 i 个利益主体 t 时段与其他利益主体的交互热功率;

可再生能源出力与电热冷负荷的不确定集:

$$P_i = \{p_i : P_{it}^{res, max} = p_{it}^* + \varepsilon_{it}^{p+} p_{it}^+ - \varepsilon_{it}^{p-} p_{it}^-\} \quad ;$$

$$L_i = \begin{cases} l_{it}^e = l_{it}^{e*} + \varepsilon_{it}^{e+} l_{it}^{e+} - \varepsilon_{it}^{e-} l_{it}^{e-} \\ l_{it}^h = l_{it}^{h*} + \varepsilon_{it}^{h+} l_{it}^{h+} - \varepsilon_{it}^{h-} l_{it}^{h-} \\ l_{it}^c = l_{it}^{c*} + \varepsilon_{it}^{c+} l_{it}^{c+} - \varepsilon_{it}^{c-} l_{it}^{c-} \end{cases} \quad ;$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{p+} + \varepsilon_{it}^{p-}) \leq \Gamma_i^p, 0 \leq \varepsilon_{it}^{p+}, \varepsilon_{it}^{p-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{p+}, \varepsilon_{it}^{p-} \in \{0, 1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{e+} + \varepsilon_{it}^{e-}) \leq \Gamma_i^e, 0 \leq \varepsilon_{it}^{e+}, \varepsilon_{it}^{e-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{e+}, \varepsilon_{it}^{e-} \in \{0, 1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{h+} + \varepsilon_{it}^{h-}) \leq \Gamma_i^h, 0 \leq \varepsilon_{it}^{h+}, \varepsilon_{it}^{h-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{h+}, \varepsilon_{it}^{h-} \in \{0, 1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{c+} + \varepsilon_{it}^{c-}) \leq \Gamma_i^c, 0 \leq \varepsilon_{it}^{c+}, \varepsilon_{it}^{c-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{c+}, \varepsilon_{it}^{c-} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad ;$$

其中, p_{it} 、 p_{it}^* 、 p_{it}^+ 、 p_{it}^- 分别为 t 时段第 i 个利益主体中可再生能源机组出力的实际值、预测标称值、预测上偏差值和预测下偏差值, 引入参数 ξ_{it}^+ 和 ξ_{it}^- 使得 p_{it} 在区间 $[p_{it}^* - p_{it}^-, p_{it}^* + p_{it}^+]$ 内; Γ_i^p 为整个调度周期的不确定性预算参数, 取值范围为 $[0, N_t]$, 改变 Γ_i^p 大小可调节鲁棒模型的保守程度; $\Gamma_i^p = 0$ 表示可再生能源机组出力无不确定性, 该鲁棒模型转化为确定模型, 无保守性; $\Gamma_i^p = N_t$ 表示可再生能源机组出力在整个调度期均存在不确定性, 鲁棒模型的保守性最大; L_i 中参数含义与 P_i 类似。

6. 根据权利要求1所述的含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法, 其特征在于, 步骤 (2) 包括:

(21) 首先, 将三层 min-max-min 鲁棒规划模型写成矩阵形式为:

$$COST = \min_{x_i, q_i} \left\{ c^T (x_i + q_i) + \max_{p_i \in P, l_i \in L} \min_{y_i \in \Omega(x_i, q_i, p_i, l_i)} d^T y_i \right\} \quad ;$$

$$s. t. A (x_i + q_i) \leq b;$$

$$\Omega (x_i, q_i, p_i, l_i) = \{y_i | By_i \leq e;$$

$$Dy_i \leq h - K (x_i + q_i);$$

$$Ey_i \leq p_i;$$

$$Fy_i = l_i\} ;$$

其中, 对第 i 个综合能源系统, x_i 为第一层中 0-1 优化变量, q_i 为第一层中交互热功率连续变量, p_i 和 l_i 分别是第二层的不确定性可再生能源和负荷的优化变量, y_i 为第三层的优化变量, $\Omega (x_i, q_i, p_i, l_i)$ 为某一确定 (x_i, q_i, p_i, l_i) 下 y_i 的可行域, 此外, $A, B, D, E, K, b, c, d, e, h$ 均为已知的系数矩阵;

(22) 将以上问题分解为主问题和子问题, 主问题 MP_i 为:

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{x}_i, \mathbf{q}_i, \theta_i} \mathbf{c}^T (\mathbf{x}_i + \mathbf{q}_i) + \theta_i \\
& s.t. \mathbf{A}(\mathbf{x}_i + \mathbf{q}_i) \leq \mathbf{b} \\
& \theta \geq \mathbf{d}^T \mathbf{y}_i^l, \forall l \leq n \\
& \mathbf{B}\mathbf{y}_i^l \leq \mathbf{e}, \mathbf{D}\mathbf{y}_i^l \leq \mathbf{h} - \mathbf{K}\mathbf{x}_i, \forall l \leq n \\
& \mathbf{E}\mathbf{y}_i^l \leq \mathbf{p}_i^l, \mathbf{F}\mathbf{y}_i^l = \mathbf{l}_i^l, \forall l \leq n
\end{aligned}$$

子问题SP_i具体如下：

$$\begin{aligned}
& \max_{\delta_i, \sigma_i, \mathbf{v}_i, \pi_i, \tau_i} -\delta_i^T \mathbf{e} - \sigma_i^T (\mathbf{h} - \mathbf{K}\mathbf{x}_i) - \mathbf{v}_i^T \mathbf{p}_i + \pi_i^T \mathbf{l}_i \\
& s.t. -\delta_i^T \mathbf{B} - \sigma_i^T \mathbf{D} - \mathbf{v}_i^T \mathbf{E} + \pi_i^T \mathbf{F} = \mathbf{d}^T, \\
& \delta_i \geq 0, \sigma_i \geq 0, \mathbf{v}_i \geq 0, \mathbf{p}_i \in \mathbf{P}_i, \mathbf{l}_i \in \mathbf{L}_i
\end{aligned}$$

(23) 采用C&CG方法进行求解,具体迭代过程如下：

对于第i个利益主体,设置下边界LB=-∞,上边界UB=+∞,迭代次数n=1,收敛条件ε_{down}；

- 基于交互热冷功率 $\mathbf{q}_i^*$,求解主问题MP_i；
- 获取 $(\mathbf{x}_i^{*n+1}, \mathbf{q}_i^{*n+1}, \theta_i^{*n+1}, \mathbf{y}_i^{*l}, \dots, \mathbf{y}_i^{*n})$,并更新下边界LB= $\mathbf{c}^T (\mathbf{x}_i^{*n+1} + \mathbf{q}_i^{*n+1}) + \theta_i^{*n+1}$ ；
- 求解子问题SP_i,更新上边界UB=min[UB, $\mathbf{c}^T \mathbf{x}_i^{*n+1} + f(\mathbf{x}_i^{*n+1})$];
- 如果UB-LB≤ε_{down},返回 $\mathbf{x}_i^{*n+1}$ 并停止循环,输出 $\mathbf{q}_i$;否则,添加以下约束：

$$\begin{aligned}
& \theta \geq \mathbf{d}^T \mathbf{y}_i^{*n+1} \\
& \mathbf{B}\mathbf{y}_i^{*n+1} \leq \mathbf{e}, \mathbf{D}\mathbf{y}_i^{*n+1} \leq \mathbf{h} - \mathbf{K}\mathbf{x}_i \\
& \mathbf{E}\mathbf{y}_i^{*n+1} \leq \mathbf{p}_i^{*n+1}, \mathbf{F}\mathbf{y}_i^{*n+1} = \mathbf{l}_i^{*n+1}
\end{aligned}$$

到主问题MP_i,更新n=n+1,返回到步骤(a)。

7. 根据权利要求1所述的含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法,其特征在于,步骤(3)中各利益主体交互热冷功率不一致时,执行以下步骤：

(31) 设置上层收敛条件ε_{up},迭代次数m=1,对于第i个利益主体,采用取平均值的方法更新交互热冷功率；

$$\mathbf{q}_i^m = (\mathbf{q}_i^m + \mathbf{q}_j^m) / 2$$

其中, $\mathbf{q}_i^m$ 为第m次迭代中第i个利益主体与其他利益主体进行交互热功率的矩阵形式, $\mathbf{q}_j^m$ 为第m次迭代中第j个利益主体与其他利益主体进行交互热功率的矩阵形式；

(32) 判定相邻两次的交互热冷功率是否满足收敛条件：

$$\left| \mathbf{q}_i^m - \mathbf{q}_i^{*m} \right| \leq \varepsilon_{up}$$

(33) 若满足收敛条件则停止并给出优化结果,否则更新一二次项惩罚因子：

$$\begin{cases} \rho_{ijt}(m+1) = \rho_{ijt}(m) + 2 \cdot \gamma(m)^2 (Q_{ijt}^{MM}(m) - *Q_{ijt}^{MM}(m)) \\ \gamma(m+1) = \beta \cdot \gamma(m) \end{cases}$$

其中, $\rho_{ijt}(m) / \gamma(m)$ 分别是第m次迭代时的拉格朗日一二次项惩罚因子, $*Q_{ijt}^{MM}$ 是基于第m次迭代时第i个利益主体与第j个利益在t时段的分别求解的互相交互功率的平均值；

并将更新结果返回到各利益主体目标函数进行下次迭代。

一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法

技术领域

[0001] 本发明属于综合能源系统应用领域,具体来说是一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法。

背景技术

[0002] 区域综合能源系统在提升能源利用效率、促进可再生能源开发利用、降低温室气体排放、改善生存环境等方面展现出重要的作用。针对区域综合能源系统的规划研究中,一般为针对单一利益主体的集中式规划。随着能源体制改革的不断深化,未来的综合能源市场必将存在多种利益主体的情况。不同利益主体的用能特性迥异,如果各利益主体仍然独自规划并运行,将无法通过区域网络互连实现多能互补。如何在规划阶段就考虑并协调好不同利益主体的联合运行问题,将有效避免各主体单独规划造成的设备轻载甚至闲置问题。

发明内容

[0003] 发明目的:为解决现有技术的不足,本发明提供一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法;该方法可有效解决基于区域热网互联的多利益主体联合规划问题。

[0004] 技术方案:为实现上述发明目的,本发明采用以下技术方案:

[0005] 一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法,该方法包括以下步骤:

[0006] (1) 对于每个利益主体,建立含惩罚函数的考虑源荷不确定性的三层min-max-min鲁棒规划模型,其中将交互功率项放在三层鲁棒规划模型的最外层;

[0007] (2) 采用C&CG算法进行求解,获取每个利益主体的容量配置结果与各主体间的交互热冷功率;

[0008] (3) 判定各利益主体交互热冷功率是否达成一致,如果不一致,采用取平均值的方法更新交互热冷功率,并更新拉格朗日一次与二次惩罚系数,将更新结果返回到各利益主体目标函数进行下次迭代优化;如果一致,满足收敛条件,跳出循环并结束。

[0009] 进一步的,步骤(1)包括:

[0010] (11) 基于能源路由器模型,建立第*i*个典型区域综合能源系统的多能耦合关系;

[0011] (12) 建立第*i*个利益主体的三层鲁棒规划模型的目标函数;

[0012] (13) 建立第*i*个利益主体的三层鲁棒规划模型的约束条件。

[0013] 更进一步的,步骤(11)中第*i*个典型区域综合能源系统的多能耦合关系具体为:

[0014] 第*i*个利益主体在*t*时段输出电功率 P_{it}^e 为:

$$P_{it}^{grid} + P_{it}^{gt} + P_{it}^{res} + P_{it}^{bt+} - P_{it}^{bt-} - P_{it}^{hp} = P_{it}^e \quad ;$$

[0016] 其中, P_{it}^{grid} 表示第*i*个利益主体在*t*时段与电网交互的电功率, P_{it}^{gt} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气轮机输出电功率, P_{it}^{res} 表示第*i*个利益主体在*t*时段可再生能源输出电功率,

$P_{it}^{bt+/-}$ 表示第i个利益主体在t时段蓄电池充/放电功率, P_{it}^{hp} 表示第i个利益主体在t时段热泵消耗电功率;

[0017] 第i个利益主体在t时段输出热功率 Q_{it}^h 为:

$$[0018] \quad Q_{it}^{gt} + Q_{it}^{gb} + Q_{it}^{tt+} + \alpha_{it} \eta^{hp,h} P_{it}^{hp} - Q_{it}^{tt-} - Q_{it}^{ac} = Q_{it}^h \quad ;$$

[0019] 其中, Q_{it}^{gt} 表示第i个利益主体在t时段燃气轮机输出热功率, Q_{it}^{gb} 表示第i个利益主体在t时段燃气锅炉输出热功率, $Q_{it}^{tt+/-}$ 表示第i个利益主体在t时段蓄热槽充/放热功率, Q_{it}^{ac} 表示第i个利益主体在t时段吸收式制冷机消耗热功率, $\eta^{hp,h}$ 表示第i个利益主体在t时段热泵制热效率, α_{it} 表示第i个利益主体在t时段热泵热泵生成热能用于供应热负荷和冷负荷的调度因子;

[0020] 第i个利益主体在t时段输出冷功率 Q_{it}^c 为:

$$[0021] \quad COP^{ac} Q_{it}^{ac} + (1 - \alpha_{it}) \eta^{hp,c} P_{it}^{hp} = Q_{it}^c \quad ;$$

[0022] 其中, COP^{ac} 表示第i个利益主体在t时段吸收式制冷机制冷效率, $\eta^{hp,c}$ 表示第i个利益主体在t时段热泵制冷效率;

[0023] 第i个利益主体在t时段燃气轮机输出电功率 P_{it}^{gt} 为:

$$[0024] \quad P_{it}^{gt} = \eta^{gt} P_{it}^{gas}, Q_{it}^{gt} = \lambda^{gt} P_{it}^{gt} \quad ;$$

[0025] 其中, η^{gt} 表示第i个利益主体在t时段燃气轮机发电效率, P_{it}^{gas} 表示第i个利益主体在t时段消耗燃气功率, λ^{gt} 表示第i个利益主体在t时段燃气轮机热电比。

[0026] 更进一步的, 步骤(12)中第i个利益主体的三层鲁棒规划模型的目标函数为:

$$[0027] \quad COST_i = \min(COST_i^I + COST_i^{II} + \max \min COST_i^{III}) \quad ;$$

[0028] 年投资费用计算公式为:

$$[0029] \quad \min COST_i^I = \min_{\substack{x_i^{gt}, x_i^{gb}, x_i^{bt}, x_i^{tt}, x_i^{hp}, x_i^{ac}, x_i^{res}, x_{ij}}} (C_i^{gt} + C_i^{gb} + C_i^{bt} + C_i^{tt} + C_i^{hp} + C_i^{ac} + C_i^{res} + \sum_{j=1}^{N_j} C_{ij}) \quad ;$$

[0030] 其中, x_i^{gt} , x_i^{gb} , x_i^{bt} , x_i^{tt} , x_i^{hp} , x_i^{ac} , x_i^{res} , x_{ij} 为0-1变量, 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备以及第i个利益主体与第j个利益主体之间的热网管段ij是否安装, C_i^{gt} , C_i^{gb} , C_i^{bt} , C_i^{tt} , C_i^{hp} , C_i^{ac} , C_i^{res} , C_{ij} 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、电储能、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备与热网管段ij的投资费用;

[0031] 年交互费用计算公式为:

$$[0032] \quad \min COST_i^{II} = \min_{P_i^{grid+}, P_i^{grid-}, Q_{ij}^{MM}} (C_i^{grid} + C_i^{ex} + C_i^{pe}) \quad ;$$

[0033] 其中, C_i^{grid} 、 C_i^{ex} 与 C_i^{pe} 分别表示与电网年交互费用、与其他利益主体年交互费用和惩罚费用, $P_i^{grid+/-}$ 与 Q_{ij}^{MM} 分别表示与电网买卖电功率和与其他利益主体买卖热冷功率;

[0034] 年运行费用计算公式为:

$$[0035] \quad \min \max \min COST_i^{III} = \min_{\substack{p_i \in P_i^I, l_i^e \in I_i^e \\ l_i^h \in I_i^h, l_i^c \in I_i^c}} \max_{\substack{P_i^{res}, P_i^{gt}, P_i^{bt+/-}, P_i^{hp} \\ Q_i^{gb}, Q_i^{ac}, Q_i^{tt+/-}}} \left(C_i^{gt,m} + C_i^{gb,m} + C_i^{bt,m} + C_i^{tt,m} + C_i^{res,m} + C_i^{ac,m} + C_i^{hp,m} + C_i^{fuel} \right) \quad ;$$

[0036] 其中, $C_i^{gt,m}$, $C_i^{gb,m}$, $C_i^{bt,m}$, $C_i^{et,m}$, $C_i^{ves,m}$, $C_i^{ac,m}$, $C_i^{hp,m}$, $C_i^{fuel,m}$ 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、蓄热槽、可再生能源、吸收式制冷机、热泵的年设备运行维护费用, C_i^{fuel} 为年购燃气费用, P_i^{res} , P_i^{gt} , $P_i^{bt+/-}$, P_i^{hp} 分别表示可再生能源、燃气轮机、蓄电池充/放电功率与热泵耗电功率, Q_i^{gb} , Q_i^{ac} , $Q_i^{bt+/-}$ 分别表示燃气锅炉、吸收式制冷机和蓄热槽充/放热功率, P_i , L_i^e , L_i^h , L_i^c 分别表示可再生能源出力与电、热、冷负荷的不确定集, 而 p_i , l_i^e , l_i^h , l_i^c 为对应不确定集中的具体元素;

[0037] 第x种设备的年投资费用为:

$$[0038] \quad C_i^x = \kappa c^x x_i^x Cap_i^x \quad ;$$

[0039] 其中,x分别表示燃气轮机、燃气锅炉、电储能、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备, κ 为设备资本回收系数, c^x 为设备的单位投资费用, x_i^x 表示第i个利益主体中是否安装x设备, Cap_i^x 表示第i个利益主体中x设备的安装容量;

[0040] 第i个利益主体与相邻j个利益主体联接的热网管段投资费用为:

$$[0041] \quad C_{ij} = \kappa c_{pipe} x_{ij} l_{ij}^{max} / 2 \quad ;$$

[0042] 其中, c_{pipe} 表示管段的单位投资费用, l_{ij} 表示第i个利益主体与相邻j个利益主体的管段长度, q_{ij}^{max} 表示管段ij的最大流量;

[0043] 设备资本回收系数为:

$$[0044] \quad \kappa = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad ;$$

[0045] 其中,r是贴现率,y是投资年限;

[0046] 第i个利益主体与电网的年电功率交互费用为:

$$[0047] \quad C_i^{grid} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s (c_{it}^{grid+} P_{it}^{grid+} - c_{it}^{grid-} P_{it}^{grid-}) \Delta t \quad ;$$

[0048] 其中,s表示典型日运行场景,t表示时间段, N_s 表示典型日运行场景总数目, N_t 表示典型日调度周期的时间段总数目, D_s 表示第s个典型场景的天数, $c_{it}^{grid+/-}$ 表示第i个利益主体在t时段与电网的单位买/卖成本, $P_{it}^{grid+/-}$ 表示第i个利益主体在t时段与电网的买/卖功率;

[0049] 第i个利益主体与其他利益主体的年热冷功率交互费用为:

$$[0050] \quad C_i^{exc} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} D_s c_{ij}^{MM} Q_{ijt}^{MM} \Delta t \quad ;$$

[0051] 其中, c_{ij}^{MM} 表示第i个利益主体与第j个利益主体之间的单位热/冷功率成本, Q_{ijt}^{MM} 表示第i个利益主体与第j个利益在在t时段的交互功率, N_j 表示利益主体总数目;

[0052] 第i个利益主体中交互功率偏差惩罚项为:

$$[0053] \quad C_i^{pe} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} D_s (\rho_{ijt} (Q_{ijt}^{MM} - *Q_{ijt}^{MM}) + \gamma \|Q_{ijt}^{MM} - *Q_{ijt}^{MM}\|_2^2) \Delta t \quad ;$$

[0054] 其中, ρ_{ijt} / γ 分别是拉格朗日一二次项惩罚因子, $*Q_{ijt}^{MM}$ 是上一次迭代优化出的第i个利益主体与第j个利益在t时段的交互功率;

[0055] 年设备运行费用为:

$$[0056] \quad C_i^{\varphi,m} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c^{\varphi,m} P_{it}^{\varphi} \Delta t, C_i^{\theta,m} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c^{\theta,m} Q_{it}^{\theta} \Delta t \quad ;$$

[0057] 其中, φ 表示燃气轮机、热泵、可再生能源设备、蓄电池, θ 表示燃气锅炉、吸收式制冷机、蓄热槽, $c^{\varphi,m}$ 表示第 φ 个设备的单位运行费用, $c^{\theta,m}$ 表示第 θ 个设备的单位运行费用, P_{it}^{φ} 表示第 φ 个设备在 t 时段的电功率, Q_{it}^{θ} 表示第 θ 个设备在 t 时段的热功率;

[0058] 年购天然气费用为:

$$[0059] \quad C_i^{fuel} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c_{gas} (P_{it}^{gt} / \eta^{gt} + Q_{it}^{gb} / \eta^{gb}) \Delta t \quad ;$$

[0060] 其中, c_{gas} 表示天然气的热价, $\eta^{gt/gb}$ 表示燃气轮机/锅炉的效率。

[0061] 更进一步的, 步骤 (13) 中第 i 个利益主体的三层鲁棒规划模型的约束条件为:

[0062] 第 i 个利益主体中各个设备与热网管段的投资容量不得大于该主体所能配置的最大容量的约束为:

$$[0063] \quad \begin{aligned} s.t. \quad & 0 \leq x_i^x Cap_i^x \leq Cap_i^{x,max} \quad ; \\ & 0 \leq x_{ij} q_{ij}^{max} \leq Cap_{ij}^{max} \quad ; \end{aligned}$$

[0064] 其中, $Cap_i^{x,max}$ 表示第 i 个利益主体中 x 设备的最大安装容量;

[0065] 与电网交互电功率约束:

$$[0066] \quad 0 \leq P_{it}^{gird+} \leq \varepsilon_{it}^{gird+} P_i^{max}, 0 \leq P_{it}^{gird-} \leq \varepsilon_{it}^{gird-} P_i^{max} \quad ;$$

$$[0067] \quad \varepsilon_{it}^{gird+} + \varepsilon_{it}^{gird-} \leq 1 \quad ;$$

[0068] 其中, $\varepsilon_{it}^{gird+/-}$ 表征第 i 个利益主体在 t 时段与电网的交互状态, P_i^{max} 表示第 i 个利益主体与电网的最大交互电功率;

[0069] 与其他利益主体的交互热冷功率约束:

$$[0070] \quad 0 \leq Q_{ijt}^{MM} \leq c_{water} x_{ij} q_{ij}^{max} \Delta \tau \quad ;$$

[0071] 其中, c_{water} 表示水的比热容, $\Delta \tau$ 表示管段的供回水温差;

[0072] 系统内各设备的运行出力不大于其设备的配置容量约束:

$$[0073] \quad 0 \leq P_{it}^{\varphi} \leq x_i^{\varphi} Cap^{\varphi}, 0 \leq Q_{it}^{\theta} \leq x_i^{\theta} Cap^{\theta} \quad ;$$

[0074] 可再生能源出力不大于其所在场景下的最大可输出功率约束:

$$[0075] \quad 0 \leq P_{it}^{res} \leq P_{it}^{res,max} \quad ;$$

[0076] 其中, $P_{it}^{res,max}$ 表示可再生能源在第 i 个利益主体 t 时段的最大出力, P_{it}^{res} 表示可再生能源在第 i 个利益主体 t 时段的实际出力;

[0077] 电热储能设备的充放电 (热) 功率和容量约束为:

$$[0078] \quad SOC_i^{bt,min} \leq SOC_{it}^{bt} \leq SOC_i^{bt,max} \quad ;$$

$$[0079] \quad SOC_{it}^{bt} = SOC_{i(t-1)}^{bt} + (P_{it}^{bt-} \eta_i^{bt-} - P_{it}^{bt+} / \eta_i^{bt+}) \Delta t \quad ;$$

$$[0080] \quad SOC_{it}^{tt,min} \leq SOC_{it}^{tt} \leq SOC_{it}^{tt,max} \quad ;$$

$$[0081] \quad SOC_{it}^{tt} = SOC_{i(t-1)}^{tt} + (Q_{it}^{tt-} \eta_i^{tt-} - Q_{it}^{tt+} / \eta_i^{tt+}) \Delta t \quad ;$$

[0082] 其中, $SOC_{it}^{bt/tt}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第 i 个利益主体 t 时段的荷电状态, $P_{it}^{bt+/-}$ 表示蓄

电池在第i个利益主体t时段的充/放电功率, $Q_{it}^{h,+/-}$ 表示蓄热槽在第i个利益主体t时段的充/放热功率, $\eta_i^{bt,+/-}$ 表示蓄电池在第i个利益主体中的充/放电效率, $\eta_i^{ht,+/-}$ 表示蓄热槽在第i个利益主体中的充/放热效率;

[0083] 电热储能设备的储能状态始末状态保持相等约束:

$$[0084] \quad SOC_{i0}^{bt} = SOC_{iN_t}^{bt} \quad ;$$

$$[0085] \quad SOC_{i0}^{ht} = SOC_{iN_t}^{ht} \quad ;$$

[0086] 其中, $SOC_{i0}^{bt/ht}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第i个利益主体0时刻的荷电状态, $SOC_{iN_t}^{bt/ht}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第i个利益主体 N_t 时刻的荷电状态;

[0087] 该系统的功率平衡约束,需满足系统内的电热冷等用能需求:

$$[0088] \quad P_{it}^e = I_{it}^e \quad ;$$

$$[0089] \quad Q_{it}^h + Q_{it}^{MM} = I_{it}^h + Q_{it}^c + Q_{it}^{MM} = I_{it}^c \quad ;$$

[0090] 其中, P_{it}^e 表示第i个利益主体t时段的输出电功率, I_{it}^e 表示第i个利益主体t时段的电负荷, Q_{it}^h 表示第i个利益主体t时段的输出热功率, I_{it}^h 表示第i个利益主体t时段的热负荷, Q_{it}^c 表示第i个利益主体t时段的输出冷功率, I_{it}^c 表示第i个利益主体t时段的冷负荷, Q_{it}^{MM} 表示第i个利益主体t时段与其他利益主体的交互热功率;

[0091] 可再生能源出力与电热冷负荷的不确定集:

$$[0092] \quad P_i = \{p_i : P_{it}^{res, \max} = p_{it}^* + \varepsilon_{it}^{p+} p_{it}^+ - \varepsilon_{it}^{p-} p_{it}^-\} \quad ;$$

$$[0093] \quad L_i = \begin{cases} I_{it}^e = I_{it}^{e*} + \varepsilon_{it}^{e+} I_{it}^{e+} - \varepsilon_{it}^{e-} I_{it}^{e-} \\ I_{it}^h = I_{it}^{h*} + \varepsilon_{it}^{h+} I_{it}^{h+} - \varepsilon_{it}^{h-} I_{it}^{h-} \\ I_{it}^c = I_{it}^{c*} + \varepsilon_{it}^{c+} I_{it}^{c+} - \varepsilon_{it}^{c-} I_{it}^{c-} \end{cases} \quad ;$$

$$[0094] \quad \begin{cases} \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{p+} + \varepsilon_{it}^{p-}) \leq \Gamma_i^p, 0 \leq \varepsilon_{it}^{p+}, \varepsilon_{it}^{p-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{p+}, \varepsilon_{it}^{p-} \in \{0,1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{e+} + \varepsilon_{it}^{e-}) \leq \Gamma_i^e, 0 \leq \varepsilon_{it}^{e+}, \varepsilon_{it}^{e-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{e+}, \varepsilon_{it}^{e-} \in \{0,1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{h+} + \varepsilon_{it}^{h-}) \leq \Gamma_i^h, 0 \leq \varepsilon_{it}^{h+}, \varepsilon_{it}^{h-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{h+}, \varepsilon_{it}^{h-} \in \{0,1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{c+} + \varepsilon_{it}^{c-}) \leq \Gamma_i^c, 0 \leq \varepsilon_{it}^{c+}, \varepsilon_{it}^{c-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{c+}, \varepsilon_{it}^{c-} \in \{0,1\} \end{cases} \quad ;$$

[0095] 其中, p_{it} 、 p_{it}^* 、 p_{it}^+ 、 p_{it}^- 分别为t时段第i个利益主体中可再生能源机组出力的实际值、预测标称值、预测上偏差值和预测下偏差值,引入参数 ξ_{it}^+ 和 ξ_{it}^- 使得 p_{it} 在区间 $[p_{it}^* - p_{it}^-, p_{it}^* + p_{it}^+]$ 内; Π_i^p 为整个调度周期的不确定性预算参数,取值范围为 $[0, N_t]$,改变 Π_i^p 大小可调节鲁棒模型的保守程度; $\Pi_i^p = 0$ 表示可再生能源机组出力无不确定性,该鲁棒模型转化为确定模型,无保守性; $\Pi_i^p = N_t$ 表示可再生能源机组出力在整个调度期均存在不确定性,鲁棒模型的保守性最大; L_i 中参数含义与 P_i 类似。

[0096] 更进一步的,步骤(2)包括:

[0097] (21) 首先,将三层min-max-min鲁棒规划模型写成矩阵形式为:

$$[0098] \quad COST = \min_{x_i, q_i} \left\{ c^T (x_i + q_i) + \max_{p_i \in P, l_i \in L} \min_{y_i \in \Omega(x_i, q_i, p_i, l_i)} d^T y_i \right\} ;$$

$$[0099] \quad s. t. A (x_i + q_i) \leq b ;$$

$$[0100] \quad \Omega (x_i, q_i, p_i, l_i) = \{ y_i \leq e ;$$

$$[0101] \quad Dy_i \leq h - K (x_i + q_i) ;$$

$$[0102] \quad Ey_i \leq p_i ;$$

$$[0103] \quad Fy_i = l_i \} ;$$

[0104] 其中,对第*i*个综合能源系统, x_i 为第一层中0-1优化变量, q_i 为第一层中交互热功率连续变量, p_i 和 l_i 分别是第二层的不确定性可再生能源和负荷的优化变量, y_i 为第三层的优化变量, $\Omega (x_i, q_i, p_i, l_i)$ 为某一确定 (x_i, q_i, p_i, l_i) 下 y_i 的可行域,此外, $A, B, D, E, K, b, c, d, e, h$ 均为已知的系数矩阵;

[0105] (22) 将以上问题分解为主问题和子问题,主问题MP_i为:

$$\min_{x_i, q_i, \theta_i} c^T (x_i + q_i) + \theta_i$$

$$s.t. A(x_i + q_i) \leq b$$

$$[0106] \quad \theta \geq d^T y_i^l, \forall l \leq n ;$$

$$By_i^l \leq e, Dy_i^l \leq h - Kx_i, \forall l \leq n$$

$$Ey_i^l \leq p_i^l, Fy_i^l = l_i^l, \forall l \leq n$$

[0107] 子问题SP_i具体如下:

$$\max_{\delta_i, \sigma_i, v_i, \pi_i, \tau_i} -\delta_i^T e - \sigma_i^T (h - Kx_i) - v_i^T p_i + \pi_i^T l_i$$

$$[0108] \quad s.t. -\delta_i^T B - \sigma_i^T D - v_i^T E + \pi_i^T F = d^T, ;$$

$$\delta_i \geq 0, \sigma_i \geq 0, v_i \geq 0, p_i \in P_i, l_i \in L_i$$

[0109] (23) 采用C&CG方法进行求解,具体迭代过程如下:

[0110] 对于第*i*个利益主体,设置下边界LB=-∞,上边界UB=+∞,迭代次数n=1,收敛条件 ε_{down} ;

[0111] (a) 基于交互热冷功率 q_i^* ,求解主问题MP_i;

[0112] (b) 获取 $(x_i^{*n+1}, q_i^{*n+1}, \theta_i^{*n+1}, y_i^{*n+1}, \dots, y_i^{*n})$,并更新下边界LB= $c^T(x_i^{*n+1} + q_i^{*n+1}) + \theta_i^{*n+1}$;

[0113] (c) 求解子问题SP_i,更新上边界UB= $\min[UB, c^T x_i^{*n+1} + f(x_i^{*n+1})]$;

[0114] (d) 如果UB-LB $\leq \varepsilon_{down}$,返回 x_i^{*n+1} 并停止循环,输出 q_i ;否则,添加以下约束:

$$\theta \geq d^T y_i^{*n+1}$$

$$[0115] \quad By_i^{*n+1} \leq e, Dy_i^{*n+1} \leq h - Kx_i ;$$

$$Ey_i^{*n+1} \leq p_i^{*n+1}, Fy_i^{*n+1} = l_i^{*n+1}$$

[0116] 到主问题MP_i,更新n=n+1,返回到步骤(a)。

[0117] 更进一步的,步骤(3)中各利益主体交互热冷功率不一致时,执行以下步骤:

[0118] (31) 设置上层收敛条件 ε_{up} ,迭代次数m=1,对于第*i*个利益主体,采用取平均值的方法更新交互热冷功率;

$$[0119] \quad q_i^m = (q_i^m + q_j^m) / 2 ;$$

[0120] 其中, q_i^m 为第m次迭代中第*i*个利益主体与其他利益主体进行交互热功率的矩阵形

式, q_j^m 为第m次迭代中第j个利益主体与其他利益主体进行交互热功率的矩阵形式;

[0121] (32) 判定相邻两次的交互热冷功率是否满足收敛条件:

$$[0122] \quad |q_i^m - q_i^{*m}| \leq \varepsilon_{up};$$

[0123] (33) 若满足收敛条件则停止并给出优化结果, 否则更新一二次项惩罚因子:

$$[0124] \quad \begin{cases} \rho_{ijt}(m+1) = \rho_{ijt}(m) + 2 \cdot \gamma(m)^2 (Q_{ijt}^{MM}(m) - *Q_{ijt}^{MM}(m)) \\ \gamma(m+1) = \beta \cdot \gamma(m) \end{cases};$$

[0125] 其中, $\rho_{ijt}(m) / \gamma(m)$ 分别是第m次迭代时的拉格朗日一二次项惩罚因子, $*Q_{ijt}^{MM}$ 是基于第m次迭代时第i个利益主体与第j个利益在t时段的分别求解的互相交互功率的平均值;

[0126] 并将更新结果返回到各利益主体目标函数进行下次迭代。

[0127] 有益效果: 与现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0128] 本发明的一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法, 首先, 各利益主体以自身利益最大化为目标进行规划, 充分考虑到区域热冷网的作用, 即在规划时充考虑交互热冷功率对彼此规划的影响, 并计及可再生能源及电热冷负荷的多重不确定性, 建立min-max-min的三层鲁棒规划模型, 采用C&CG算法求解。为保证不同利益主体达成一致的交互热冷功率, 采用目标级联算法(ATC)协调不同利益主体的交互热冷功率, 最后达成一致。与现有成果相比, 本方法首先考虑到了含不同利益主体的多区域综合能源系统联合规划问题, 并进一步考虑了区域热冷网对不同利益主体规划与运行的影响。结果表明, 本方法能有效避免各主体单独规划造成的设备轻载甚至闲置问题, 提升系统整体经济性。

附图说明

[0129] 图1是多区域综合能源系统结构图;

[0130] 图2是能源集线器模型;

[0131] 图3是算法流程图;

[0132] 图4是多区域综合能源系统案例图。

具体实施方式

[0133] 下面结合附图和具体实施例对本发明的技术方案进行详细说明。

[0134] 如图1所示, 多区域综合能源系统包括IES1、IES2、IES3三个利益主体, 各利益主体从外部电网、天然气网进行购电、购气。此外, 各利益主体通过区域热/冷网互联, 可进行热冷功率交互。

[0135] 如图2所示, 基于能源集线器模型, 每个利益主体IES包含: 燃气轮机(GT)、可再生能源(RES)、热泵(HP)、吸收式制冷机(AC)以及蓄电池(BT)和蓄热槽(TT)等储能设备, 输入为电、天然气, 输出电、热、冷功率。

[0136] 如图3所示, 首先, 各利益主体以自身利益最大化为目标进行规划, 充分考虑到区域热冷网的作用, 即在规划时充考虑交互热冷功率对彼此规划的影响, 并计及可再生能源及电热冷负荷的多重不确定性, 建立min-max-min的三层鲁棒规划模型, 采用C&CG算法求解。为保证不同利益主体达成一致的交互热冷功率, 采用目标级联算法(ATC)协调不同利益主体的交互热冷功率, 最后达成一致。

[0137] 具体包括以下步骤:

[0138] (1) 对于每个利益主体,建立含惩罚函数的考虑源荷不确定性的三层min-max-min鲁棒规划模型,其中将交互功率项放在三层鲁棒规划模型的最外层;

[0139] (11) 第*i*个利益主体的典型结构如图1所示:包含燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、蓄热槽、吸收式制冷以及热泵等,此外,该系统也考虑了可再生能源的接入,即每个综合能源系统(IES)中均配备有屋顶光伏。如图2所示,基于能源路由器模型,第*i*个典型区域综合能源系统的多能耦合关系如下:

$$[0140] \quad P_{it}^{grid} + P_{it}^{gt} + P_{it}^{res} + P_{it}^{bt+} - P_{it}^{bt-} - P_{it}^{hp} = P_{it}^e \quad (1);$$

$$[0141] \quad Q_{it}^{gt} + Q_{it}^{gb} + Q_{it}^{tt+} + \alpha_{it}\eta^{hp,h}P_{it}^{hp} - Q_{it}^{tt-} - Q_{it}^{ac} = Q_{it}^h \quad (2);$$

$$[0142] \quad COP^{ac}Q_{it}^{ac} + (1 - \alpha_{it})\eta^{hp,c}P_{it}^{hp} = Q_{it}^c \quad (3);$$

$$[0143] \quad P_{it}^{gt} = \eta^{gt}P_{it}^{gas}, Q_{it}^{gt} = \lambda^{gt}P_{it}^{gt} \quad (4);$$

[0144] 其中, P_{it}^{grid} 表示第*i*个利益主体在*t*时段与电网交互的电功率, P_{it}^{gt} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气轮机输出电功率, P_{it}^{res} 表示第*i*个利益主体在*t*时段可再生能源输出电功率, $P_{it}^{bt+/-}$ 表示第*i*个利益主体在*t*时段蓄电池充/放电功率, P_{it}^{hp} 表示第*i*个利益主体在*t*时段热泵消耗电功率, Q_{it}^{gt} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气轮机输出热功率, Q_{it}^{gb} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气锅炉输出热功率, $Q_{it}^{tt+/-}$ 表示第*i*个利益主体在*t*时段蓄热槽充/放热功率, Q_{it}^{ac} 表示第*i*个利益主体在*t*时段吸收式制冷机消耗热功率, P_{it}^{gas} 表示第*i*个利益主体在*t*时段消耗燃气功率, $P_{it}^e/Q_{it}^h/Q_{it}^c$ 分别表示第*i*个利益主体在*t*时段输出电/热/冷功率, $\eta^{hp,h/c}$ 表示第*i*个利益主体在*t*时段热泵制热/冷效率, α_{it} 表示第*i*个利益主体在*t*时段热泵热泵生成热能用于供应热负荷和冷负荷的调度因子, COP^{ac} 表示第*i*个利益主体在*t*时段吸收式制冷机制冷效率, η^{gt} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气轮机发电效率, λ^{gt} 表示第*i*个利益主体在*t*时段燃气轮机热电比。此外,式(1)–(3)分别为第*i*个利益主体中电功率、热功率和冷功率平衡方程,式(4)表示第*i*个利益主体中燃气轮机的输出电功率和热功率。

[0145] (12) 第*i*个利益主体的三层鲁棒规划模型的目标函数如下:

$$[0146] \quad COST_i = \min(COST_i^I + COST_i^{II} + \max \min COST_i^{III}) \quad (5);$$

$$[0147] \quad \min COST_i^I = \min_{\substack{x_i^{gt}, x_i^{gb}, x_i^{bt}, x_i^{tt} \\ x_i^{hp}, x_i^{ac}, x_i^{res}, x_{ij}}} (C_i^{hp} + C_i^{ac} + C_i^{res} + \sum_{j=1}^{N_j} C_{ij}) \quad (6);$$

$$[0148] \quad \min COST_i^{II} = \min_{P_i^{grid+}, P_i^{grid-}, Q_{ij}^{MM}} (C_i^{grid} + C_i^{ex} + C_i^{pe}) \quad (7);$$

[0149]

$$\min \max \min COST_i^{III} = \min_{\substack{P_i \in P_i, l_i^e \in L_i^e \\ l_i^h \in L_i^h, l_i^c \in L_i^c}} \max_{\substack{P_i^{res}, P_i^{gt}, P_i^{bt+/-}, P_i^{hp} \\ Q_i^{gb}, Q_i^{ac}, Q_i^{tt+/-}}} \min_{\substack{P_i^{res}, P_i^{gt}, P_i^{bt+/-}, P_i^{hp} \\ Q_i^{gb}, Q_i^{ac}, Q_i^{tt+/-}}} \left(C_i^{gt,m} + C_i^{gb,m} + C_i^{bt,m} + C_i^{tt,m} \right. \\ \left. + C_i^{res,m} + C_i^{ac,m} + C_i^{hp,m} + C_i^{fuel} \right) \quad (8);$$

$$[0150] \quad C_i^Z = \kappa c^Z x_i^Z Cap_i^Z \quad (9);$$

$$[0151] \quad C_{ij} = \kappa c_{pipe} x_{ij} l_{ij}^{max} / 2 \quad (10)$$

$$[0152] \quad \kappa = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (11);$$

$$[0153] \quad C_i^{grid} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s (c_{it}^{grid+} P_{it}^{grid+} - c_{it}^{grid-} P_{it}^{grid-}) \Delta t \quad (12);$$

$$[0154] \quad C_i^{ex} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} D_s c_{ij}^{MM} Q_{ijt}^{MM} \Delta t \quad (13);$$

$$[0155] \quad C_i^{pe} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_j} D_s (\rho_{ijt} (Q_{ijt}^{MM} - \hat{Q}_{ijt}^{MM}) + \gamma \|Q_{ijt}^{MM} - \hat{Q}_{ijt}^{MM}\|_2^2) \Delta t \quad (14);$$

$$[0156] \quad C_i^{g,m} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c_{it}^{g,m} P_{it}^{g,m} \Delta t, C_i^{g,m} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c_{it}^{g,m} Q_{it}^{g,m} \Delta t \quad (15);$$

$$[0157] \quad C_i^{fuel} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_t} D_s c_{gas} (P_{it}^{gt} / \eta^{gt} + Q_{it}^{gb} / \eta^{gb}) \Delta t \quad (16);$$

[0158] 其中,式(5)表示第i个利益主体的三层鲁棒规划模型的目标函数,具体包含三部分:式(6)为年投资费用,其中, x_i^{gt} , x_i^{gb} , x_i^{bt} , x_i^{tt} , x_i^{hp} , x_i^{ac} , x_i^{res} , x_{ij} 为0-1变量,分别表示燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备以及第i个利益主体与第j个利益主体之间的热网管段ij是否安装, C_i^{gt} , C_i^{gb} , C_i^{bt} , C_i^{tt} , C_i^{hp} , C_i^{ac} , C_i^{res} , C_{ij} 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、电储能、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备与热网管段ij的投资费用;式(7)为年交互费用,其中,, C_i^{grid} 、 C_i^{ex} 与 C_i^{pe} 分别表示与电网年交互费用、与其他利益主体年交互费用和惩罚费用, $P_i^{grid+/-}$ 与 Q_i^{MM} 分别表示与电网买卖电功率和与其他利益主体买卖热冷功率;式(8)为年运行费用,其中, $C_i^{gt,m}$, $C_i^{gb,m}$, $C_i^{bt,m}$, $C_i^{tt,m}$, $C_i^{hp,m}$, $C_i^{res,m}$, $C_i^{ac,m}$, $C_i^{hp,m}$, $C_i^{fuel,m}$ 分别表示燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池、蓄热槽、可再生能源、吸收式制冷机、热泵的年设备运行维护费用, C_i^{fuel} 为年购燃气费用, P_i^{res} , P_i^{gt} , $P_i^{bt+/-}$, P_i^{hp} 分别表示可再生能源、燃气轮机、蓄电池充/放电功率与热泵消耗电功率、 Q_i^{gb} , Q_i^{ac} , $Q_i^{bt+/-}$ 分别表示燃气锅炉、吸收式制冷机和蓄热槽充/放热功率, P_i , L_i^e , L_i^h , L_i^c 分别表示可再生能源出力与电、热、冷负荷的不确定集,而 p_i , l_i^e , l_i^h , l_i^c 为对应不确定集中的具体元素;式(9)为第x种设备的年投资费用,x分别表示燃气轮机、燃气锅炉、电储能、热储能、热泵、吸收式制冷、可再生能源设备, κ 为设备资本回收系数, c^x 为设备的单位投资费用, x_i^x 表示第i个利益主体中是否安装x设备, Cap_i^x 表示第i个利益主体中x设备的安装容量;式(10)为第i个利益主体与相邻j个利益主体联接的热网管段投资费用,且各承担一半,其中, C_{pipe} 表示管段的单位投资费用, l_{ij} 表示第i个利益主体与相邻j个利益主体的管段长度, q_{ij}^{max} 表示管段ij的最大流量;式(11)为设备资本回收系数, r 是贴现率, y 是投资年限;式(12)为第i个利益主体与电网的年电功率交互费用,其中, s 表示典型日运行场景, t 表示时间段, N_s 表示典型日运行场景总数目, N_t 表示典型日调度周期的时间段总数目, D_s 表示第s个典型场景的天数, $c_{it}^{grid+/-}$ 表示第i个利益主体在t时段与电网的单位买/卖成本, $P_{it}^{grid+/-}$ 表示第i个利益主体在t时段与电网的买/卖功率;式(13)为第i个利益主体与其他利益主体的年热冷功率交互费用,其中,其中, c_{ij}^{MM} 表示第i个利益主体与第j个利益主体之间的单位热/冷功率成本, Q_{ijt}^{MM} 表示第i个利益主体与第j个利益在在t时段的交

互功率, N_j 表示利益主体总数目; 式 (14) 为第 i 个利益主体中交互功率偏差惩罚项, ρ_{ijt}/γ 分别是拉格朗日一二次项惩罚因子, $*Q_{ijt}^{MM}$ 是上一次迭代优化出的第 i 个利益主体与第 j 个利益在 t 时段的交互功率; 式 (15) 为年设备运行费用, 其中, φ 表示燃气轮机、热泵、可再生能源设备、蓄电池, θ 表示燃气锅炉、吸收式制冷机、蓄热槽, $c^{\varphi,m}$ 表示第 φ 个设备的单位运行费用, $c^{\theta,m}$ 表示第 θ 个设备的单位运行费用, P_{it}^{φ} 表示第 φ 个设备在 t 时段的电功率, Q_{it}^{θ} 表示第 θ 个设备在 t 时段的热功率; 式 (16) 为年购天然气费用, 其中, c_{gas} 表示天然气的热价, $\eta^{gt/gb}$ 表示燃气轮机/锅炉的效率。

[0159] (13) 第 i 个利益主体的三层鲁棒规划模型的约束条件如下:

$$[0160] \quad s.t. \quad 0 \leq x_i^Z Cap_i^Z \leq Cap_i^{Z,max} \quad (17);$$

$$[0161] \quad 0 \leq x_{ij} q_{ij}^{max} \leq Cap_{ij}^{max} \quad (18);$$

$$[0162] \quad 0 \leq P_{it}^{gird+} \leq \varepsilon_{it}^{gird+} P_i^{max}, 0 \leq P_{it}^{gird-} \leq \varepsilon_{it}^{gird-} P_i^{max} \quad (19);$$

$$[0163] \quad \varepsilon_{it}^{gird+} + \varepsilon_{it}^{gird-} \leq 1 \quad (20);$$

$$[0164] \quad 0 \leq Q_{ijt}^{MM} \leq c_{water} x_{ij} q_{ij}^{max} \Delta \tau \quad (21);$$

$$[0165] \quad 0 \leq P_{it}^{\varphi} \leq x_i^{\varphi} Cap^{\varphi}, 0 \leq Q_{it}^{\theta} \leq x_i^{\theta} Cap^{\theta} \quad (22);$$

$$[0166] \quad 0 \leq P_{it}^{res} \leq P_{it}^{res,max} \quad (23);$$

$$[0167] \quad SOC_{it}^{bt,min} \leq SOC_{it}^{bt} \leq SOC_{it}^{bt,max} \quad (24);$$

$$[0168] \quad SOC_{it}^{bt} = SOC_{i(t-1)}^{bt} + (P_{it}^{bt-} \eta_i^{bt-} - P_{it}^{bt+} / \eta_i^{bt+}) \Delta t \quad (25);$$

$$[0169] \quad SOC_{it}^{tt,min} \leq SOC_{it}^{tt} \leq SOC_{it}^{tt,max} \quad (26);$$

$$[0170] \quad SOC_{it}^{tt} = SOC_{i(t-1)}^{tt} + (Q_{it}^{tt-} \eta_i^{tt-} - Q_{it}^{tt+} / \eta_i^{tt+}) \Delta t \quad (27);$$

$$[0171] \quad SOC_{i0}^{bt} = SOC_{iN_i}^{bt} \quad (28);$$

$$[0172] \quad SOC_{i0}^{tt} = SOC_{iN_i}^{tt} \quad (29);$$

$$[0173] \quad P_{it}^e = I_{it}^e \quad (30);$$

$$[0174] \quad Q_{it}^h + Q_{it}^{MM} = I_{it}^h, Q_{it}^c + Q_{it}^{MM} = I_{it}^c \quad (31);$$

$$[0175] \quad P_i = \{P_i : P_{it}^{res,max} = P_{it}^* + \varepsilon_{it}^{p+} P_{it}^{p+} - \varepsilon_{it}^{p-} P_{it}^{p-}\} \quad (32);$$

$$[0176] \quad L_i = \left\{ \begin{array}{l} I_{it}^e = I_{it}^{e*} + \varepsilon_{it}^{e+} I_{it}^{e+} - \varepsilon_{it}^{e-} I_{it}^{e-} \\ I_{it}^h = I_{it}^{h*} + \varepsilon_{it}^{h+} I_{it}^{h+} - \varepsilon_{it}^{h-} I_{it}^{h-} \\ I_{it}^c = I_{it}^{c*} + \varepsilon_{it}^{c+} I_{it}^{c+} - \varepsilon_{it}^{c-} I_{it}^{c-} \end{array} \right\} \quad (33);$$

$$[0177] \quad \begin{cases} \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{p+} + \varepsilon_{it}^{p-}) \leq \Gamma_i^p, 0 \leq \varepsilon_{it}^{p+}, \varepsilon_{it}^{p-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{p+}, \varepsilon_{it}^{p-} \in \{0,1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{e+} + \varepsilon_{it}^{e-}) \leq \Gamma_i^e, 0 \leq \varepsilon_{it}^{e+}, \varepsilon_{it}^{e-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{e+}, \varepsilon_{it}^{e-} \in \{0,1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{h+} + \varepsilon_{it}^{h-}) \leq \Gamma_i^h, 0 \leq \varepsilon_{it}^{h+}, \varepsilon_{it}^{h-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{h+}, \varepsilon_{it}^{h-} \in \{0,1\} \\ \sum_{t=1}^{N_t} (\varepsilon_{it}^{c+} + \varepsilon_{it}^{c-}) \leq \Gamma_i^c, 0 \leq \varepsilon_{it}^{c+}, \varepsilon_{it}^{c-} \leq 1, \varepsilon_{it}^{c+}, \varepsilon_{it}^{c-} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (34);$$

[0178] 其中,式(17)–(18)表示第*i*个利益主体中各个设备与热网管段的投资容量不得大于该主体所能配置的最大容量;式(19)–(20)为与电网交互电功率约束,且任意时段最多存在一个交互状态;式(21)为与其他利益主体的交互热冷功率约束;式(22)为系统内各设备的运行出力不大于其设备的配置容量;式(23)表示可再生能源出力不大于其所在场景下的最大可输出功率;式(24)–(27)表示电热储能设备的充放电(热)功率和容量约束;式(28)–(29)表示电热储能设备的储能状态始末状态保持相等;式(30)–(31)为该系统的功率平衡约束,需满足系统内的电热冷等用能需求;式(32)–(34)是可再生能源出力与电热冷负荷的不确定集。其中, $Cap_i^{x,max}$ 表示第*i*个利益主体中*x*设备的最大安装容量; $\varepsilon_{it}^{grid+/-}$ 表征第*i*个利益主体在*t*时段与电网的交互状态, P_i^{max} 表示第*i*个利益主体与电网的最大交互电功率; c_{water} 表示水的比热容, $\Delta \tau$ 表示管段的供回水温差; $P_{it}^{res,max}$ 表示可再生能源在第*i*个利益主体*t*时段的最大出力, P_{it}^{res} 表示可再生能源在第*i*个利益主体*t*时段的实际出力; $SOC_{it}^{bt/ut}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第*i*个利益主体*t*时段的荷电状态, $P_{it}^{bt,+/-}$ 表示蓄电池在第*i*个利益主体*t*时段的充/放电功率, $Q_{it}^{ht,+/-}$ 表示蓄热槽在第*i*个利益主体*t*时段的充/放热功率, $\eta_i^{bt,+/-}$ 表示蓄电池在第*i*个利益主体中的充/放电效率, $\eta_i^{ht,+/-}$ 表示蓄热槽在第*i*个利益主体中的充/放热效率; $SOC_{i0}^{bt/ut}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第*i*个利益主体0时刻的荷电状态, $SOC_{iN_t}^{bt/ut}$ 表示蓄电池/蓄热槽在第*i*个利益主体*N_t*时刻的荷电状态; P_{it}^e 表示第*i*个利益主体*t*时段的输出电功率, l_{it}^e 表示第*i*个利益主体*t*时段的电负荷, Q_{it}^h 表示第*i*个利益主体*t*时段的输出热功率, l_{it}^h 表示第*i*个利益主体*t*时段的热负荷, Q_{it}^c 表示第*i*个利益主体*t*时段的输出冷功率, l_{it}^c 表示第*i*个利益主体*t*时段的冷负荷, Q_{it}^{MM} 表示第*i*个利益主体*t*时段与其他利益主体的交互热功率。

[0179] 以*P_i*为例, p_{it} 、 p_{it}^* 、 p_{it}^+ 、 p_{it}^- 分别为*t*时段第*i*个利益主体中可再生能源机组出力的实际值、预测标称值、预测上偏差值和预测下偏差值,引入参数 ξ_{it}^+ 和 ξ_{it}^- 使得 p_{it} 在区间 $[p_{it}^* - p_{it}^-, p_{it}^* + p_{it}^+]$ 内。 Π_i^p 为整个调度周期的不确定性预算参数,取值范围为 $[0, N_t]$,改变 Π_i^p 大小可调节鲁棒模型的保守程度; $\Pi_i^p = 0$ 表示可再生能源机组出力无不确定性,该鲁棒模型转化为确定模型,无保守性; $\Pi_i^p = N_t$ 表示可再生能源机组出力在整个调度期均存在不确定性,鲁棒模型的保守性最大; L_i 中参数含义与*P_i*类似,在此不再赘述。

[0180] (2) 采用C&CG算法进行求解,获取每个利益主体的容量配置结果与各主体间的交互热冷功率;

[0181] (21) 首先,为方便表述,我们采用上述模型写成矩阵形式:

$$[0182] \quad COST = \min_{x_i, q_i} \left\{ c^T (x_i + q_i) + \max_{p_i \in P, l_i \in L} \min_{y_i \in \Omega(x_i, q_i, p_i, l_i)} d^T y_i \right\} \quad (35);$$

$$[0183] \quad s. t. A (x_i + q_i) \leq b \quad (36);$$

$$[0184] \quad \Omega (x_i, q_i, p_i, l_i) = \{B y_i \leq e \quad (37);$$

$$[0185] \quad D y_i \leq h - K (x_i + q_i) \quad (38);$$

$$[0186] \quad E y_i \leq p_i \quad (39);$$

$$[0187] \quad F y_i = l_i \quad (40);$$

[0188] 式中,对第*i*个综合能源系统, x_i 为第一层中0-1优化变量, q_i 为第一层中交互热功率连续变量, p_i 和 l_i 分别是第二层的不确定性可再生能源和负荷的优化变量, y_i 为第三层的优化变量, $\Omega (x_i, q_i, p_i, l_i)$ 为某一确定 (x_i, q_i, p_i, l_i) 下 y_i 的可行域;此外, $A, B, D, E, K, b, c, d, e, h$ 均为已知的系数矩阵;式(36)–(40)分别表示与优化变量相关的等于与不等式约束。

[0189] (22)将以上问题分解为主问题和子问题,主问题 MP_i 如下:

$$\begin{aligned} & \min_{x_i, q_i, \theta_i} c^T (x_i + q_i) + \theta_i \\ & s. t. A(x_i + q_i) \leq b \\ [0190] \quad & \theta \geq d^T y_i^l, \forall l \leq n \quad (41); \\ & B y_i^l \leq e, D y_i^l \leq h - K x_i, \forall l \leq n \\ & E y_i^l \leq p_i^l, F y_i^l = l_i^l, \forall l \leq n \end{aligned}$$

[0191] 子问题 SP_i 具体如下:

$$\begin{aligned} & \max_{\delta_i, \sigma_i, v_i, \pi_i, \tau_i} -\delta_i^T e - \sigma_i^T (h - K x_i) - v_i^T p_i + \pi_i^T l_i \\ [0192] \quad & s. t. -\delta_i^T B - \sigma_i^T D - v_i^T E + \pi_i^T F = d^T, \quad (42); \\ & \delta_i \geq 0, \sigma_i \geq 0, v_i \geq 0, p_i \in P_i, l_i \in L_i \end{aligned}$$

[0193] (23)采用列与约束生成算法(C&CG)方法进行求解,具体迭代过程如下:

[0194] 对于第*i*个利益主体,设置下边界 $LB = -\infty$,上边界 $UB = +\infty$,迭代次数 $n = 1$,收敛条件 ε_{down} 。

[0195] (a)基于交互热冷功率 q_i^* ,求解主问题 MP_i ;

[0196] (b)获取 $(x_i^{*n+1}, q_i^{*n+1}, \theta_i^{*n+1}, y_i^{*n}, \dots, y_i^{*n})$,并更新下边界 $LB = c^T (x_i^{*n+1} + q_i^{*n+1}) + \theta_i^{*n+1}$;

[0197] (c)求解子问题 SP_i ,更新上边界 $UB = \min[UB, c^T x_i^{*n+1} + f(x_i^{*n+1})]$ 。

[0198] (d)如果 $UB - LB \leq \varepsilon_{down}$,返回 x_i^{*n+1} 并停止循环,输出 q_i ;否则,添加以下约束:

$$\begin{aligned} & \theta \geq d^T y_i^{*n+1} \\ [0199] \quad & B y_i^{*n+1} \leq e, D y_i^{*n+1} \leq h - K x_i \quad (43); \\ & E y_i^{*n+1} \leq p_i^{*n+1}, F y_i^{*n+1} = l_i^{*n+1} \end{aligned}$$

[0200] 到主问题 MP_i ,更新 $n = n + 1$,返回到步骤(a)。

[0201] (3)判定各利益主体交互热冷功率是否达成一致;

[0202] 如果一致,满足收敛条件,跳出循环并结束。

[0203] 如果不一致,采用取平均值的方法更新交互热冷功率,并更新拉格朗日一次与二次惩罚系数,将更新结果返回到各利益主体目标函数进行下次迭代优化;具体为:

[0204] (31)设置上层收敛条件 ε_{up} ,迭代次数 $m = 1$,对于第*i*个利益主体,采用取平均值的方法更新交互热冷功率。

[0205] $q_i^{*m} = (q_i^m + q_j^m) / 2$ (44);

[0206] 其中, q_i^m 为第m次迭代中第i个利益主体与其他利益主体进行交互热功率的矩阵形式, q_j^m 为第m次迭代中第j个利益主体与其他利益主体进行交互热功率的矩阵形式;

[0207] (32) 判定相邻两次的交互热冷功率是否满足收敛条件:

[0208] $|q_i^m - q_i^{*m}| \leq \varepsilon_{up}$ (45);

[0209] (33) 若满足收敛条件则停止并给出优化结果, 否则更新一二次项惩罚因子:

[0210]
$$\begin{cases} \rho_{ijt}^{pe}(m+1) = \rho_{ijt}^{pe}(m) + 2 \cdot \gamma(m)^2 (Q_{ijt}^{MM}(m) - \hat{Q}_{ijt}^{MM}(m)) \\ \gamma(m+1) = \beta \cdot \gamma(m) \end{cases}$$
 (46);

[0211] 其中, $\rho_{ijt}(m) / \gamma(m)$ 分别是第m次迭代时的拉格朗日一二次项惩罚因子, Q_{ijt}^{MM} 是基于第m次迭代时第i个利益主体与第j个利益在t时段的分别求解的互相交互功率的平均值; 并返回步骤(23)中(a)。

[0212] 基于如图4所示某多区域综合能源系统案例图, 该系统包含4个不同的利益主体, 各利益主体的用能特征不同, 分别是区域1(商业区)商业型综合能源系统、区域2(住宅区)住宅型综合能源系统、区域3(办公区)办公型综合能源系统、区域4(工业区)工业型综合能源系统。表1给出四种方案的规划结果, 其中, 方案1是各区域独自进行规划; 方案2是基于本发明中的考虑不同利益主体的分散式规划; 方案3是考虑不同规划顺序的分散式规划, 规划顺序为从区域1到区域4; 方案4同样是考虑不同规划顺序的分散式规划, 规划顺序为从区域4到区域1。从表1可以看出, 在方案1-4中, 年总费用分别为 409.28×10^5 美元、 411.84×10^5 美元、 428.64×10^5 美元和 432.29×10^5 美元。与方案3-4相比, 方案2的设备优化配置结果与经济性与案例1更为接近。与方案2比较可以发现, 方案3中区域1商业型综合能源系统的成本较低, 而区域2-4的成本更高, 且总费用高于方案2。同样, 在方案4中, 由于区域4是首先规划的, 其费用最低, 而其他区域的费用要高于方案2中的结果。结果表明, 本发明所提同步型分散式规划方法能有效解决多利益主体规划问题。

[0213] 表1综合能源系统容量配置结果

[0214]

	设备类型	商业型	住宅型	办公型	工业型
方案一	燃气轮机(MW)	7.5	11.5	3.5	9.5
	燃气锅炉(MW)	3.0	0	7.0	1.0
	蓄电池(MW)	2.7	1.5	0.4	0.60
	蓄热槽(MW)	5.5	0	3.7	2.0
	热泵(MW)	2.5	0	0.25	1.0
	吸收式制冷机(MW)	12.0	15.0	6.0	14.0
	光伏(MW)	5.0	5.0	5.0	10.0
	$COST^I$	17.42	22.51	11.55	24.89
	$COST^{II+III}$	78.85	99.12	36.53	118.41
	$COST$	96.26	121.64	48.08	143.3
	总成本($\times 10^5$ \$)		409.28		
方案二	燃气轮机(MW)	7.5	11.5	3.5	10.0
	燃气锅炉(MW)	2.7	0	7.0	1.5
	蓄电池(MW)	2.7	1.5	0.4	0.65
	蓄热槽(MW)	5.5	0	3.7	3.0
	热泵(MW)	2.5	0	0.25	1.2
	吸收式制冷机(MW)	12.0	15.0	6.0	13.5
	光伏(MW)	5.0	5.0	5.0	10.0
	$COST^I$	18.52	21.32	11.55	27.13
	$COST^{II+III}$	80.32	99.81	36.38	116.81
	$COST$	98.84	121.13	47.93	143.94
	总成本($\times 10^5$ \$)		411.84		
方案三	燃气轮机(MW)	7.05	11.5	3.52	10.0
	燃气锅炉(MW)	3.25	0	6.5	2.2
	蓄电池(MW)	0.5	1.35	0.3	0.5
	蓄热槽(MW)	1.8	1.7	3.7	2.0
	热泵(MW)	0.85	0.8	0.5	0.9
	吸收式制冷机(MW)	11.5	15.2	7.0	14.7
	光伏(MW)	5.0	5.0	5.0	10.0
	$COST^I$	19.88	22.95	12.08	29.43
	$COST^{II+III}$	74.98	101.19	39.79	127.31
	$COST$	94.87	124.14	51.87	156.75
	总成本($\times 10^5$ \$)		428.64		
方案四	燃气轮机(MW)	7.5	1.4	3.45	10.0
	燃气锅炉(MW)	1.5	0	4.0	2.0
	蓄电池(MW)	0.6	0	0.8	0.8
	蓄热槽(MW)	2.3	0	4.2	1.2
	热泵(MW)	4.0	0.3	0.2	0.7
	吸收式制冷机(MW)	11.6	15	4.65	14.0
	光伏(MW)	5.0	5.0	5.0	10.0
	$COST^I$	16.69	25.82	12.01	28.24
	$COST^{II+III}$	83.67	100.25	53.05	112.17
	$COST$	100.35	126.06	65.06	140.76
	总成本($\times 10^5$ \$)		432.29		

[0215]

[0216] 本发明的一种含多利益主体的区域综合能源系统分散式规划方法,首先,各利益主体以自身利益最大化为目标进行规划,充分考虑到区域热冷网的作用,即在规划时充分考虑交互热冷功率对彼此规划的影响,并计及可再生能源及电热冷负荷的多重不确定性,建立min-max-min的三层鲁棒规划模型,采用C&CG算法求解。为保证不同利益主体达成一致的交互热冷功率,采用目标级联算法(ATC)协调不同利益主体的交互热冷功率,最后达成一致。本方法的有益效果在于:首先考虑到了含不同利益主体的多区域综合能源系统联合规划问题,并进一步考虑了区域热冷网对不同利益主体规划与运行的影响。结果表明,本方法能有效避免各主体单独规划造成的设备轻载甚至闲置问题,提升系统整体经济性。

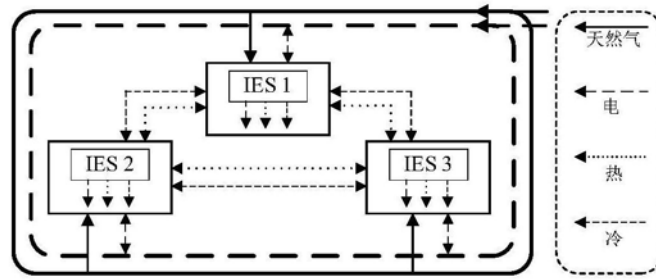


图1

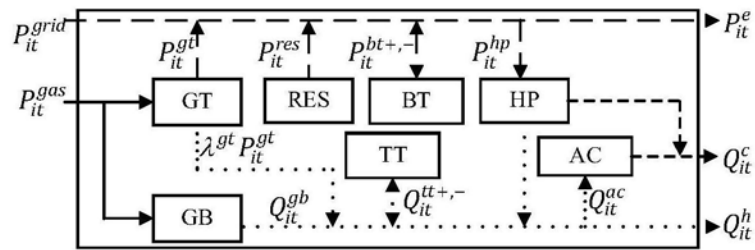


图2

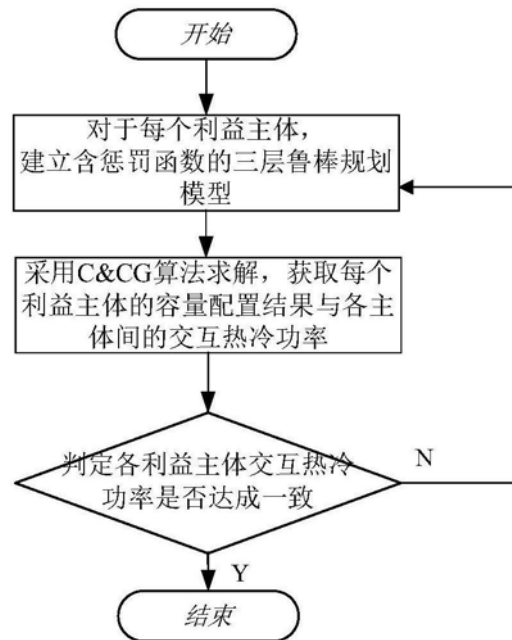


图3

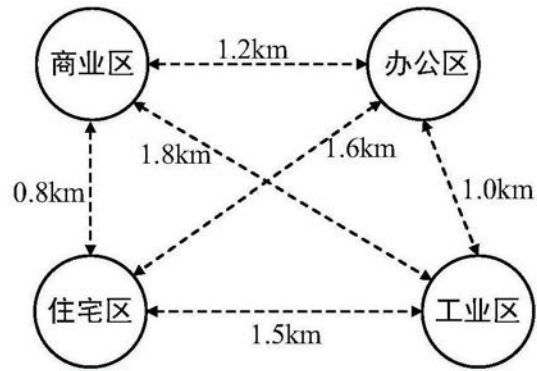


图4