

基于改进交替方向乘子法的电-气-热系统分布式优化调度

陈健¹, 张维桐¹, 林达², 李志浩², 宋关羽³, 顾一丰⁴

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省济南市 250061;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江省杭州市 310014;

3. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072;

4. 国网浙江绍兴市上虞区供电有限公司, 浙江省绍兴市 312000)

摘要: 随着微型燃气轮机和以其为基础的热电联供单元在配电网中的大量接入, 电力系统、天然气系统和供热系统之间的耦合关系和联合优化越来越受到关注。针对电-气-热混联系统日前调度问题, 建立了以系统经济成本为目标函数的日前调度模型。其次, 建立了配电网、热网模型并考虑了动态特性的天然气网络模型。另外, 考虑到电-气-热系统之间信息不透明特性, 提出了基于改进交替方向乘子法(ADMM), 即带高斯回代 ADMM 的分布式优化调度方法。最后通过算例分析验证了所提模型和优化框架的有效性。

关键词: 电-气-热混联系统; 日前调度; 热电联供; 分布式优化

0 引言

能源危机与环境污染问题成为社会各界的关注焦点, 促进了人类能源消费方式的变革。以热电联供(combined heat and power, CHP)为核心单元的综合能源系统(integrated energy system, IES)打破各能源系统分开规划、独立运行的既有模式, 在满足多种负荷需求的同时, 提高了能源系统的经济效益与环境效益, 是未来能源系统发展的重要方向^[1-2]。

目前, 关于 IES 系统的研究多集中于建模、经济调度方面^[3-14]。文献[4]提出了考虑节点流量平衡、热能-流量约束及热损平衡约束的热网模型, 并建立了冷热电联供系统和热网、配电网的多区域 IES 模型。文献[5]建立了含有热网和配电网的多区域 IES 优化运行模型; 文献[9]提出了一种含电转气设备的电-气-热多能源系统优化调度模型。上述文献在构建 IES 系统模型时, 仅建立了配电网-热网模型或配电网-天然气网模型, 忽略了不同网络结构、不同类型负荷对 IES 系统调度的影响。文献[10]基于能量集线器理论建立了电力、天然气和热力系统模型, 提出了电-气-热系统的混合潮流

算法。文献[11]基于电力、天然气和热力系统模型, 提出了能量流综合求解模型, 以经济最优为目标, 通过设置合理的运行约束对电-气-热系统能量流进行优化。然而, 上述文献对于电-气-热系统模型的构建均是基于稳态天然气网络模型, 而天然气传输过程的时间常数相对较大, 在配电网等级下有必要进一步考虑天然气潮流在传输过程中的动态特性。

另外, 在 IES 系统的优化问题中, 大部分文献对调度问题采用了统一求解方法^[9-11], 忽略各个子系统间的信息不透明特性(例如: 需保密的网络规划信息、包含详细参数的地理接线、潮流等数据)的影响。文献[15]采用交替方向乘子法(alternative direction multiplier method, ADMM)求解电-气混联系统的优化调度问题。文献[16]采用带重启规则的快速 ADMM 算法求解配电网等级下电-气混联系统的优化调度问题。但是上述文献所采用的分布式算法均是针对只有电力、天然气两个子系统的 IES 优化调度问题, 对于包含电力、天然气、热力 3 个子系统的 IES 优化问题不能保证收敛到最优解。

为此, 本文针对电-气-热混联系统日前调度问题, 建立了电-气-热混联系统日前调度模型, 包括系统运行模型和经济模型; 在日前调度模型中建立了配电网、热网模型, 以及考虑了传输过程中动态特性的天然气网络模型; 此外, 考虑到不同子系统之间

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-10-22。

上网日期: 2019-03-05。

国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS17001D); 泰山学者特聘专家资助项目。

的信息不透明特性,采用分布式算法求解优化问题,即提出了基于带高斯回代的交替方向乘子法(alternative direction multiplier method with Gaussian back substitution, ADMM-GBS)电-气-热混联系统的分布式优化调度方法。最后通过算例验证了所提出电-气-热混联系统模型和优化方法的有效性。

1 电-气-热混联系统日前调度模型

电-气-热混联系统的结构如图1所示,电、气、热网络通过 CHP、电热锅炉、P2G(power to gas)和燃气锅炉等设备互相连接。本文针对由 CHP 单元连接的电-气-热混联系统展开讨论。

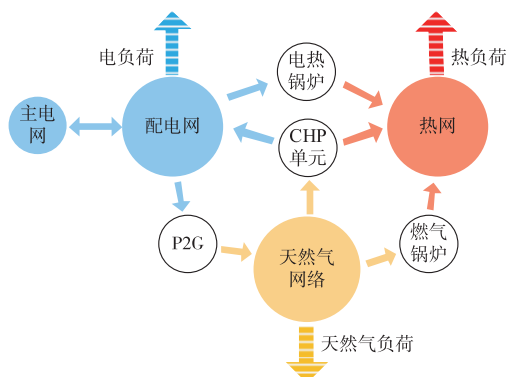


图1 电-气-热混联系统结构

Fig.1 Structure of integrated electricity-gas-heat system

1.1 CHP 耦合单元模型

CHP 单元是以微型燃气轮机(micro-turbines, MT)和余热锅炉为基础构成的系统。MT 消耗的燃料成本 $C_{\text{gas, fuel}}$ 可以由 MT 输出的功率 P_{mt} 计算得到:

$$C_{\text{gas, fuel}} = c_{\text{gas}} F_{\text{gas}} = c_{\text{gas}} \sum_{t=1}^{\Gamma} (\alpha + \beta P_{\text{mt}}(t) + \gamma (P_{\text{mt}}(t))^2) \quad (1)$$

式中: α, β, γ 为通过拟合天然气耗量曲线得到的参数^[17]; c_{gas} 为天然气价格; F_{gas} 为耗气量; Γ 为系统的调度总时间间隔。

另外,余热锅炉回收的热功率 H_{mt} 可以由式(2)得到:

$$H_{\text{mt}}(t) = P_{\text{mt}}(t) \eta_{\text{h}} \quad (2)$$

式中: η_{h} 为余热锅炉的热转化效率。

MT 消耗天然气发电以供应负荷或传输到电网,建立了气网、电网间的联系; MT 产生的热量被余热锅炉吸收并传输到供热网络,建立了气网或电网与热网间的联系。CHP 单元作为电-气-热系统的耦合单元,通过 MT 和余热锅炉将 3 个系统连接

起来。

1.2 配电网模型

采用传统的辐射型配电网的网络模型,通过线性化 DistFlow 潮流方程模拟配电网潮流^[18-19],该潮流方程在传统的配电网中被广泛地应用。辐射型配电网结构如附录 A 图 A1 所示。式(3)、式(4)为配电网有功、无功功率方程;式(5)、式(6)分别为电压方程和电压上下限约束。

$$P_{i+1}(t) = P_i(t) - P_{i+1,L}(t) + P_{i+1,G}(t) \quad (3)$$

$$Q_{i+1}(t) = Q_i(t) - Q_{i+1,L}(t) + Q_{i+1,G}(t) \quad (4)$$

$$V_{i+1}(t) = V_i(t) - \frac{r_i P_i(t) + x_i Q_i(t)}{V_0} \quad (5)$$

$$V_{i,\min} \leq V_i(t) \leq V_{i,\max} \quad (6)$$

式中: $P_{i+1}(t)$ 和 $Q_{i+1}(t)$ 分别为从节点 $i+1$ 传输到节点 $i+2$ 的有功功率和无功功率; $P_i(t)$ 和 $Q_i(t)$ 分别为从节点 i 传输到节点 $i+1$ 的有功功率和无功功率; $P_{i+1,G}(t)$ 和 $Q_{i+1,G}(t)$ 分别为节点 $i+1$ 所接电源的有功功率和无功功率; $P_{i+1,L}(t)$ 和 $Q_{i+1,L}(t)$ 分别为节点 $i+1$ 所接负荷的有功功率和无功功率; r_i 和 x_i 分别为节点 i 与节点 $i+1$ 之间的电阻和电抗; V_0, V_i 和 V_{i+1} 分别为节点 0, 节点 i 和节点 $i+1$ 的电压; $V_{i,\max}$ 和 $V_{i,\min}$ 分别为 V_i 的最大值和最小值。

1.3 天然气网络模型

管道中的天然气潮流与天然气的密度、流速、温度、压强等参数有关。天然气在管道中的传输速度远小于电能的传输速度,因此考虑了天然气在传输过程中的动态特性,采用了动态的天然气传输方程,包括动量方程、物质平衡方程和状态方程^[20-21]。

动量方程式(7)描述了天然气加速度、对流、静水效应;物质平衡方程式(8)描述了管道中天然气质量守恒特性;状态方程式(9)描述了天然气压力和密度之间的关系。然而,式(7)和式(8)的偏微分方程在优化过程中难以利用,因此将其转化为微分方程的差分形式,如式(10)和式(11)所示^[22]。

$$\frac{\partial M}{A \partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda' M^2}{2d\rho A^2} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial M}{A \partial x} = 0 \quad (8)$$

$$p = c^2 \rho \quad (9)$$

$$\begin{cases} \rho_{e,b}(t+1) + \rho_{e,a}(t+1) - \rho_{e,b}(t) - \rho_{e,a}(t) = \rho'(t) \\ M_{e,b}(t+1) - M_{e,a}(t+1) + M_{e,b}(t) - M_{e,a}(t) = \\ M'(t) \\ \rho'(t) A_e L_e + M'(t) \Delta t = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} M_{e,b}(t+1)+M_{e,a}(t+1)-M_{e,b}(t)- \\ M_{e,a}(t)=M''(t) \\ M_{e,b}(t+1)+M_{e,a}(t+1)+M_{e,b}(t+1)+ \\ M_{e,a}(t)=M'''(t) \\ p_{e,b}(t+1)-p_{e,a}(t+1)+p_{e,b}(t)- \\ p_{e,a}(t)=p'(t) \\ 4M''(t)L_e d_e + 4p'(t)A_e d_e \Delta t + \\ M''(t)\lambda' L_e \bar{\omega}_e \Delta t = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $e \in S_E$ 为天然气管道, S_E 为连接到节点 E 的管道集合; M 为天然气质量流量 (mass flow rate, MFR); ρ 为天然气密度; p 为管道压强; A, d, L 分别为天然气管道的截面积、直径和长度; λ' 为阻尼因子; c 为温度因子; $M_{e,a}$ 和 $M_{e,b}$ 分别为管道 e 首端和末端的 MFR; $\rho_{e,a}$ 和 $\rho_{e,b}$ 分别为管道 e 首端和末端的天然气密度; $p_{e,a}$ 和 $p_{e,b}$ 分别为管道 e 首端和末端的管道压强; A_e, d_e, L_e 分别为管道 e 的截面积、直径和长度; ω_e 为管道 e 的天然气流速; Δt 和 x 分别为时间间隔和空间间隔; ρ', M', M'', M''' 为差分方程组中的辅助变量。

另外, 天然气网络的边界条件还包括: 式(12)为节点负荷约束、式(13)为供气节点的压强密度约束、式(14)为节点 MFR 约束、式(15)~式(18)为管道天然气 MFR 和压强上下限约束。

$$M_{e,b}(t) = M_{e,1}(t) \quad (12)$$

$$\begin{cases} \rho_{e,a}(t) = \rho_0 \\ p_{e,a}(t) = p_0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\frac{M_{1,a}(t)}{A_1} + \frac{M_{2,a}(t)}{A_2} + \dots + \frac{M_{e,a}(t)}{A_e} = 0 \quad (14)$$

$$M_{\min} \leq M_{e,a}(t), M_{e,a}(t) \leq M_{\max} \quad (15)$$

$$M_{\min} \leq M_{e,b}(t), M_{e,b}(t) \leq M_{\max} \quad (16)$$

$$p_{\min} \leq p_{e,a}(t), p_{e,a}(t) \leq p_{\max} \quad (17)$$

$$p_{\min} \leq p_{e,b}(t), p_{e,b}(t) \leq p_{\max} \quad (18)$$

式中: $M_{e,1}$ 为管道 e 末端的 MFR; ρ_0 和 p_0 分别为天然气供应节点的密度和压力; M_{\max} 和 M_{\min} 分别为天然气管道 MFR 上下限; p_{\max} 和 p_{\min} 分别为天然气管道的压力上下限。

1.4 热网模型

在供热网络中热量由水流作为介质传递, 由于缺乏水流的控制装置, 大部分的供热网络的管道水流是恒定的。因此在热网模型中, 管道水流的 MFR 是恒定的, 从而简化了管道网络模型, 移除了模型中的关于水流量的非线性项^[23]。

如附录 A 图 A2(b) 所示为单个供热管道, 供热

管道中热量传递, 包括热量损失和时间滞后, 可以通过微分方程描述为^[24-25]:

$$\frac{\partial T_{k,t}^x}{\partial t} + \frac{G_{k,t}^x}{\pi \rho_w R_k^2} \frac{\partial T_{k,t}^x}{\partial x} + \frac{2\mu_k}{c_w \rho_w R_k} (T_{k,t}^x - T_{k,t}^{\text{soil}}) = 0 \quad (19)$$

式中: $T_{k,t}^x$ 为管道 k 在 t 时刻距离入水口距离 x 处的水温; $G_{k,t}^x$ 为管道 k 在 t 时刻的水流流量; μ_k 为热损失因子; c_w 和 ρ_w 分别为水的比热容和密度; R_k 为供热管道半径; $T_{k,t}^{\text{soil}}$ 为管道 k 外部在 t 时刻的土壤温度。

微分方程(19)的解为^[25-26]:

$$T_{k,t+\Delta\tau_k}^{\text{out}} = T_{k,t}^{\text{soil}} + (T_{k,t}^{\text{in}} - T_{k,t}^{\text{soil}}) \exp\left(-\frac{2\mu_k \Delta\tau_k}{c_w \rho_w R_k}\right) \quad (20)$$

式中: $T_{k,t}^{\text{in}}$ 和 $T_{k,t+\Delta\tau_k}^{\text{out}}$ 分别为管道 k 在 t 时刻下入水口和 $t+\Delta\tau_k$ 时刻下水出水的温度; $\Delta\tau_k$ 为水流经过管道 k 的时间。

因为管道水流量是常数, $\Delta\tau_k$ 可以表示为:

$$\Delta\tau_k = \frac{\pi \rho_w L_k R_k^2}{G_k} \quad (21)$$

式中: L_k 为供热管道长度; G_k 为管道 k 的水流流量。

因此, $\Delta\tau_k$ 可以通过辅助变量 δ_k 进行处理:

$$T_{k,t+\delta_k}^{\text{out}} = T_{k,t}^{\text{soil}} + (T_{k,t}^x - T_{k,t}^{\text{soil}}) \exp\left(-\frac{2\mu_{p,k} \delta_k \Delta t}{c_w \rho_w R_k}\right) \quad (22)$$

$$\delta_k = \text{round}\left(\frac{\Delta\tau_k}{\Delta t}\right) \quad (23)$$

一般, $\Delta\tau_k$ 为 Δt 的整数倍。

另外, 供热网路模型还应包括: 供水、回水网络水流热功率和水温的关系为式(24)和式(25); 供水、回水网络中水温上下限约束为式(26)和式(27); 回水网络节点水流汇合后的水温方程为式(28)。

$$q_{k,t}^{\text{in}} = c_w G_k T_{k,t}^{\text{in}} \quad (24)$$

$$q_{k,t}^{\text{out}} = c_w G_k T_{k,t}^{\text{out}} \quad (25)$$

$$\begin{cases} T_s^{\min} \leq T_{k,t}^{\text{in}} \\ T_{k,t}^{\text{in}} \leq T_s^{\max} \\ T_s^{\min} \leq T_{k,t}^{\text{out}} \\ T_{k,t}^{\text{in}} \leq T_s^{\max} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} T_r^{\min} \leq T_{k,t}^{\text{in}} \\ T_{k,t}^{\text{in}} \leq T_r^{\max} \\ T_r^{\min} \leq T_{k,t}^{\text{out}} \\ T_{k,t}^{\text{out}} \leq T_r^{\max} \end{cases} \quad (27)$$

$$\sum_{k \in S_{\text{pipe.out},K}} (c_w G_k T_{k,t}^{\text{out}}) = c_w T_{\text{mix},K} \sum_{k \in S_{\text{pipe.out},K}} G_k \quad (28)$$

式中: $q_{k,t}^{\text{in}}$ 和 $q_{k,t}^{\text{out}}$ 分别为管道 k 在 $T_{k,t}^{\text{in}}$ 和 $T_{k,t}^{\text{out}}$ 温度下的水流热功率; T_s^{max} 和 T_s^{min} 分别为供水网络中管道水流温度上下限; T_r^{max} 和 T_r^{min} 分别为回水网络中管道水流温度上下限; $S_{\text{pipe.out},K}$ 为连接热网络节点 K 的管道集合; $T_{\text{mix},K}$ 为回水网络中水流汇合后的温度。

1.5 目标函数

基于建立的电-气-热混联系统运行模型,本节建立了电-气-热混联系统的经济模型,目标函数即最小化系统的运行成本 C 表达式为:

$$C = C_{\text{gas}} + C_{\text{in}} - C_{\text{out}} + C_{\text{heat}} \quad (29)$$

$$C_{\text{in}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{in}} P_{\text{in}}(t) \quad (30)$$

$$C_{\text{out}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{out}} P_{\text{out}}(t) \quad (31)$$

式中: C_{gas} 为购气费用; C_{in} 为购电成本; C_{out} 为售电收益; C_{heat} 为系统供热成本; c_{in} 和 c_{out} 分别为配电网购电电价和售电电价; $P_{\text{in}}(t)$ 和 $P_{\text{out}}(t)$ 分别为配电网向主电网传输的有功功率和主电网向配电网传输的有功功率。

系统供热成本为除 CHP 单元外的热源供热成本,可通过热源发出热量、发热效率、燃料热值、燃料价格求得^[4]。电-气-热混联系统日前调度模型为:

$$\begin{cases} \min C = C_{\text{gas}} + C_{\text{in}} - C_{\text{out}} + C_{\text{heat}} \\ \text{s. t.} \quad \text{式(1)一(28)} \end{cases} \quad (32)$$

2 电-气-热混联系统调度

对于电-气-热混联系统来说,联合优化调度能够得到整个系统的最优调度方案。但由于各个子系统间信息传递等方面的阻碍,使得系统的联合优化调度难以实现。因此,需要采用分布式算法,在考虑系统信息等各方面阻碍的情况下,得到系统的最优调度方案。

2.1 ADMM-GBS 算法

ADMM 算法将一个完整的问题分解成相对独立的几部分,各个部分即 ADMM 算法的算子。该算法非常适合解决分布式优化问题,尤其适用于解决大规模分布式优化问题。而且,在大多数情况下,ADMM 算法能够有效地求解问题^[27]。然而,针对本文中的电-气-热系统,需要根据两算子的标准 ADMM 算法得到 ADMM 三算子算法的直接推广形式,但 3 个算子的直接推广形式不能保证算法的收敛性^[28]。因此,本文采用了 ADMM-GBS 算法对

系统进行优化求解,该算法在 3 个算子直接推广形式的基础上增加了变量的校正环节,保证了算法的收敛性^[28]。

$$\begin{cases} \min \theta_1(x) + \theta_2(y) + \theta_3(z) \\ \text{s. t.} \quad Ax + By + Cz = b \end{cases} \quad (33)$$

$$L_{\beta}^3(x, y, z, \lambda) = \theta_1(x) + \theta_2(y) + \theta_3(z) -$$

$$\lambda(Ax + By + Cz - b) + \frac{\eta}{2} \|Ax + By + Cz - b\|_2^2 \quad (34)$$

式中: x, y, z 为可分离算子; A, B, C 为参数; $\theta_1(x), \theta_2(y)$ 和 $\theta_3(z)$ 分别为 3 个算子的目标函数; $L_{\beta}^3(x, y, z, \lambda)$ 为引入 Lagrange 乘子 λ 和惩罚因子 η 的增广 Lagrange 函数。

式(33)为含有 3 个可分离算子 x, y, z 的凸优化问题。其中, $Ax + By + Cz = b$ 为 3 个算子的线性约束。由此,ADMM 三算子算法的直接推广形式可以如式(35)表示,通过第 k 次迭代的给定的 y^k, z^k 和 λ^k 开始,由式(35)的迭代形式可得 $(y^{k+1}, z^{k+1}, \lambda^{k+1})$ 并进入下一次迭代。其中, x^{k+1} 是由 (y^k, z^k) 通过计算得到的,是中间变量,而剩余的 (y^k, z^k, λ^k) 为算法中的核心变量。

$$\begin{cases} x^{k+1} = \arg\min L_{\beta}^3(x, y^k, z^k, \lambda^k) \\ y^{k+1} = \arg\min L_{\beta}^3(x^{k+1}, y, z^k, \lambda^k) \\ z^{k+1} = \arg\min L_{\beta}^3(x^{k+1}, y^{k+1}, z, \lambda^k) \\ \lambda^{k+1} = \lambda^k - \eta(Ax^{k+1} + By^{k+1} + Cz^{k+1} - b) \end{cases} \quad (35)$$

$$\begin{cases} x^{k+1} = \arg\min L_{\beta}^3(x, y^k, z^k, \lambda^k) \\ (y^{k+1}, z^{k+1}) = \arg\min L_{\beta}^3(x^{k+1}, y, z, \lambda^k) \\ \lambda^{k+1} = \lambda^k - \eta(Ax^{k+1} + By^{k+1} + Cz^{k+1} - b) \end{cases} \quad (36)$$

式(36)为标准 ADMM 算法下迭代形式, (y^k, z^k) 没有分离(即没有考虑 y 和 z 间的信息阻碍),该迭代形式是收敛的。其中,核心变量的原始部分 (y, z) 和对偶部分 λ 是对等的,并且 y 和 z 是对等的。ADMM 三算子算法的直接推广形式则不同:在求解 y 问题时,只能用 (x^{k+1}, y^k, z^k) 的信息, y^k 尚未更新;在求解 z 问题时,使用 (x^{k+1}, y^{k+1}, z^k) 的信息,即 y 和 z 不再是对等的,这可能导致算法不能收敛。因此,在更新 y^{k+1}, z^{k+1} 后进行如下校正:

$$\begin{bmatrix} By^{k+1} \\ Cz^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} By^k \\ Cz^k \end{bmatrix} - v \begin{bmatrix} I & -I \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B(y^k - y^{k+1}) \\ C(z^k - z^{k+1}) \end{bmatrix} \quad (37)$$

式中: v 为校正因子,取值范围为 $[0.9, 0.95]$; I 为参数。

ADMM 三算子算法的直接推广形式添加校正环节,即 ADMM-GBS 算法已被证明是收敛的^[29]。

2.2 基于 ADMM-GBS 算法的调度方法

基于上述算法,本文建立了基于 ADMM-GBS 算法的优化调度方法,对包含 3 个子系统的 IES 进行优化求解,首先,根据 ADMM-GBS 算法建立电-气-热系统的增广 Lagrange 函数,并分解为电力、天然气、供热这 3 个子问题后进行迭代求解。

$$L = C_{\text{gas}} + C_{\text{in}} - C_{\text{out}} + C_{\text{heat}} + \sum_{t=1}^T (P_{p,r}(t) - P_{\text{MT}}(t)) + \sum_{t=1}^T (P_{p,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))^2 + \sum_{t=1}^T (P_{g,r}(t) - P_{\text{MT}}(t)) + \sum_{t=1}^T (P_{g,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))^2 + \sum_{t=1}^T (P_{h,r}(t) - P_{\text{MT}}(t)) + \sum_{t=1}^T (P_{h,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))^2 \quad (38)$$

式中: P_{MT} 为表示 MT 功率的全局变量; $P_{p,r}$, $P_{g,r}$ 和 $P_{h,r}$ 分别为供电、供热、供气子系统中对应于全局变量的第 r 次迭代后的局部变量。

式(38)为电-气-热系统的增广 Lagrange 函数,分别基于式(35)中 x^{k+1} , y^{k+1} , z^{k+1} 的求解形式,可以分解为如下 3 个优化子问题。

1) 电力子问题

$$\min_{P_{p,r}} L_1 = C_{\text{in}} - C_{\text{out}} + \sum_{t=1}^T [\lambda_{1,r}(t)(P_{p,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))] + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{p,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))^2 \quad (39)$$

式中: $\lambda_{1,r}$ 为对应电力子问题的 Lagrange 乘子。

2) 天然气子问题

$$\min_{P_{g,r}} L_2 = C_{\text{gas}} + \sum_{t=1}^T [\lambda_{2,r}(t)(P_{g,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))] + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{g,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))^2 \quad (40)$$

式中: $\lambda_{2,r}$ 为对应天然气子问题的 Lagrange 乘子。

3) 供热子问题

$$\min_{P_{h,r}} L_3 = C_{\text{heat}} + \sum_{t=1}^T [\lambda_{3,r}(t)(P_{h,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))] + \sum_{t=1}^T \frac{\eta}{2} (P_{h,r}(t) - P_{\text{MT}}(t))^2 \quad (41)$$

式中: $\lambda_{3,r}$ 为对应供热子问题的 Lagrange 乘子。

具体的求解流程如下:

步骤 1: 初始化全局变量 $P_{\text{MT}} = 0$, 局部变量 $P_{h,0} = 0$, Lagrange 乘子 $\lambda_{1,r} = \lambda_0$, $\lambda_{2,r} = \lambda_0$, $\lambda_{3,r} = \lambda_0$, λ_0 为初始值, 迭代次数 $r = 0$ 。

步骤 2: 令 $P_{\text{MT}} = P_{h,r}$, 代入电力子问题, 即式(39)求解得 $P_{p,r+1}$ 。

步骤 3: 令 $P_{\text{MT}} = P_{p,r+1}$, 代入天然气子问题, 即式(40)求解得 $P_{g,r+1}$ 。

步骤 4: 令 $P_{\text{MT}} = P_{g,r+1}$, 代入供热子问题, 即式(41)求解得 $P_{h,r+1}$ 。

步骤 5: 根据式(42)一式(44)更新 Lagrange 乘子 $\lambda_{1,r}$, $\lambda_{2,r}$ 和 $\lambda_{3,r}$, 并根据式(45)校正 $P_{g,r+1}$ 和 $P_{h,r+1}$ 。

步骤 6: 通过式(46)计算 r 次迭代中的最大偏差 ϵ , 验证最大偏差是否小于允许偏差, 满足条件结束迭代, 否则更新迭代次数 r 并回到步骤 2 继续迭代计算。

$$\lambda_{1,r+1}(t) = \lambda_{1,r}(t) + \eta(P_{p,r+1}(t) - P_{h,r}(t)) \quad (42)$$

$$\lambda_{2,r+1}(t) = \lambda_{2,r}(t) + \eta(P_{g,r+1}(t) - P_{p,r+1}(t)) \quad (43)$$

$$\lambda_{3,r+1}(t) = \lambda_{3,r}(t) + \eta(P_{h,r+1}(t) - P_{g,r+1}(t)) \quad (44)$$

$$\begin{cases} P_{g,r+1}(t) = P_{p,r}(t) - v[(P_{g,r}(t) - P_{g,r+1}(t)) - (P_{h,r}(t) - P_{h,r}(t))] \\ P_{h,r+1}(t) = P_{p,r}(t) - v(P_{h,r}(t) - P_{h,r+1}(t)) \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} \epsilon = \max\{x_r, y_r, z_r\} \\ x_r = \max | P_{p,r}(t) - P_{h,r}(t) | \\ y_r = \max | P_{g,r}(t) - P_{p,r}(t) | \\ z_r = \max | P_{h,r}(t) - P_{g,r}(t) | \\ x_{t,r} = \sum_{t=1}^{24} | P_{h,r}(t) - P_{g,r}(t) | \end{cases} \quad (46)$$

式中: $t = 1, 2, \dots, 24$; x_r , y_r 和 z_r 分别为第 r 次迭代中各子系统局部变量的最大偏差绝对值; $x_{t,r}$ 为第 r 次迭代中局部变量 $P_{g,r}$ 和 $P_{h,r}$ 的总偏差。

3 算例分析

基于本文提出的电-气-热混联系统的日前调度模型和求解算法,在算例系统中进行仿真分析。算例系统见附录 A 图 A3,由 IEEE 33 节点辐射型配电网、6 节点天然气传输网络和 50 节点的供热网络构成,并由 2 个 CHP 单元连接(分别由 2 台、4 台额定功率为 500 kW 的 MT 和余热锅炉组成)。算例系统中有功负荷、无功负荷和热负荷见附录 A 图 A4,配电网售电、购电电价见附录 A 表 A1。上述的问题是一个二次规划问题,本文通过 YALMIP 工具箱进行建模,并通过 Gurobi8.0.0 求解上述的二次

规划问题。

3.1 算例分析

算例系统的各子系统成本:电力子系统为-13 679元,天然气子系统为2 478元,供热子系统为457 710元。由于在算例系统中电、热负荷均是固定的,所以在经济模型中没有考虑这部分固定的收益。电力子系统通过公共耦合节点(point of common coupling, PCC)将分布式电源发出的功率传输到主电网,以获得额外的利益。供热子系统的热源包括CHP单元和外部热源,因此,CHP单元出力的变化将影响天然气子系统和供热子系统的成本。

图2为PCC节点功率和CHP单元功率,由于00:00—08:00之间(不包括02:00)风机输出功率处于较高的水平,配电网向主电网传输的功率处于较高的水平。但因为该时段的电价较低,因此,CHP单元的功率较低,在02:00时,风机功率突然降低,导致CHP单元功率必须提高以满足电负荷。在电价较高的11:00—15:00和18:00—21:00这2个时段,CHP单元功率很高,使尽量多的功率传输到主电网以获得更多收益。风机和光伏的功率在23:00时很低,不同于02:00,该时刻的电负荷处于较高的水平,CHP单元发出的功率不能满足负荷的需求,因此,配电网从主电网吸收功率与CHP单元共同满足电负荷,导致PCC节点功率在23:00时从主电网传输到配电网。

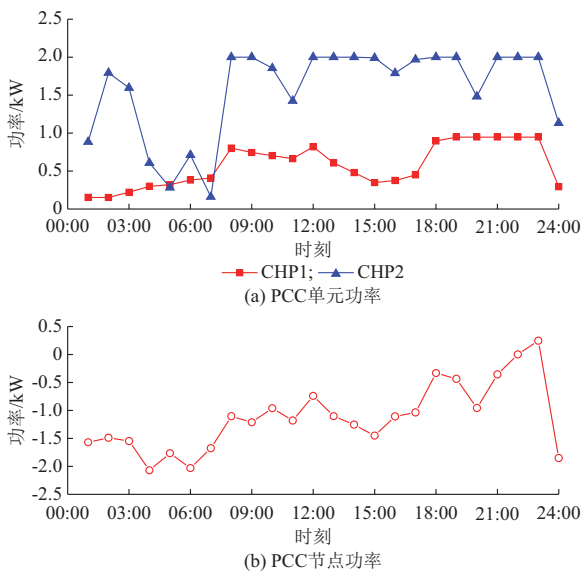


图2 CHP和PCC功率
Fig. 2 Power of CHP units and PCC

P15, P16和P18首端的水温变化,由于上述管道长度差距不大,因此管道水温变化的滞后时间均近似为1h。在02:00时,仅靠水流自身的热量可以满足热负荷的需求,同时,外部热源和CHP在该时刻产生的热量均较低,因此,供热管道P3的温度下降幅度较大。图3(b)为天然气网络各个节点的MFR,近距离输气管道的距离较短、压力较低,因此同一管道首末节点(管道P1首节点M1和末节点M2)的MFR变化较小。M10和M12节点连接到2个CHP单元,即M10和M12节点的天然气负荷是CHP单元的耗气量。1 Mbtu/h \approx 28.3 m³/h。

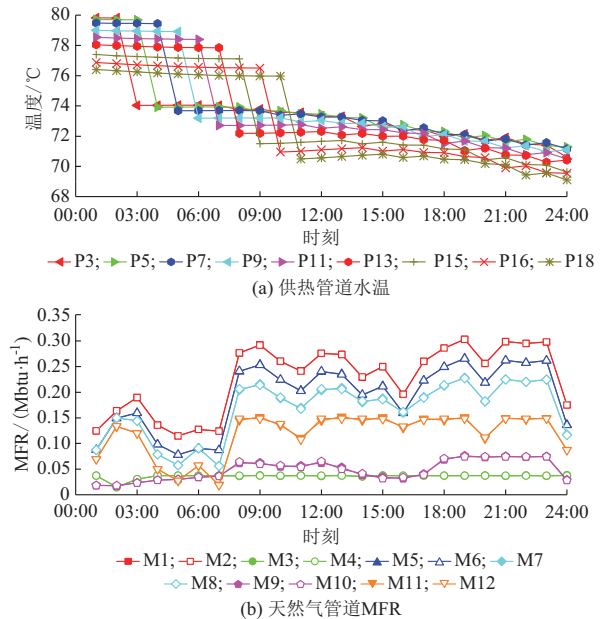


图3 天然气管道MFR及供热管道水温曲线
Fig. 3 MFR curves of natural gas pipelines and temperature curves of heat supplying pipelines

3.2 收敛性分析

为了验证本文所采用算法可以收敛到全局最优解,将算例系统在统一优化下的求解结果与在ADMM-GBS算法下的结果进行对比。图4(a)和图4(b)为迭代过程中局部变量之间的最大偏差,图4(c)为在ADMM-GBS算法下系统目标函数的收敛过程。由图4(a)和图4(b)可知,当迭代次数为30次时,系统目标函数已经收敛,总偏差 x_0 。同样达到较低的水平,但是 x_r, y_r, z_r 较大,直到迭代次数为51次时,偏差 x_r, y_r, z_r 达到收敛标准。因此,本文采用的ADMM-GBS算法可以在一定的误差要求和有限的迭代次数内收敛到系统全局最优解,有效地解决了不同子系统之间信息等各方面阻碍。

图3(a)为供热管道P3, P5, P7, P9, P11, P13,

参考文献

- [1] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207. .
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [2] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报,2016,31(1):1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [3] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):113-120. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
- [4] 王珺,顾伟,陆帅,等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24.
- [5] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1315.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1315.
- [6] LINNA N I, LIU W, WEN F, et al. Optimal operation of electricity, natural gas and heat systems considering integrated demand responses and diversified storage devices[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 423-437.
- [7] 宋晨辉,冯健,杨东升,等. 考虑系统耦合性的综合能源协同优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(10):38-46. DOI: 10.7500/AEPS20170914008.
SONG Chenhui, FENG Jian, YANG Dongsheng, et al. Collaborative optimization of integrated energy considering system coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 38-46. DOI: 10.7500/AEPS20170914008.
- [8] 罗艳红,梁佳丽,杨东升,等. 计及可靠性的电-气-热能量枢纽配置与运行优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):47-54. DOI: 10.7500/AEPS20170831002.
LUO Yanhong, LIANG Jiali, YANG Dongsheng, et al. Configuration and operation optimization of electricity-gas-heat energy hub considering reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 47-54. DOI: 10.7500/AEPS20170831002.
- [9] 李杨,刘伟佳,赵俊华,等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术,2016,40(12):3680-3688.
LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch

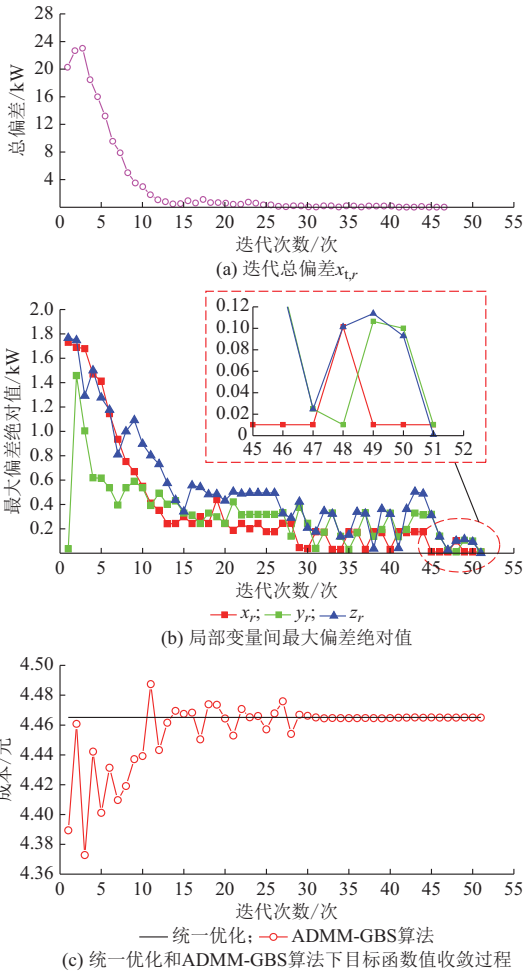


图4 迭代过程中最大偏差和目标函数收敛过程
Fig.4 Maximum deviation during iterations and objective function convergence process

4 结语

建立了电-气-热混联系统的日前调度模型,包括电、气、热网络模型和 CHP 单元模型,并基于 ADMM-GBS 算法提出了日前调度方法。算例系统验证了基于 ADMM-GBS 算法的日前调度框架的有效性,在考虑子系统间信息等各方面阻碍的情况下,通过优化求得电-气-热混联系统的最优调度方案。

由于光伏、风机以及负荷的波动,实际的光伏、风机的出力和负荷可能与日前预测数据有一定偏差,从而影响系统日前优化调度效果;另外,时空仿真步长对于模型精确度、优化模型规模也有较大影响,模型规模也会在一定程度上影响算法收敛性,因此考虑多时间尺度的协调调度、时空仿真步长对算法和模型的影响将是下一步的研究方向。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

- of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3680-3688.
- [10] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [11] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(24): 7108-7120.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Energy flow optimization analysis of regional power-natural gas-heat integrated energy system considering operation constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(24): 7108-7120.
- [12] 梅建春,卫志农,张勇,等. 电-气互联综合能源系统多时间尺度动态优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(13): 36-42. DOI: 10.7500/AEPS20170823002.
MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Dynamic optimal dispatch with multiple time scale in integrated power and gas energy systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 36-42. DOI: 10.7500/AEPS20170823002.
- [13] 潘振宁,王克英,瞿凯平,等. 考虑大量EV接入的电-气-热多能耦合系统协同优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 104-112. DOI: 10.7500/AEPS20170527007.
PAN Zhenning, WANG Keying, QU Kaiping, et al. Coordinated optimal dispatch of electricity-gas-heat multi-energy system considering high penetration of electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 104-112. DOI: 10.7500/AEPS20170527007.
- [14] 秦婷,刘怀东,王锦桥,等. 基于碳交易的电-热-气综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 8-22. DOI: 10.7500/AEPS20171220005.
QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Coalition game based optimized operation method for integrated energy systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 8-22. DOI: 10.7500/AEPS20171220005.
- [15] HE Chuan, WU Lei, LIU Tianqi, et al. Robust co-optimization scheduling of electricity and natural gas systems via ADMM[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(2): 658-670.
- [16] CHEN Jian, ZHANG Weitong, ZHANG Yicheng, et al. Day-ahead scheduling of distribution level integrated electricity and natural gas system based on fast-ADMM with restart algorithm [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 17557-17569.
- [17] ZHANG Xiaping, SHAHIDEHPOUE M, ALABDULWAHAB A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 31(1): 592-601.
- [18] BARAN M, WU Felix. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [19] YEH H, GAYME D, LOW S. Adaptive VAR control for distribution circuits with photovoltaic generators[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2012, 27(3): 1656-1663.
- [20] OSIADACZ A. Simulation and analysis of gas network[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1987.
- [21] FLETCHER C. Computational techniques for fluid dynamics: specific techniques for different flow categories: 1[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [22] FANG Jiakun, ZENG Qing, AI Xiaomeng, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 188-198.
- [23] LI Ping, WANG Haixia, LV Quan, et al. Combined heat and power dispatch considering heat storage of both buildings and pipelines in district heating system for wind power integration [J]. *Energies*, 2017, 10(7): 893.
- [24] LI Zhigang, WU Wenchuan, SHAHIDEHPOUE M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 7(1): 12-22.
- [25] SANDOU G, FONT S, TEBBANI S, et al. Predictive control of a complex district heating network[C]// *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, December 12-15, 2005, Seville, Spain.
- [26] ARVASTSSON L. Stochastic modeling and operational optimization in district heating systems[J]. *Doctoral Theses in Mathematical Sciences*, 2001, 3(6): 200-210.
- [27] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. *Foundations & Trends in Machine Learning*, 2011, 3(1): 1-12.
- [28] CHEN Caihua, HE Bingsheng, YE Yinyun, et al. The direct extension of ADMM for multi-block convex minimization problems is not necessarily convergent[J]. *Mathematical Programming*, 2016, 155(2): 57-79
- [29] 何炳生. 修正乘子交替方向法求解三个可分离算子的凸优化[J]. *运筹学学报*, 2015, 19(3): 57-70.
HE Bingsheng. Modified alternating directions method of multipliers for convex optimization with three separable functions [J]. *Operations Research Transactions*, 2015, 19(3): 57-70.

陈健(1986—),男,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:分布式发电和微网技术。E-mail: ejchen@sdu.edu.cn

张维桐(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统优化调度。E-mail: zhangweitong_zy@163.com

林达(1989—),男,博士,工程师,主要研究方向:综合能源系统优化调度。E-mail: ld2009ee@163.com

(编辑 杨松迎)

Distributed Optimal Dispatch of Integrated Electricity-Gas-Heating System Based on Improved Alternative Direction Multiplier Method

CHEN Jian¹, ZHANG Weitong¹, LIN Da², LI Zhihao², SONG Guanyu³, GU Yifeng⁴

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of the Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd., Hangzhou 310014, China;

3. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

4. State Grid Shaoxing Shangyu Power Supply Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: With the more access of microturbines or combined heat and power units to distribution network, the coupling relationship and joint optimization among power systems, natural gas systems and heating systems attach more and more attention. Aiming at the day-ahead dispatch problem of integrated electricity-gas-heat system, a day-ahead dispatch model minimizing the economic cost is established. The model including the distribution network, the heat-supplying network and the natural gas network model with the consideration of the dynamic characteristics of natural gas has been established. In addition, considering the opaque characteristics of information, management, and capital between integrated electricity-gas-heat system, a day-ahead dispatch optimization method is proposed based on improved alternative direction multiplier method (ADMM), i. e. ADMM with Gaussian back substitution algorithm. Finally, the validity of the proposed model and optimization framework is verified by case study.

This work is supported by Taishan Scholars Specialist Sponsored Project and State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd. (No. 5211DS17001D).

Key words: integrated electricity-gas-heat system; day-ahead dispatch; combined heat and power; distributed optimization