

综合能源互联的主动配电网分布式协调控制方法

王亚军¹, 倪玮强², 张 焱², 贾亚飞³, 孙梦雪³, 吴冠男⁴

(1.国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021; 2.国网河北省电力有限公司沧州供电公司, 河北 沧州 061001; 3.国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司, 河北 雄安 071600; 4.清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 随着新型电力系统建设的发展,多种能源以集群、网络的形式并入配电网,使配电网呈现主动特性。充分发挥多能源之间的关联互补特性,能够在减缓配电网不确定性的同时为需求侧提供充分的电、热、气、冷、暖等需求。针对现有分布式协调控制方法仅考虑气网、热网及电力网络,而没有考虑氢能源网络,文章给出主动配电网、热网、天然气网和氢能源网的综合能源互联的分布式协调控制方法。首先,建立了以运行成本为最小的经济目标,并给出了各个网络的约束条件;其次,提出主动配电网、热网、天然气网和氢能源网采用分层控制策略,采用改进的一致性算法和粒子群优化方法进行求解对比;最后,给出某实际电网仿真算例。算例结果表明,分布式综合能源互联调度控制方法能够得到与传统方法相同的结果,并验证了所提调度控制策略的有效性。

关键词: 综合能源系统; 主动配电网; 分布式; 控制

中图分类号: TK81; TK51; TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)05-0703-08

0 引言

在 2030 实现“碳达峰”及 2060 年实现“碳中和”目标驱使下,大力发展新能源发电并网技术,并以此推动新型电力系统建设发展是实现“双碳”目标的重要途径^[1,2]。然而,风力发电、光伏发电以及氢能源发电等单一新能源发电功率不稳定、随机性和波动性特征明显,尤其在高比例新能源并入新型电力系统中更加明显。以多能源互补、灵活“即插即用”为关键技术的综合能源系统为解决单一可再生能源的不稳定性和波动性,对保障电力系统安全稳定运行、提高电能质量安全水平起到重要的支撑作用^[3,4]。

目前国内外关于综合能源互联系统的研究主要以电、热、气网络互联为核心,通过研究三者的相互关联、协调实现调度和控制。文献[5-7]针对地区级别的综合能源系统中电、热、气波动性及不稳定性问题,提出了电、热、气的模型预测控制方法,关联矩阵控制方法和信息空隙约束方法的优化控制方法。文献[8,9]针对微电网中的可再生能源和负荷的不确定性,提出了与多综合能源系统微电网之间非对称纳什博弈、纳什谈判博弈协调的控制方法。文献[10,11]针对综合能源系统中产生

的碳排放,提出了考虑碳捕集及电网、气网耦合控制的协同优化控制模型。文献[12,13]针对电-气-热综合能源系统多目标优化调度难以量质协同优化且求解时间较长的问题,提出了考虑焓效率的电源侧、负荷侧协同的加权线性求解方法。文献[14-16]针对电-冷-热综合能源系统中的间接碳排放不确定性问题,提出碳排放交易机制以及列和约束生成算法的两阶段鲁棒优化模型。文献[17,18]针对电网、气网及氢能源季节性变化特点,提出了电-气-氢混合优化调度模型,并采用逐次二阶锥松弛进行求解。

综上所述,目前针对综合能源互联系统中的电网、气网、热网等单独特性已经提出了较多的研究方法,这些方法主要以集中式优化建模和求解为主,而对于电-热-气-氢之间的关联互补特性及其分布式协同控制方法的研究较少。对此,本文提出了考虑电网、气网、热网及氢能源互联控制的分布式方法。首先,建立了以运行成本为最小的经济目标,并给出了各个网络的约束条件;其次,提出主动配电网、热网、天然气网和氢能源网采用分层控制策略,采用改进的一致性算法和粒子群优化方法进行求解对比;最后,给出某实际电网仿真

收稿日期: 2024-07-15。

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目(5204BB200029)。

作者简介: 王亚军(1981-),男,硕士,正高级工程师,研究方向为电网调度自动化。E-mail:wangyajun398@126.com

算例。

1 综合能源互联系统建模

本文所提的综合能源互联系统包含了主动配电网系统、热力系统、天然气系统、氢能源系统 4 个部分,以此实现协调经济调度和控制。

1.1 主动配电网安全运行的潮流模型

主动配电网正常运行条件下,必须满足其发电与负荷平衡,即交流潮流运行模型。对于任意节点 i 注入的有功 P_i 和无功 Q_i 可以表示为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为系统独立节点总数; U_i, U_j 分别为节点 i, j 的电压幅值; G_{ij} 为电导元素; B_{ij} 为电纳元素; δ_i, δ_j 分别为节点 i, j 的电压相位。

式(1)中的相位和电压应满足安全稳定约束。

1.2 热网系统运行模型

热网系统通过加热水,在换热管内实现负荷端供热,系统结构如图 1 所示。

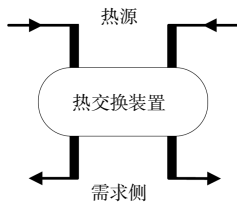


图 1 热网系统结构图

Fig.1 Structural diagram of heating network system

假设不考虑热网系统中的渗漏、损失,那么在热交换装置中的热水压力变化方程为

$$\Delta P = 6.88 \times 10^{-9} \frac{f^{0.25}}{d^{5.25}} (l + l_d) \rho G^2 \quad (2)$$

式中: ΔP 为热水通过热交换后的压力降向量; f, d, l, ρ 分别为热水流过管道的平滑度系数、直径、长度、材质密度; l_d 为管道直径为 d 的管道长度; G 为热水管道的流量。

式(2)中的 G 和 ΔP 应满足一定的上、下限安全约束。

在图 1 所示的热网系统中,根据能量守恒定律,可得到热水交换的能量平衡计算式为

$$\begin{cases} G_0 = E \cdot G \\ 0 = \Gamma \cdot \Delta P \end{cases} \quad (3)$$

式中: G_0 为热水管道流入的流量; E 为变换矩

阵,即流入热水管道之间的系数矩阵; Γ 为热网系统中的回路矩阵系数。

1.3 天然气系统运行模型

天然气系统安全运行时,不考虑管网天然气泄漏和损耗,那么天然气在管网中的流量平衡方程为

$$\sum_{w \in G_w} F_{s,w,t}^S - \sum_{e \in G_e} F_{s,e,t}^D - \sum_{v \in G_v} F_{s,v,t}^G = \sum_{n \in G_n} F_{s,mn,t} + \sum_{k \in G_k} (1 + \xi_{s,k}) F_{s,k,t}^C \quad (4)$$

式中: G_w 为天然气系统中注入的天然气节点集合; G_e 为天然气系统中的负荷节点集合; G_v 为天然气系统中的燃气机组集合; G_n 为天然气系统中的节点集合; G_k 为天然气系统中注入的压力厂站集合; $F_{s,w,t}^S$ 为天然气源 w 在 t 时刻系统运行方式 s 下的有功出力; $F_{s,e,t}^D$ 为在 t 时刻天然气负荷 e 在运行方式 s 下的有功需求; $F_{s,v,t}^G$ 为天然气发电机 v 在 t 时刻运行方式 s 下需要的天然气量; $F_{s,mn,t}$ 为在 t 时刻运行方式 s 下天然气管网按照 mn 方向的天然气流量; $F_{s,k,t}^C$ 为在 t 时刻运行方式 s 下压力厂站 k 内部损耗的流量与输出的总流量的比例; m 和 n 均为天然气系统中的节点。

在式(4)中,还要考虑天然气管网中的总量与输出量之间的关系:

$$\begin{cases} F_{s,mn,t} - F_{s,mn,t-1} = E_{s,mn,t} - E_{s,mn,t-1} \\ \frac{F_{s,mn,t} + F_{s,nm,t}}{2} = \kappa_{s,m,t}^2 - \kappa_{s,n,t}^2 \\ E_{s,mn,t} = \frac{K_{mn}(\kappa_{s,m,t} + \kappa_{s,n,t})}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $E_{s,mn,t}, E_{s,mn,t-1}$ 分别为在 $t, t-1$ 时刻运行方式 s 下的天然气管网 mn 中的总流量; $\kappa_{s,m,t}, \kappa_{s,n,t}$ 分别为运行方式 s 下节点 m, n 上的天然气压力; W_{mn} 为天然气管网中的韦茅斯系数; K_{mn} 为天然气冲击系数。

式(4),(5)中的 $F_{s,w,t}^S, F_{s,v,t}^G, F_{s,k,t}^C, F_{s,mn,t}, E_{s,mn,t}, E_{s,mn,t-1}$ 应满足各自安全上、下限约束。

1.4 氢能源网络运行模型

氢能源系统整体包含了若干个核心部分,主

要由氢能源生产、氢能源储存及氢能源需求 3 个方面构成,下面分别给出这 3 个方面的运行模型。

1.4.1 氢能源生产模型

目前采用多种能源来驱动氢能源生产,主要有天然气、风力发电、光伏发电、地热发电、生物质发电等驱动电解水等方式生产氢能源,生产氢能源模型为

$$q_{P2G,n,t} = \frac{\mu_{P2G} P_{P2G,n,t} \Delta t}{\zeta} \quad (6)$$

式中: $q_{P2G,n,t}$ 为第 n 个生产氢能源设备在 t 时刻获得的氢能源总量; μ_{P2G} 为第 n 个生产氢能源设备的生产效率; $P_{P2G,n,t}$ 为第 n 个生产氢能源设备在 t 时刻所需要的电能有功; Δt 为生产氢能源时间段; ζ 为氢能源的热值系数。

式(6)中的 $P_{P2G,n,t}$ 应满足其上、下限约束。

1.4.2 氢能源储存系统模型

目前的储氢能源主要采用容器进行存储,并采用压缩压力的形式大量保存,其安全稳定运行模型为

$$\begin{cases} U_{ST,n,t}^i + U_{ST,n,t}^o \leq 1 \\ q_{ST,n,t}^i + q_{ST,n,t}^o = q_{ST,n,t} \\ V_{ST,n,t} = V_{ST,n,t-\Delta t} + q_{ST,n,t-\Delta t}^i \eta_i - \frac{q_{ST,n,t}^o}{\eta_o} \\ V_{ST,n,0} = V_{ST,n,t} + q_{ST,n,t}^i \eta_i - \frac{q_{ST,n,t}^o}{\eta_o} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $U_{ST,n,t}^i, U_{ST,n,t}^o$ 分别为在 t 时刻存储氢能源单元输入、输出离散变量数值; $q_{ST,n,t}^i$ 为在 t 时刻氢能源管道中存储氢能源单元 n 输入的氢能源容量; $q_{ST,n,t}^o$ 为 t 时刻存储氢能源单元 n 输入的氢能源容量; $q_{ST,n,t}$ 为在 t 时刻氢能源管道中存储氢能源单元 n 的氢能源总容量; $t-\Delta t$ 为时间段; η_i 为氢能源管道中的输入效率; η_o 为氢能源储能中的输出效率; $V_{ST,n,t}$ 为储氢单元在 t 时刻的体积; $V_{ST,n,0}$ 为储氢单元在初始时刻的体积。

式(7)中的 $q_{ST,n,t}^i, q_{ST,n,t}^o$ 和 $V_{ST,n,t}$ 应满足各自的上、下限约束。

1.4.3 氢能源供需平衡模型

氢能源输出与用户需求之间应满足平衡关系方程:

$$P_l = \omega_l q_l \zeta \Delta t \quad (8)$$

式中: P_l 为在 t 时刻第 l 个需求负荷的输出有功功率; ω_l 为在 t 时刻第 l 个需求负荷的输出有功功率的效率; q_l 为在 t 时刻第 l 个需求负荷所需要的氢能源总量; Δt 为时间变化量。

2 综合能源之间互相转化模型

电能转换为热能一般是通过锅炉加热的方式,其转换模型为

$$R_r = \mu_r P_r \quad (9)$$

式中: R_r 为热网能量功率; μ_r 为由电能转换至热能的效率; P_r 为电能提供的功率。

电能转化为天然气能量一般是通过催化的化学过程,其转换模型为

$$F_{P2G} = \frac{\zeta_{P2G} P_{P2G}}{\Xi} \quad (10)$$

式中: F_{P2G} 为天然气总量; P_{P2G} 为消耗电能总量; ζ_{P2G} 为电能转换为天然气能量的效率; Ξ 为天然气的热值系数。

目前氢气的获取主要采用电解水方式得到,其转换方程为

$$G_E = \frac{P_E}{\lambda_E \rho_H} \quad (11)$$

式中: G_E 为获取氢气的体积; P_E 为输入的电能功率; λ_E 为制取氢气的效率; ρ_H 为氢气的密度。

3 综合能源互联系统成本目标函数

本文所提的综合能源互联系统包含了主动配电网(常规机组、风力发电机组和光伏发电机组)、热网、天然气网络和氢能源网络,电-热-气-氢之间是独立管理控制的,因此须要相互协调配合实现分布式调度控制,其目标函数是以发电成本、热能成本、气网成本和氢能源成本的总和最小为目标。

$$C = \min \sum_{t=1}^{N_t} [C_P(t) + C_R(t) + C_Q(t) + C_G(t)] \quad (12)$$

式中: N_t 为时间段总数; C_P 为主动配电网的成本,包含了主动配电网中的常规机组成本、风力发电机组成本、光伏发电机组成本; C_R 为热网成本; C_Q 为天然气网成本; C_G 为氢能源成本。

式(12)应满足主动配电网中的常规机组发电 P_g 、风力发电 P_w 、光伏发电 P_v 与需求侧负荷 P_1^l 、电解水生产氢气需要的有功功率 P_{P2G}^l 、天然气生

产需要的有功功率 P_{p2g}^l 以及网络损耗 P_{loss}^l 的有功功率平衡约束:

$$\sum_{g=1}^G P_g + \sum_{w=1}^W P_w + \sum_{v=1}^V P_v = P_1^l + P_{p2h}^l + P_{p2g}^l + P_{loss}^l \quad (13)$$

式中: G 为常规机组数量; W 为风力发电机组数量; V 为光伏发电机组数量。

式(12)应满足电转气设备产生热量 R_u^{p2g} 、燃气轮机产生热量 R_u^{chp} 、电锅炉产生热量 R_u^{p2h} 与热负荷 R_1^l 和热损耗 R_{loss}^l 之间的平衡关系:

$$\sum_{i=1}^{N_p} R_u^{p2g} + \sum_{i=1}^{N_e} R_u^{chp} + \sum_{i=1}^{N_c} R_u^{p2h} = R_1^l + R_{loss}^l \quad (14)$$

式中: N_p 为电转气设备总数; N_e 为燃气轮机数量; N_c 为电锅炉总数。

式(12)应满足氢能源能量 G_u^{p2g} 、天然气能量 G_u^{p2h} 提供的其他能量与所需的氢气负荷 G_1^l 和损耗 G_{loss}^l 之间的平衡关系:

$$\sum_{i=1}^{G_g} G_u^{p2g} + \sum_{i=1}^{G_h} G_u^{p2h} = G_1^l + G_{loss}^l \quad (15)$$

式中: G_g 为氢能源生产设备总数; G_h 为天然气设备总数。

式(12)还应满足各个机组上、下限安全约束。

4 改进一致性算法的分布式低碳经济调度求解

4.1 成本函数

本文综合能源互联系统中涉及到主动配电网的常规机组,其成本函数表示为

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_c} (\alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i) \quad (16)$$

式中: N_c 为发电机节点总数; α_i 为成本函数的二次项系数; β_i 为成本函数的一次项系数; γ_i 为成本函数的常数项系数; P_i 为发电机节点 i 的有功功率。

热网系统中常规机组成本函数表示为

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_t} (\alpha_{it} H_i^2 + \beta_{it} H_i + \gamma_{it}) \quad (17)$$

式中: N_t 为热网系统中的供热设备总数; α_{it} 为热网系统成本函数中的二次项系数; β_{it} 为热网系统成本函数中的一次项系数; γ_{it} 为热网系统成本函数中的常数项系数; H_i 为热网系统中第 i 个设备

输出的热量功率。

对于天然气系统中,其成本函数表示为

$$f_3 = \sum_{i=1}^{N_p} (\alpha_{pi} T_{pi}^2 + \beta_{pi} T_{pi} + \gamma_{pi}) \quad (18)$$

式中: N_p 为天然气系统设备总数; α_{pi} 为天然气系统成本函数中的二次项系数; β_{pi} 为天然气系统成本函数中的一次项系数; γ_{pi} 为天然气系统成本函数中的常数项系数; T_{pi} 为天然气系统产气设备 i 的供气量。

氢能源系统常规机组成本函数表示为

$$f_4 = \sum_{i=1}^{N_g} (\alpha_{gi} G_{gi}^2 + \beta_{gi} G_{gi} + \gamma_{gi}) \quad (19)$$

式中: N_g 为制氢设备总数; α_{gi} 为氢能源系统成本函数中的二次项系数; β_{gi} 为氢能源系统成本函数中的一次项系数; γ_{gi} 为氢能源系统成本函数中的常数项系数; G_{gi} 为第 i 个制氢设备的输出功率。

4.2 改进一致性算法的分布式求解

综合能源互联系统中主动配电网、热网、天然气网、氢能源网络是相互独立调度控制管理的,因此须要采用分布式的方法予以求解。

一致性算法是通过相对独立的主动配电网、热网、天然气网、氢能源网络分别进行独立求解,并将具有通信联系的相邻网络通过协调进行迭代求解。

根据传统集中式经济调度的协调方程,对于式(16)~(19)的综合能源互联系统,可得到改进一致性算法的分布式求解方式为

$$\begin{cases} \lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^{N_i} a_{ij} \lambda_j(k) + \varepsilon_i \Delta P_i(k) \\ P_i(k+1) = \begin{cases} P_i^{\min}, & \lambda_i(k+1) < \lambda_i^{\min} \\ \frac{\lambda_i(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i}, & \lambda_i^{\min} \leq \lambda_i(k+1) \leq \lambda_i^{\max} \\ P_i^{\max}, & \lambda_i(k+1) > \lambda_i^{\max} \end{cases} \\ \Delta P_i(k+1) = \sum_{j=1}^{N_i} a_{ij} \Delta P_j(k) - [P_i(k+1) - P_i(k)] \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\lambda_i(k+1)$ 为 λ_i 第 $k+1$ 次迭代值,将最终收敛至每个节点相等; N_i 为节点 i 相邻节点集合; a_{ij} 为行和为 1 的邻接矩阵第 i 行第 j 列元素; $\lambda_j(k)$ 为第 k 次迭代值; ε_i 为较小正数,控制迭代速度和精度; $\Delta P_i(k)$ 为节点 i 第 k 次迭代的有功功率偏差;

$P_i(k+1)$ 为节点 i 第 $k+1$ 次迭代的有功功率; λ_i^{\min} , λ_i^{\max} 分别为节点 i 发电机有功功率取最小值 P_i^{\min} 、最大值 P_i^{\max} 获得的成本函数关系 (负荷节点为 0); $\Delta P_i(k+1)$ 为发电机节点 i 第 $k+1$ 次迭代的有功功率偏差; $\Delta P_j(k)$ 为节点 j 第 k 次迭代的有功功率偏差; $P_i(k)$ 为节点 i 第 k 次迭代的有功功率。

在经济调度模型中考虑发电约束问题,经济调度的最优解应满足:

$$\begin{cases} 2\alpha_i P_i + \beta_i = \lambda^*, P_{\min} < P_i < P_{\max} \\ 2\alpha_i P_i + \beta_i < \lambda^*, P_i = P_{\min} \\ 2\alpha_i P_i + \beta_i > \lambda^*, P_i = P_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

令 Ω_p 表示最优输出为容量上、下限的发电机的集合,因此包含发电约束问题的最优解可以表示为

$$P_i^* = \begin{cases} P_{\min} & (P_i \notin \Omega_p) \\ \frac{\lambda^* - \beta_i}{2\alpha_i} & (P_i \in \Omega_p) \\ P_{\max} & (P_i \notin \Omega_p) \end{cases} \quad (22)$$

在式(20)~(22)中, λ_i, P_i 和 ΔP_i 分别为主动配电网、热网、天然气网、氢能源网络的边际成本、注入有功功率量和不平衡有功功率量,3个变量通过主动配电网、热网、天然气网、氢能源网络交互迭代求解。

5 算例仿真

5.1 算例 1

以图 2 所示的某实际综合能源互联系统进行算例仿真,该系统包含 5 条母线,其中,母线 1 中的发电机为常规发电机组,母线 2 中的发电机为热网机组,母线 3 中的发电机为天然气机组,母线 4 为氢能源机组,母线 5 为主动配电网中的常规机组。

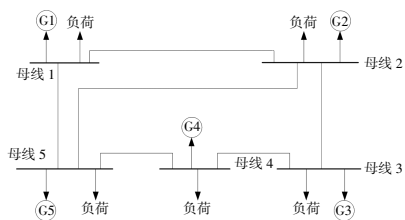


图 2 某实际综合能源系统

Fig.2 A certain actual comprehensive energy system

图 2 所示系统的费用参数及负荷状态如表 1 所示。

表 1 发电机费用参数及负荷状态

Table 1 Generator cost function and load state

编号	α_i	β_i	P_{\min}/MW	P_{\max}/MW	P_D/MW
1	0.094	1.22	10.0	80	35
2	0.078	3.41	8.0	60	20
3	0.105	2.53	3.8	40	25
4	0.082	4.02	5.4	45	30
5	0.074	3.17	4.2	18	10

图 2 所示的邻接矩阵为

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & 0 & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \end{bmatrix} \quad (23)$$

由于发电机的迭代功率不同,5 个发电机有功功率的迭代情况如图 3 所示。5 个发电机的有功功率在经过 100 次迭代后,发电机具体有功功率稳定情况如表 2 所示。

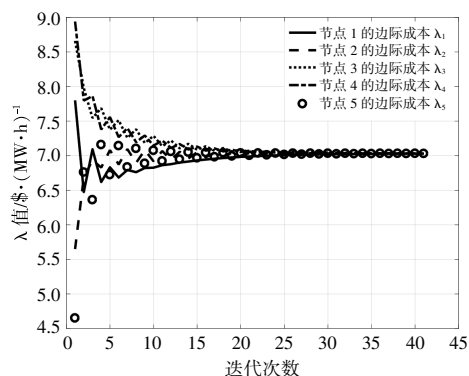


图 3 5 个 λ 迭代情况

Fig.3 The iteration situation of five λ

表 2 各个节点迭代结果

Table 2 The Iteration results

母线 1 机组	母线 2 机组	母线 3 机组	母线 4 机组	母线 5 机组	MW
32.813 6	25.506 1	23.137 9	20.542 4	18.000 0	

为了验证系统结果的正确性,将本文所提方法与粒子群方法进行对比,结果如表 3 所示,同时

表 3 本文所提方法与粒子群方法结果对比

Table 3 Comparison of results between the method proposed in this article and the particle swarm optimization method

编号	发电机有功功率/MW		边际成本 $\lambda/(\$/\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$	
	粒子群方法	本文方法	粒子群方法	本文方法
1	32.81	32.813 6	7.389	7.389 0
2	25.51	25.506 1	7.389	7.389 0
3	23.14	23.137 9	7.389	7.389 0
4	20.54	20.542 4	7.389	7.389 0
5	18.00	18.000 0	7.389	7.389 0

有功功率不匹配量的迭代结果如图 4 所示。

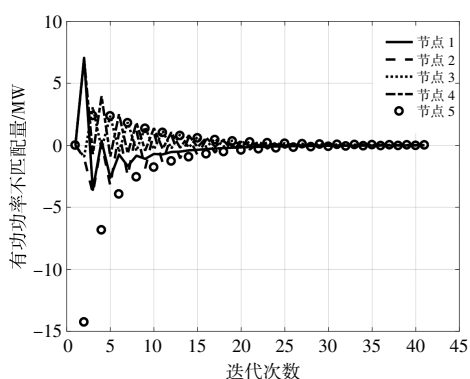


图 4 母线有功功率不匹配量迭代结果

Fig.4 Iteration results of bus active power mismatch

由表 3 可见, 由于母线 5 机组的上限被设置为 18.000 0 MW, 因此发电机 5 的发电功率被限制在发电约束的上限 18.000 0 MW。

同时, 通过对比粒子群方法计算结果和本文所提方法结果, 边际成本误差为 0%, 母线上机组的功率也相同(由于四舍五入存在近似)。

5.2 算例 2

为了进一步验证本文所提方法的有效性, 采用如图 5 所示的某实际 9 节点系统进行验证。该系统中母线 1 包含了常规机组和热网机组, 母线 2 包含了传统天然气机组, 母线 3 为氢能源机组。系统结构参数如表 4 所示。

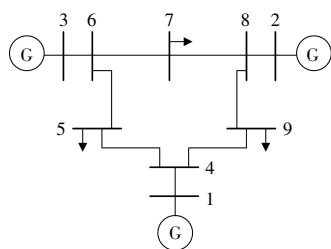


图 5 某实际 9 节点综合能源系统结构

Fig.5 Structural of a practical 9-node comprehensive energy system

表 4 图 5 所示系统机组及负荷参数

Table 4 The system unit and load parameters shown in Fig.5

编号	α_i	β_i	γ_i	P_{\min}/MW	P_{\max}/MW	P_D/MW
1	0.110 0	5.0	150	10	250	0
2	0.085 0	1.2	600	10	300	0
3	0.122 5	1.0	335	10	270	0
4	1.000 0	1.0	0	0	0	0
5	1.000 0	1.0	0	0	0	90
6	1.000 0	1.0	0	0	0	0
7	1.000 0	1.0	0	0	0	100
8	1.000 0	1.0	0	0	0	0
9	1.000 0	1.0	0	0	0	125

经过迭代计算, 每个母线边际结果如图 6 所示, 计算结果如表 5 所示。

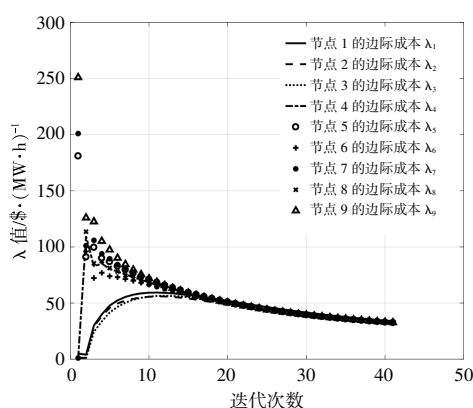


图 6 λ 值迭代情况

Fig.6 The iteration results of λ

表 5 算例 2 计算迭代结果

Table 5 Calculating the iteration result of example 2

编号	粒子群结果		本文结果	
	P_i/MW	$\lambda_i/(\$/\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$	P_i/MW	$\lambda_i/(\$/\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$
1	86.56	24.044	86.56	24.044 0
2	134.38	24.044	134.38	24.044 0
3	94.06	24.044	94.06	24.044 0
4		24.044		24.044 0
5		24.044		24.044 0
6		24.044		24.044 0
7		24.044		24.044 0
8		24.044		24.044 0
9		24.044		24.044 0

由图 6 可见, 计算迭代次数达到 40 次时, 可以收敛为最优值 24.044 0。由表 5 可见, 本文方法能够获得与粒子群方法相同的结果, 且与传统集中式方法结果相同。

6 结论

针对综合能源互联系统中包含常规机组、热

网、天然气网和氢能源互联系统的分布式调度控制问题,本文提出了一种改进的一致性的分布式调度控制方法,通过实际系统的仿真计算,得到以下结论。

①综合能源系统中考虑电网、热网、天然气网和氢能源网分布式协调调度控制是合理的。

②采用改进的一致性算法能够有效达到与粒子群方法和传统集中式方法相一致的结果。

参考文献:

- [1] 潘忠志,孔宁,王燕涛.改进新能源消纳的配电网资源优化配置研究 [J]. 东北电力大学学报,2023,43(6): 71-78.
- [2] Y Wang,J Hu,N Liu. Energy management in integrated energy system using energy-carbon integrated pricing method [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023,14(4): 1992-2005.
- [3] 顾玖,王晨磊,解大.电力市场环境下的电-氢一体化站优化运行 [J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1): 130-139.
- [4] 李亚峰,王维庆.考虑阶梯碳交易机制的含混氢天然气综合能源系统容量配置[J].电力科学与技术学报, 2023,38(6):237-247.
- [5] 王成山,吕超贤,李鹏,等.园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2019,39(23):6791-6803,7093.
- [6] Gu W,Wang Z H,Wu Z,et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(5):2332-2342.
- [7] Li J C,Ying Y L,Lou X D,et al. Integrated energy system optimization based on standardized matrix modeling method [J].Applied Sciences,2018,8(12): 2372.
- [8] 吴锦领,楼平,管敏渊,等.基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略 [J]. 电网技术,2022,46(7):2711-2723.
- [9] 马腾飞,裴玮,肖浩,等.基于纳什谈判理论的风-光-氢多主体能源系统合作运行方法[J].中国电机工程学报,2021,41(1):25-39,395.
- [10] 崔杨,张聪,张璐,等.基于风电-碳捕集电力系统的灵活性调峰策略[J].电力自动化设备,2023,43(6):10-17,45.
- [11] 马丽叶,朱思宇,卢志刚,等.考虑时空扩散和碳汇的碳捕集-电转气协同优化调度模型[J].电力系统自动化,2023,47(2):15-23.
- [12] Liu Chenglin,Zhao Lei,Zhu Shun,et al.Advanced exergy analysis and optimization of a coal to ethylene glycol (CtEG)process[J].Energy,2023,282:128790.
- [13] Mana A A,Kaitouni S I,Kouksou T,et al.Enhancing sustainable energy conversion:comparative study of superheated and recuperative ORC systems for waste heat recovery and geothermal applications,with focus on 4E performance[J].Energy,2023,284:128654.
- [14] 周特,薛云飞,季节,等.考虑电力间接碳排放不确定性的电-冷-热综合能源系统两阶段鲁棒优化方法[J]. 电网技术,2024,48(1):50-60.
- [15] 周伟,孙永辉,谢东亮,等.计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度[J].电网技术,2024,48(1):61-73.
- [16] 孙惠娟,吴鹏,彭春华,等.基于源荷协同降碳的综合能源系统分布鲁棒经济调度 [J]. 电网技术,2023,47(4):1589-1603.
- [17] 陈胜,张景淳,卫志农,等.面向能源转型的电-气-氢综合能源系统规划与运行[J].电力系统自动化,2023, 47(19):16-30.
- [18] Tejada-Arango Diego A,Wogrin Sonja,Siddiqui Afzal S,et al. Opportunity cost including short-term energy storage in hydrothermal dispatch models using a linked representative periods approach [J]. Energy,2019,188: 116079.

A distributed coordinated control method for active distribution networks with integrated energy interconnection

Wang Yajun¹, Ni Weiqiang², Zhang Ye², Jia Yafei³, Sun Mengxue³, Wu Guannan⁴

(1.State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 2.Cangzhou Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd., Cangzhou 061001, China; 3.Xiong'an New Area Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd., Xiong'an 071600, China; 4.Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the development of new power system construction, various energy sources are integrated into the distribution network in the form of clusters and networks, making the distribution network exhibit active characteristics. Fully leveraging the complementary characteristics of multiple energy sources can alleviate the uncertainty of the distribution network while providing sufficient demand for electricity, heat, gas, cooling, heating, and other resources on the demand side. The existing distributed coordinated control methods only consider the gas network, heat network, and power network, without considering the hydrogen energy network. Provide a comprehensive and distributed coordinated control method for active distribution network, heating network, natural gas network, and hydrogen energy network, as well as energy interconnection. Firstly, the economic goal of minimizing operating costs was established, and the constraints of each network were provided; Secondly, a hierarchical control strategy is proposed for the active distribution network, heating network, natural gas network, and hydrogen energy network, and an improved consistency algorithm and particle swarm optimization method are used for solution comparison; Finally, a simulation example of an actual power grid is given, and it is found that the distributed comprehensive energy interconnection scheduling control method can achieve the same results as traditional methods, and the effectiveness of the proposed scheduling control strategy is verified.

Keywords: integrated energy system; active distribution network; distributed; control