DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181358

含能源互联微网的主动配电网分层分布式协调控制

张爱祥，宋士瞻，高 扬，王传勇，张 健，康文文

(国网山东省电力公司枣庄供电公司，山东 枣庄 277000)

摘要：目前，天然气网络、热力网络和电力网络在主动配电网中的耦合联系加深，共同为用户提供冷、热、电、气等多种不同形式的能源，但相关的协调控制技术仍不成熟。以电网为核心，和热网、天然气网进行互动优化，首先提出了含电力网络、天然气网络和热力网络的综合建模方法，对各能源子系统多能流的约束条件及运行目标进行了综合优化，实现了多能源协调互补和深度融合。然后，设计了多微网和主动配网之间在稳定运行时的分层分布式协调控制策略，将系统分为主动配电网层、能源互联微网层和元件层的三级控制结构，在元件层提出采用改进后的二级功率优化控制来进行分布式设备之间的协调控制。最后，利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件，搭建主动配网的仿真平台，含 3 个能源互联微电网来证明智能调控方法的合理性。

关键词：能源互联微网；多能互补；主动配电网；分层分布式协调

Hierarchical distributed coordinated control of active distribution network including energy interconnection micro grid

ZHANG Aixiang, SONG Shizhan, GAO Yang, WANG Chuanyong, ZHANG Jian, KANG Wenwen

(State Grid Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277000, China)

Abstract: At present, the coupling of natural gas network, thermal network and power network in the active distribution network has been deepened to jointly provide users with cold, hot, electric, gas and other forms of energy, but the relevant coordination control technology is still immature. This paper takes the power grid as the core and conducts interactive optimization with the heat and natural gas networks. Firstly, it puts forward a comprehensive modeling method including the power network, natural gas network and thermal network, and comprehensively optimizes the constraint conditions and operational objectives of multi-energy flow of each energy subsystem, so as to realize the coordination and complementarity of multi-energy and in-depth integration. Then, a hierarchical distributed coordinated control strategy is designed for the stable operation of multi-micro grid and active distribution network. The system can be divided into the active layer, the interconnected microgrid layer, and the component layer, in which the improved secondary power optimization control for the coordination is proposed between the distributed equipment control. Finally, PSCAD/EMTDC simulation software is used to build a simulation platform for active distribution network, which includes three energy interconnection microgrids, to prove the rationality of intelligent control method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (No. SD18-GC-ZB003-ZH-KJ) and Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52060018000N).

Key words: micro energy internet (MEI); multi-energy complementary active distribution network (ADN); multi-agent system; hierarchical distributed coordination control

0 引言

能源互联微网可实现多能源协调互补，融合天然气网、热力网等不同的能源网络，然而，多种能源的协调互补却增加了主动配电网的复杂性[1-3]。由于不同的能源网络有不同的模型和特性，并且相互作用和影响，传统各能源网络单独分析的方法已难以适应现有配电系统的要求[4-5]。文献[6-7]分析了多种能源的网络特性，文献[8]对电力网络和天然气网

基金项目：国网山东省电力公司科技项目资助(SD18-GC-ZB003-ZH-KJ)；国家电网公司总部科技项目(52060018000N)

络之间的相互影响进行了研究，但主要集中在电-气耦合方面，对电-热耦合考虑较少。文献[9-10]只考虑了电力网和天然气网络的互补特性，但未分析高渗透率分布式能源并网条件下天然气网和电网的随机性特征。

另外，未来的主动配电网中分布式新能源分布较分散，且距离较远，当负荷发生大规模突变或某条线路发生故障时，运行的安全性和可靠性会有很大程度降低。目前，距离较近的分布式新能源都聚合为微电网群的形式并入配电网中，各微网之间通过分布式稀疏通信网络，实现广域互联和区域自治[11-13]。文章[14]中提出的配电网能量管理系统虽然能够实现微网群的运行成本最优，但需要分析的数据较复杂且通信量较大，如果调度中心出现故障不能和下层的微网群通信时，则整个系统可能出现崩溃。文章[15]根据动态多智能体的自治性和协作性特征，提出了主动配电网系统的分层调控策略，各子微网可以进行区域自治，然而，多智能体之间的通信结构设计及各子微网之间如何进行协调都没有进行深入分析，另外，也仅仅探讨了两个子微网间的互动机理，对于子微网日益增多且融合热力网和天然气网的智能配电网已不太适用。文献[16-17]提出了电转气 P2G 的能量耦合设备建模方法，并构建天然气网络进行分析，但未对电、热、气的综合能源系统如何进行协调和建模进行探讨。文献[18-19]提出在主动配电网中关于主动负荷管理和储能的多时间尺度优化调度方法，能够在考虑市场电价的基础上实现负荷需求侧的响应，但未考虑上层的优化调度如何在底层的分布式元件进行控制执行。文献[20]提出了考虑多能互补的综合能源系统管理方法，对我国目前开展的多能互补示范工程进行了介绍。

目前，主动配电网在运行时，仍以电网为核心，将其他能源网的结构和能量耦合设备都进行简化或忽略，现有的理论分析方法已不能适用含能源互联微网的主动配电网运行控制和优化调度。故针对不同能源网的互补特性，本文先对综合能源系统进行稳态建模；然后，构建主动配电网的多级调控架构，提出一种电、气、热网之间的协调优化策略，通过各智能体间的信息交互，实现能源互联微网内各设备的投入和切出。最后，对各子微网内部和微网之间的通信机理进行研究，探讨不同通信延时下分布式协调控制的稳定性。

1 综合能源系统建模

1.1 电力系统

电网运行需要满足潮流平衡方程，即输入至电网的功率等于电负荷及输电线损耗的功率。采用经典的交流潮流模型表示为[21-22]

$$\begin{cases}\Delta P_i = P_{is} - \sum_{j\in i}^{n} V_i V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - \sum_{j\in i}^{n} V_i V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} - B_{ij}\sin\theta_{ij}) = 0\end{cases} \tag{1}$$

式中：n 为系统的节点数；j 为与节点 i 相连的节点；G_{ij}、B_{ij} 和 θ 是节点 i 和节点 j 之间的导纳以及相角差。

1.2 热力系统

1.2.1 水力模型

不考虑供热通道的渗漏率，则水压压降 Δh 可表示为

$$\begin{cases}\Delta h = R(l + l_d) = sG^2 \\ s = 6.88\times10^{-9}\dfrac{f^{0.25}}{d^{5.25}}(l + l_d)\rho\end{cases} \tag{2}$$

其中：l 为热力通道的长度，单位为 m；R 为热力通道的消耗量，单位为 P_a/m;；G 为热力通道的流通量大小，单位为 m^3/h；s 为热力通道的阻力系数，单位为 kg/m^2；f 为热力通道的粗糙度系数，单位为 mm；d 为热力通道内壁的直径，单位为 m；ρ 为热力通道的密度，单位为 kg/m^3。

根据基尔霍夫定律得到水力平衡的方程：

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{G} = G_0 \\ \boldsymbol{B}\cdot\Delta\boldsymbol{H} = 0\end{cases} \tag{3}$$

式中：热网的关联矩阵和回路矩阵可由 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 表示；热力通道的流量向量用 $\boldsymbol{G}$ 表示，流入节点向量为 $\boldsymbol{G}_0$，水压压降向量为 $\Delta\boldsymbol{H}$。

1.2.2 热力模型

t 时刻热力通道 k 的流入量 $q_{k,t}^{\text{in}}$ 与流出量 $q_{k,t}^{\text{out}}$ 关系为

$$q_{k,t}^{\text{in}} = G_{k,t} C T_{k,t}^{\text{in}} \tag{4}$$

$$q_{k,t}^{\text{out}} = G_{k,t} C T_{k,t}^{\text{out}} \tag{5}$$

假定 t 时刻热力通道 k 的输送量存在延时，定义为 $\tau_{k,t}$，则流入量和流出量之间的关系变为

$$q_{k,t}^{\text{in}} - q_{k,t+\tau_{k,t}}^{\text{out}} = \varepsilon_k q_{k,t}^{\text{in}} \tag{6}$$

$$\tau_{k,t} = F_k / G_{k,t} \tag{7}$$

式中：t 时刻通道 k 的流量大小为 $G_{k,t}$；入口和出口处的温度分别为 $T_{k,t}^{\text{in}}, T_{k,t}^{\text{out}}$；损失因子为 ε_k；由管道

长度和管道截面积决定的特征因子为 F_k。

1.3 天然气系统

假定天然气通道内部含有压缩机，节点 o 为压缩机的出口，节点 i 为入口，则天然气通道的数学模型可以定义为[23]

$$\begin{cases} f_{\mathrm{com}} = f_{\mathrm{on}} = K_{\mathrm{on}}\sqrt{(p_{\mathrm{o}}^2 - p_{\mathrm{n}}^2)} \\ f_{\mathrm{cp}} = \dfrac{k_{\mathrm{cp}} f_{\mathrm{com}} T_{\mathrm{gas}}}{q_{\mathrm{gas}}}(k_{\mathrm{cp}}^{\frac{a-1}{a}} - 1) \\ f_{\mathrm{mi}} = f_{\mathrm{com}} + f_{\mathrm{cp}} \\ f_{\mathrm{m,i}} = K_{\mathrm{m,i}}\sqrt{(p_{\mathrm{m}}^2 - p_{\mathrm{i}}^2)} \end{cases} \tag{8}$$

式中：流经压缩机的天然气通道流量大小是 f_{com}；f_{cp} 是压缩机的天然气消耗量；通过压缩机入口处的流通量是 f_{mi}；出口处的流通量是 f_{on}；压缩机的空气压缩比例是 k_{cp}；入口处和出口处的通道系数为 K_{mi}、K_{on}；各节点处的气压值分别为 p_{m}、p_{i}、p_{o} 和 p_{n}、；天然气热力值为 q_{gas}；天然气的温度用 T_{gas} 表示，图 1 是含压缩机的天然气通道模型。

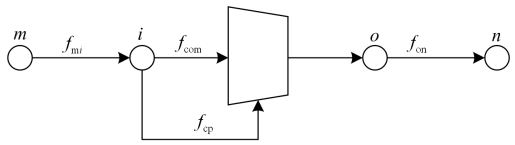


图 1 含有压缩机的天然气通道

Fig. 1 Pipelines including compressors

1.4 电-气-热能量耦合

本文主要考虑的电-气-热能量耦合组件包括微型燃气轮机、压缩机、电转气(P2G)装置和电转热(P2H)设备等，如图 2 所示[24-25]。

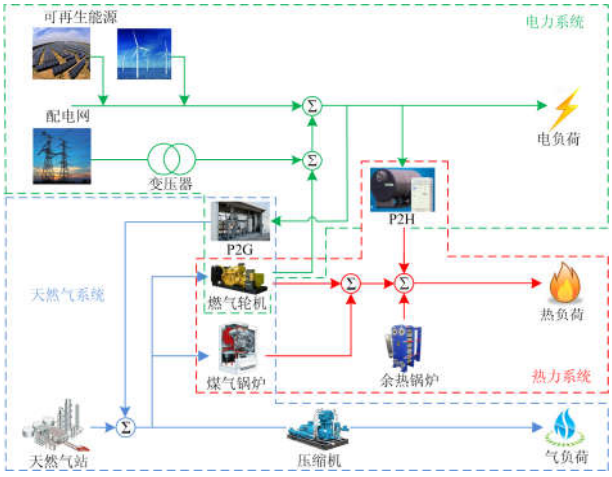


图 2 多能源耦合系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-energy coupling system

其模型分别表示如下。

1) 电驱动压缩机

考虑变频电机驱动的压缩机，此时压缩机可视为电力系统的等效电负荷：

$$P_{\mathrm{c},k} = H_{\mathrm{c},ij}\left(\frac{0.7457}{10^5}\right) \tag{9}$$

式中，$P_{\mathrm{c},k}$ 为接入电力系统节点 k 的电机驱动压缩机 i-j 消耗的电功率。

2) 电转气(P2G)装置

P2G 主要包括电解水和 Sabatier 催化两个化学反应环节，其输入电功率与输出天然气量的能量转化关系为

$$G_{\mathrm{P2G}} = \eta_{\mathrm{P2G}} P_{\mathrm{P2G}} / GHV \tag{10}$$

式中：G_{P2G} 为 P2G 装置产生的天然气量；P_{P2G} 为 P2G 装置消耗的电功率；η_{P2G} 为 P2G 装置的能量转化效率；GHV 为固定高热值。

3) 电转热(P2H)设备

以电锅炉为例，其电热转化效率为

$$\eta_{\mathrm{b}} = \frac{\Phi_{\mathrm{b}}}{P_{\mathrm{b}}} \tag{11}$$

式中：η_{b} 为电锅炉转化效率，可高达 98%；输出热量为 Φ_{b}，消耗电能为 P_{b}。

2 主动配电网分层分布式协调控制

含能源互联微网的主动配电网中包含电力网络、天然气网络和热力网络，如图 3 所示，电、气、热能之间的相互转化和影响大大增加了系统控制的复杂程度，为实现其整体运行的安全、经济和灵活性等特点，需要不同能源彼此间的协调配合。

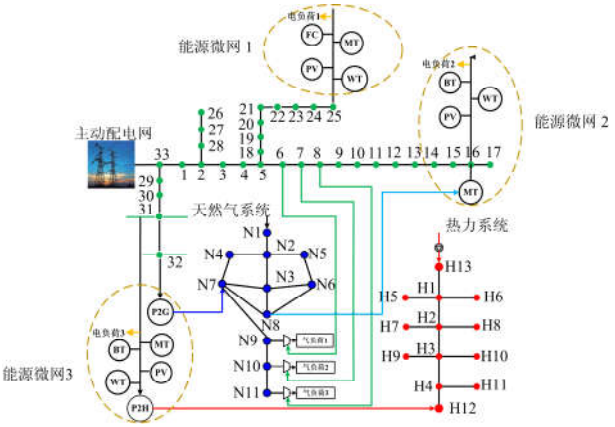


图 3 含能源互联微网群的主动配电网架构

Fig. 3 Architecture of ADN with MEIs

2.1 主动配电网层

主动配电网层是优化控制层，主要是根据电/气/热网络的负荷预测值来安排综合功率分配计划，需要考虑不同能源系统运行时的经济性和环保性以及负荷侧的用能需求，同时需要满足电/气/热网络的运行约束条件、动态过程和耦合关系[26-27]。

2.1.1 目标函数

多能源的优化分配方案以系统总运行成本为优化目标，系统运行总成本包括供电成本、供热成本以及供气成本。对应供能成本可由系统隶属度矩阵与系统中单元供能成本向量的乘积逐一表示，能源耦合度可由系统隶属度及单元供能向量求得，具体表现形式如下：

$$C_{\text{sys}}=\min\sum_{t=1}^{N_t}\left[C_{\text{P}}(t)+C_{\text{Q}}(t)+C_{\text{G}}(t)\right] \tag{12}$$

$$\left[C_{\text{P}}(t)\quad C_{\text{Q}}(t)\quad C_{\text{G}}(t)\right]^{\text{T}}=\boldsymbol{SMD}_{\boldsymbol{\Omega}}(t)\times\boldsymbol{C}_{\Omega}(t) \tag{13}$$

式中，$\boldsymbol{C}_{\Omega}(t)$为 t 时刻主动配电网中供能单元运行成本向量，本文基于图 1 所示结构，$\boldsymbol{C}_{\Omega}$可表示为

$$\boldsymbol{C}_{\Omega}=\left[C_{\text{grid}}\quad C_{\text{wdg}}\quad C_{\text{con}}\quad C_{\text{cbb}}\quad C_{\text{chp}}\quad C_{\text{p2h}}\quad C_{\text{p2g}}\quad C_{\text{gfb}}\quad C_{\text{gc}}\right] \tag{14}$$

式中，C_{grid}、C_{wdg}、C_{con}、C_{cbb}、C_{chp}、C_{p2h}、C_{p2g}、C_{gfb}和C_{gc}分别表示电网、风机、光伏、燃煤锅炉、燃气轮机机组、P2H 机组、P2G 机组、燃气锅炉以及压缩机的运行成本。

2.1.2 约束条件

主动配电网运行时需综合考虑各能源的电/热/天然气功率平衡、网络潮流、供能单元特性等约束条件，可按类分为系统运行约束以及系统内各供能单元的运行约束。

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{con}}}P_{\text{grid}}^{i,t}+\sum_{i=1}^{N_{\text{wdg}}}P_{\text{wdg}}^{i,t}+\sum_{i=1}^{N_{\text{hpp}}}P_{\text{chp}}^{i,t}=P_l^t+\sum_{i=1}^{N_{\text{esb}}}P_{\text{p2h}}^{i,t}+\sum_{i=1}^{N_{\text{p2g}}}P_{\text{p2g}}^{i,t}+P_{\text{loss}} \tag{15}$$

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{hpp}}}Q_{\text{hpp}}^{i,t}+\sum_{i=1}^{n_{\text{cbb}}}Q_{\text{chp}}^{i,t}+\sum_{i=1}^{n_{\text{esb}}}Q_{\text{p2h}}^{i,t}=Q_l^t+Q_{\text{loss}} \tag{16}$$

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{gc}}}G_{\text{gc}}^{i,t}+\sum_{i=1}^{n_{\text{p2g}}}G_{\text{p2g}}^{i,t}=G_l^t+\sum_{i=1}^{n_{\text{chp}}}G_{\text{chp}}^{i,t}+\sum_{i=1}^{n_{\text{gfb}}}G_{\text{gfb}}^{i,t}+G_{\text{loss}} \tag{17}$$

式(15)—式(17)分别表示主动配电网运行时的电、气及热功率平衡时的约束条件。其中：P_l^t、Q_l^t和G_l^t分别表示主动配电网的电、热及天然气负荷需求；P_{loss}、Q_{loss}和G_{loss}分别为系统的网损以及热能和天然气能在传输过程中的损耗。

2) 网络运行约束

$$\begin{cases}P_{i,t}=U_{i,t}\sum_{j\in i}^{n}U_{j,t}\left(G_{ij}\cos\theta_{ij,t}+B_{ij}\sin\theta_{ij,t}\right)\\ Q_{i,t}=U_{i,t}\sum_{j\in i}^{n}U_{i,t}\left(G_{ij}\sin\theta_{ij,t}+B_{ij}\cos\theta_{ij,t}\right)\end{cases} \tag{18}$$

$$U_i^{\min}\le U_{i,t}\le U_i^{\max} \tag{19}$$

$$Q_l^{\min}\le C_lF_{l,t}\left(T_{l,t}^{\text{in}}-T_{l,t}^{\text{out}}\right)\le Q_l^{\max} \tag{20}$$

$$G_k^{\min}\le G_{k,t}\le G_k^{\max} \tag{21}$$

式(18)—式(21)为主动配电网网络运行约束，包括直流电能功率约束、节点处的电压约束，热力管道热量上下限约束以及天然气管道的流量上下限约束。当 t 时刻时，注入节点 i 的有功和无功分别为 $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$；$U_{i,t}$ 和 $U_{j,t}$ 分别表示节点 i、j 在 t 时刻的电压；G_{ij} 和 B_{ij} 分别表示节点 i、j 间的电导和电纳；$\theta_{ij,t}$ 表示节点 i、j 之间在 t 时刻的相角差；$U_i^{\min}$ 和$U_i^{\max}$ 分别表示系统运行时节点 i 电压的上下限值；C_l 和 $F_{l,t}$ 分别为热力管道 l 流质的比热及 t 时刻流量；$T_{l,t}^{\text{in}}$ 和 $T_{l,t}^{\text{out}}$ 分别为热力管道 l 在 t 时刻的入口和出口温度；$G_{k,t}$ 为天然气管道 k 在 t 时刻的天然气流量；$Q_l^{\max}$、$Q_l^{\min}$、$G_k^{\min}$ 和 $G_k^{\max}$ 分别表示热力管道 l 传输热量和天然气管道 k 传输容量的上下限值。

2.2 能源互联微网层

能源互联微网层是协调控制层，主要通过每个子微网联络线节点上的微网级智能体来实现控制目标。它可以接收主动配电网级智能体下发的调度指令，如果某子能源系统内的分布式设备在运行时发生功率越限，则需要重新调整运行计划，并重新发送给上层主动配电网级智能体。当天然气网络越限时，能源互联微网级智能体会调整燃气轮机的发电计划；当热力网络越限时，可以根据并网运行模式下的电力网络的功率需求，协调微型燃气轮机和热储能装置的出力来平衡热力网络负荷波动。

2.3 元件层

元件层是执行控制层，主要通过设置在实际设备的接口位置上的元件级智能体来实现控制目标。它将运行优化方案转化为底层各元件的实际控制指令和状态设定值，收集各分布式发电单元的运行状态信息，并发送给微网级控制器。它可以和邻近的元件控制器之间进行信息交互，根据稀疏通信网络协议，进行分布式协调控制。

2.3.1 多级功率优化控制

各分布式发电单元近似为电压源，采用 VSC 换流器连接于公共母线上，设计二级功率优化控制策略，如图 4 所示。L_{f}、C_{f}分别是滤波器的电感和电

容，$U_{i,\mathrm{dc}}$ 是分布式设备的等效直流电压[19-21]。

该控制策略包含下垂控制和电压电流双环控制环节，基准电压 U_i^* 和频率 f_i^* 由二级控制器送入到一级控制器中，经过 dq 变换后得到电压参考值 $U_{i,d\mathrm{ref}}$ 和 $U_{i,q\mathrm{ref}}$，再通过电压 PI 控制器得到 dq 轴电流参考值 $i_{i,d\mathrm{ref}}$ 和 $i_{iq,\mathrm{ref}}$，和电流测量值进行比较后送入到电流 PI 控制器中，再通过 dq 坐标系向 abc 坐标系转换，得到变流器的 PWM 波调整量。下垂控制环节可表示为

$$\begin{cases} f_i = f_i^* - k_{\mathrm{P}} P_i \\ U_i = U_i^* - k_{\mathrm{Q}} Q_i \end{cases} \tag{22}$$

式中：U_i 和 f_i 是分布式设备经过变流器并网的末端电压和频率测量值；Q_i 和 P_i 是经过低通滤波器的无功和有功输出值；k_{Q} 和 k_{P} 是下垂控制的有功和无功调整斜率。

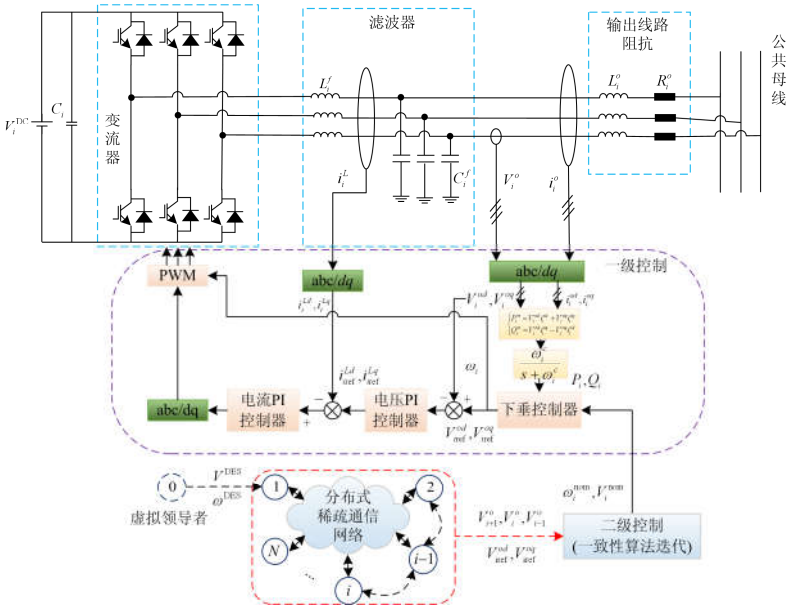


图 4　二级功率优化控制策略

Fig. 4 Secondary power optimization control strategy

为了调整电压和频率的误差值，实现联络线功率的精确控制，采用离散时间信号的分布式算法来改进二级功率优化控制。其中，$[t_k, t_{k+1}), k = 0,1,2,3\cdots$，是分布式算法每次迭代所花费的时间，可以划分为 N 个时间间隔，$[t_k^0, t_k^1], [t_k^1, t_k^2], \cdots, [t_k^{N-1}, t_k^N]$，其中 $t_k^0 = t_k, t_k^N = t_{k+1}$。

根据下垂关系式(22)，二级功率优化控制中的电压及频率额定基准量为

$$\begin{cases} U_i^*(t_k^{n+1}) = U_{i,d}(t_k^{n+1}) + k_{\mathrm{Q}} Q_i(t_k^{n+1}) = \\ \qquad U_{i,d}(t_k^n) + k_{\mathrm{Q}} Q_i(t_k^n) + \varepsilon_{k,U} + k_Q \varepsilon_{k,Q} = \\ \qquad U_i^*(t_k^n) + \varepsilon_{k,U}^{\mathrm{Q}} \\ f_i^*(t_k^{n+1}) = f_i(t_k^{n+1}) + k_{\mathrm{P}} P_i(t_k^{n+1}) = \\ \qquad f_i(t_k^n) + k_{\mathrm{P}} P_i(t_k^n) + \varepsilon_{k,f} + k_P \varepsilon_{k,P} = \\ f_i^*(t_k^n) + \varepsilon_{k,f}^P \end{cases} \tag{23}$$

为了维持系统电压的平衡，根据下垂控制关系知无功功率的调整量 $\varepsilon_{k,Q} = -f_{\mathrm{c}} Q_i(t_k^n) + f_{\mathrm{c}} Q_{i,\mathrm{cal}}(t_k^n)$。式中，低通滤波器的截止频率为 f_{c}，$Q_{i,\mathrm{cal}}$ 是输出的电压、电流值通过 dq 坐标变换后得到的无功功率。

3　仿真与分析

对考虑多能互补特性的主动配电网进行仿真分析，其中包含有 33 节点电力网络、11 节点天然气网络和 13 节点热力网络。主动配电网的节点 16、25、31 接入能源互联微网，天然气网络的 N1 节点为气源点、N2—N11 为气负荷点，其中，接入 N9—N11 的特殊用户 1—3 要求气压达到 37 mbar，因而考虑配置电驱动压缩机(分别接入电力系统的节点 6~8)来保证压力水平。热力网络以 H13、H12 为热源节点，其余为热负荷节点。

3.1　稳定运行时，能源互联微网响应配电网能量分配方案

如图 5、图 6 所示，首先，稳定运行时，主动配电网层能量管理中心通过利用电、气、热负荷的预测值和不同能源的价格水平，按照配网网损最小

和经济性最优原则来进行能量分配；然后，将功率分配计划发送给各子微网智能体，根据区域内部各分布式设备的运行情况，对各分布式设备进行二级功率优化。如图 7 所示，微网 1 内光伏为 0.45 MW，风机为 0.5 MW，燃气轮机为 0.6 MW，燃料电池为 0.5 MW，微网 2 内光伏为 0.15 MW，风机为 0.2 MW，燃气轮机为 0.3 MW，储能为 0.2 MW，微网 3 内光伏为 0.25 MW，风机为 0.4 MW，燃气轮机为 0.3 MW，储能为 0.15 MW。

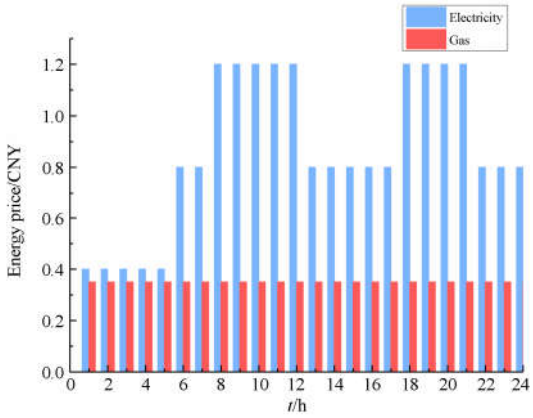


图 5 能源价格

Fig. 5 Energy price

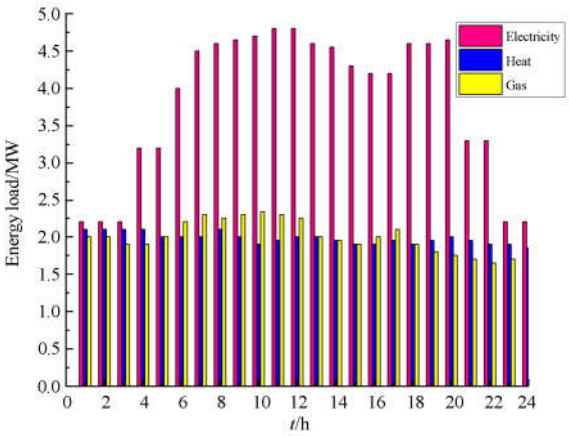
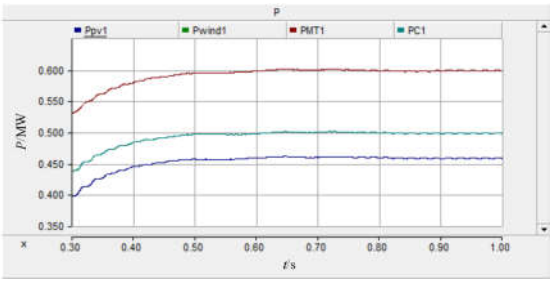
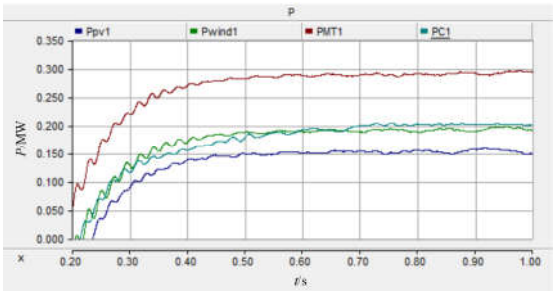


图 6 电、气、热负荷预测

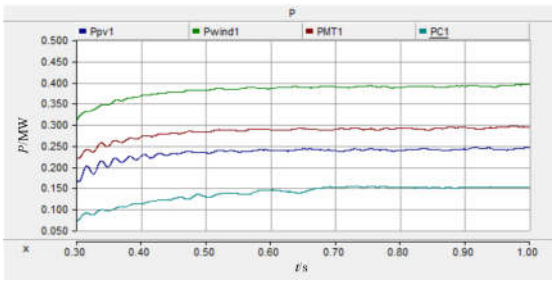
Fig. 6 Electricity, gas and heat load forecast



(a) 微网 1



(b) 微网 2



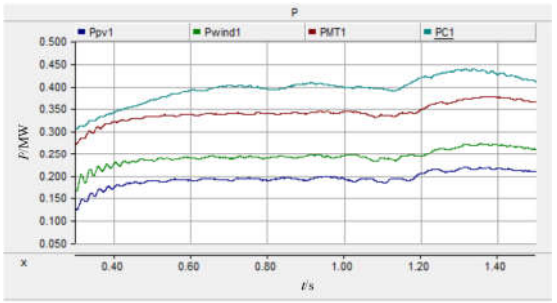
(c) 微网 3

图 7 微网群内各分布式电源的联络线功率

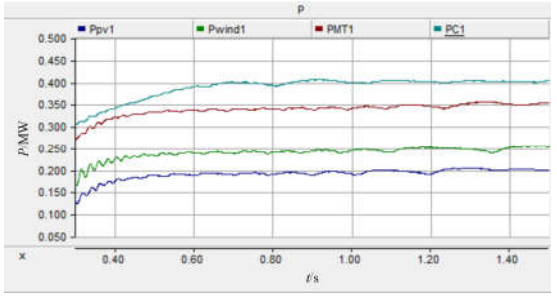
Fig. 7 Tie-line power of each distributed generators in MEIs

3.2 主动配电网侧故障，各能源网优化协调

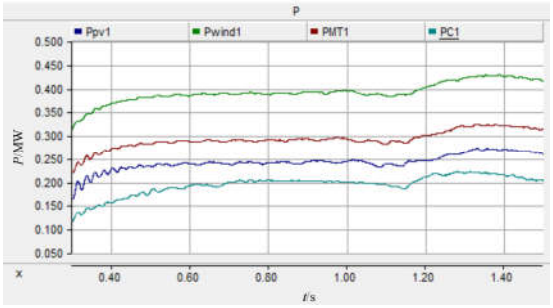
如图 8 所示，若主动配电网侧发生故障和能源互联微网群断开，相邻的微网控制器信息交互。如果子微网 2 的分布式设备运行已超过运行限制，不能满足热负荷的需求，则增加天然气网络的消耗，提高微型燃气轮机 2 的出力，补偿热负荷的不平衡，此时天然气管网的压力没有超过限值。



(a) 微网 1



(b) 微网 2



(c) 微网 3

图 8 微网群内各分布式电源的联络线功率

Fig. 8 Tie-line power of each distributed generators in MEIs

4　结论

本文针对含有多能源网络的主动配电网，提出了一种分层分布式的协调控制策略。在该框架下，利用多智能体系统即插即用的灵活特性，将控制系统分为主动配电网级智能体、能源互联微网级智能体和元件级智能体。在主动配网级智能体中，对综合能源网的分层结构和建模方法进行了详细讨论，该控制结构充分考虑了能源互联微网的多能互补特性，实现了电力网络、热力网络和天然气网络的协调控制和能量的优化管理。在元件级智能体中针对传统的下垂控制功率分配不精确的问题做了改进，设计了二级功率优化控制，实现了联络线功率的精确控制。

参考文献

[1] 骆柏锋, 穆云飞, 赵波, 等. 基于统一潮流模型的电—气耦合综合能源系统静态灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 1-7.
LUO Bofeng, MU Yunfei, ZHAO Bo, et al. Static sensitivity analysis of integrated electricity and gas system based on unified power flow model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 1-7.

[2] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 14-23.
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 14-23.

[3] 高扬, 艾芊, 郝然, 等. 交直流混合电网的多智能体自律分散控制[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1158-1164.
GAO Yang, AI Qian, HAO Ran, et al. Autonomous decentralized control of multi-agent system for AC/DC hybrid grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1158-1164.

[4] 董帅, 王成福, 梁军, 等. 计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 8-15.
DONG Shuai, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 8-15.

[5] 徐青山, 曾艾东, 王凯, 等. 基于 Hessian 内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1657-1665.
XU Qingshan, ZENG Aidong, WANG Kai, et al. Day-ahead optimized economic dispatching for combined cooling, heating and power in micro energy-grid based on Hessian interior point method[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1657-1665.

[6] 董帅, 王成福, 徐士杰, 等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 1-8.
DONG Shuai, WANG Chengfu, XU Shijie, et al. Day-ahead optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 1-8.

[7] 杨帅, 陈磊, 徐飞, 等. 基于能量流的电热综合能源系统弃风消纳优化调度模型[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 417-425.
YANG Shuai, CHEN Lei, XU Fei, et al. Optimal dispatch model of wind power accommodation in integrated electrical-thermal power system based on power flow model[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 417-425.

[8] BIDRAM A, DAVOUDI A, LEWIS F L. A multiobjective distributed control framework for islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(3): 1785-1798.

[9] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.

[10] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-18.
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-18.

[11] WU J, GUAN X. Coordinated multi-microgrids optimal control algorithm for smart distribution management

system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2174-2181.

[12] 高扬, 艾芊. 基于多智能体系统的微电网联络线潮流精确控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5):140-146.
GAO Yang, AI Qian. Precise control of tie-line power for microgrid based on multi-agent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 140-146.

[13] KIM M, KWASINSKI A. Decentralized hierarchical control of active power distribution nodes[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 934-943.

[14] 高扬, 艾芊. 含多微网稀疏通信优化的主动配电网分层分布式协调控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 135-141.
GAO Yang, AI Qian. Distributed hierarchical coordinated control of active distribution network with multiple microgrids based on sparse communication network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 135-141.

[15] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121-127.
DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 121-127.

[16] 王守相, 吴志佳, 庄剑. 考虑微网间功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7185-7194.
WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian. Optimal dispatching model of CCHP type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and output coordination among micro-sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7185-7194.

[17] 高扬, 艾芊, 郝然, 等. 交直流混合电网的多智能体自律分散控制[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1158-1164.
GAO Yang, AI Qian, HAO Ran, et al. Autonomous decentralized control of multi-agent system for AC/DC hybrid grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1158-1164.

[18] CHEN Z, ZHANG Y, JI T, et al. Coordinated optimal dispatch and market equilibrium of integrated electric power and natural gas networks with P2G embedded[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 495-508.

[19] CHEN Q, ZHAO X, GAN D. Active-reactive scheduling of active distribution system considering interactive load and battery storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 320-330. DOI: 10.1186/s41601-017-0060-2.

[20] 艾芊, 郝然. 多能互补集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10.
AI Qian, HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10.

[21] WAN C, JIAN Z, SONG Y, et al. Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2016, 1(4): 38-46.

[22] SUI J, HAO L, FENG L, et al. A distributed energy system with advanced utilization of internal combustion engine waste heat[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2018, 4(2): 257-262.

[23] AI Q, FAN S, PIAO L. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-016-0017-x.

[24] 高扬, 艾芊, 王靖. 多智能体系统的交直流混合微网群一致性协同控制[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2372-2377.
GAO Yang, AI Qian, WANG Jing. Consensus cooperative control of AC/DC hybrid microgrids based on multi-agent system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2372-2377.

[25] GAO Yang, AI Qian. A distributed coordinated economic droop control scheme for islanded AC microgrid considering communication system[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 160: 109-118.

[26] 李红梅, 行登江, 高扬, 等. 子模块混联 MMC-HVDC 系统直流侧短路故障电流抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 57-64.
LI Hongmei, XING Dengjiang, GAO Yang, et al. A DC pole-to-pole fault current suppression strategy of the half-and full-bridge based cell-hybrid modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 57-64.

[27] HE Y, CHEN Y, YANG Z, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.

收稿日期：2018-11-01； 修回日期：2018-12-17

作者简介：

张爱祥(1969—)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向为主动配电网运行与控制。E-mail: 2926221051@qq.com

(编辑 葛艳娜)