

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220123

基于双层优化模型的能源互联网自愈及优化运行策略研究

侯旭桐¹, 季亮¹, 刘舒², 田书欣¹, 苏向敬¹, 李振坤¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200090)

摘要: 电网和天然气网通过双向耦合可实现高可靠性运行。为解决电-气耦合的能源互联网故障自愈问题, 提出了一种能源互联网自愈及优化运行方法。首先, 该方法基于电-气耦合特性, 充分利用天然气网对电网的能量补充, 在考虑天然气网经济性和新能源出力不确定性的基础上, 建立双层优化模型, 实现综合能源系统的故障快速自愈及优化运行。上层模型利用基于广度优先搜索法的改进蚁群算法, 优化供电恢复路径, 得到系统开关状态。下层模型基于电-气耦合特性分析, 以天然气网经济性为主要目标, 采用条件风险价值理论(conditional value at risk, CVaR), 同时考虑新能源出力不确定性带来的运行风险, 构建电-气耦合的能源互联网优化重构模型。然后, 对双层优化模型进行求解并进行全局优化, 得到电-气互联型能量调度最优的故障恢复和优化运行方案。最后, 通过IEEE33节点配电网和7节点天然气网耦合的能源互联网仿真模型, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 故障恢复与优化运行; 电-气耦合; 能源互联网; 双层优化模型; 条件风险价值理论

Self-healing and optimal operation strategy of the energy internet based on a bi-level optimization model

HOU Xutong¹, JI Liang¹, LIU Shu², TIAN Shuxin¹, SU Xiangjing¹, LI Zhenkun¹

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: The power grid and natural gas network can achieve highly reliable operation through bidirectional coupling. To solve the fault self-healing problem of the electrical-gas coupled energy internet, a self-healing and optimized operation method of the energy internet is proposed. First, based on the electrical-gas coupling characteristics, the method makes full use of the natural gas network to supplement the grid energy, and considers the economy of the natural gas network and the uncertainty of new energy output to realize fault fast self-healing and optimizing operation of the integrated energy system. The upper model uses the improved ant colony algorithm based on the breadth-first search method to optimize the power supply recovery path to obtain the system switching state. The lower model is based on the analysis of the electrical-gas coupling characteristics and takes the economics of the natural gas network as the main goal. Then it uses the conditional value-at-risk theory (CVaR), and at the same time considers the operational risk brought by the uncertainty of new energy output to build an optimization and reconstruction model of the electricity-gas interconnected energy internet. Then, the two-layer optimization model is analysed and global optimization is carried out. Then optimal fault recovery and operation of the electricity-gas interconnected energy dispatch scheme is obtained. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by an energy internet simulation model coupled with an IEEE 33-node distribution network and a 7-node natural gas network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873159).

Key words: fault recovery and optimized operation; electricity-gas coupling; energy internet; bi-level optimization model; conditional value at risk

0 引言

当前, 能源和环境危机问题愈发严峻, 能源供

需关系日益紧张。能源互联网可兼容传统电网, 充分、广泛和有效地利用可再生能源, 满足用户多样化需求, 有效提高了能源安全性, 提升了新能源消纳水平和综合能源利用效率^[1-4]。随着能源利用终端多能耦合程度的加深以及电转气技术的不断发展, 由电网与天然气网耦合形成的能源互联网, 因具有多能流的互补优势得到大力推广和应用^[5-7]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873159); 国网上海市电力公司科技项目资助(52094019006X); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13D22251900)

故障自愈技术可在故障发生后,通过设计有效的供电恢复方案,实现停电负荷恢复量最大化、运行网络损耗以及开关操作次数最小化等目标^[8-10]。传统故障自愈技术主要以电力网络为对象。目前,故障自愈方案主要从两个方面入手,即风险状态下的重构控制以及故障状态下的恢复控制。针对配电网拓扑结构进行重构控制,文献[11]考虑风电和负荷出力的不确定性,对传统和声搜索算法进行改进,解决了全局数据依赖性较差和易陷于早熟困境等问题;文献[12]考虑负荷需求与DG出力时变特性,利用改进后的灰狼优化算法对配电网进行动态优化重构。对于传统配电网的故障恢复方法,文献[13]提出基于网络拓扑有向遍历用以解决配电网故障恢复问题,主要通过划分自愈单元组对配电网进行分区处理,利用最短的耗时有效解决了配电网故障恢复问题;针对含分布式能源并网的主动配电网故障自愈方案,文献[14]中运用鲁棒优化方法考虑配电网中风光机组出力的不确定性;文献[15]中对分布式光伏发电系统的有功出力进行合理建模,以实现故障后失电负荷量恢复最大化同时满足DG接入后配电网安全运行;文献[16]在主动配电网故障恢复问题中考虑了分布式可再生能源出力的随机性,建立了基于不确定二层规划理论下的主动配电网故障恢复模型。

目前,针对电-气耦合能源互联网故障恢复方案的研究较少。文献[17]考虑在极端事件下的电-气混合系统恢复力问题,提出恢复力分析方法;文献[18]对电-气互联综合能源系统中的故障进行分析,提出一种考虑关键故障筛选的预防-校正协同控制模型;文献[19]针对电网与天然气网耦合特性引起的一系列系统安全运行问题,提出了一种基于相依特性的电-气互联网络故障传播影响分析方法。以上方法均未通过建立能源耦合模型详细分析电-气互联型综合能源系统的高度耦合特性,其中的部分方法也没有涉及具体的故障恢复流程。在故障后,对电网和天然气网的转化关系进行优化、对系统各设备进行协调控制是提高系统可靠性进而实现故障快速恢复的关键。因此,基于电-气耦合特性建立综合能源系统故障恢复模型,设计电-气互联型综合能源系统的故障恢复方案是亟待解决的问题。

为充分发挥多能耦合优势,综合考虑新能源出力的不确定性,本文提出了基于双层优化模型的电-气耦合型能源互联网故障自愈及优化运行方法。该方法基于电-气耦合特性,充分利用天然气网对于电网的能量补充,基于条件风险价值理论构建电-气耦合的能源互联网优化重构模型。在充分考虑天然气

网经济性的基础上,对双层优化模型进行求解并进行全局优化,实现综合能源系统的故障快速自愈及故障后的优化运行。

1 电-气耦合的能源互联网模型

电-气耦合的能源互联网主要由电网和天然气网构成,以能源中心(电转气设备、燃气轮机)作为耦合单元,利用能源转换和存储设备对两个子系统进行能源相互供给,其结构示意图如图1所示。

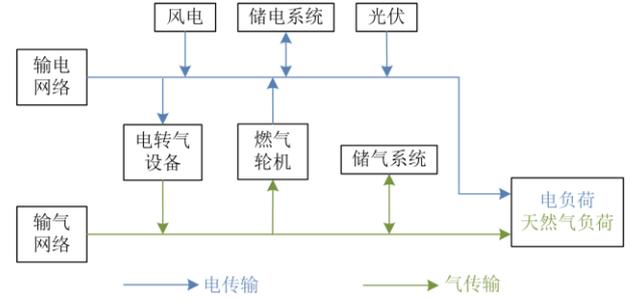


图1 电-气耦合综合能源系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric-gas coupled integrated energy system

1.1 电网子系统模型

电网子系统进行电力系统潮流计算时,通常采用经典的交流潮流模型来表示,本文配电子系统潮流模型表示为支路上传输的有功功率、无功功率和节点的电压-相角关系,具体如式(1)—式(4)所示。

$$S_{ij} = s_i + \sum_{(h,i) \in E_p} (S_{hi} - z_{hi} I_{hi}^2) \quad (1)$$

$$U_i^2 - U_j^2 = 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 \quad (2)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (3)$$

$$(\theta_i - \theta_j) - \frac{x_{ij} P_{ij} - r_{ij} Q_{ij}}{U_i^{(c)} U_j^{(c)}} = 0 \quad (4)$$

式中:下标 i, j, h 表示配电子系统节点标号;下标 ij 表示首端为 i 节点、末端为 j 节点的配电支路; $\forall (i, j, h) \in E_p$, E_p 表示配电系统的支路集合; U_i 、 U_j 分别表示 i 、 j 节点的电压幅值; θ_i 、 θ_j 分别表示 i 、 j 节点的电压相角值; I_{ij} 、 I_{hi} 分别表示流经 ij 、 hi 支路的电流值; r_{ij} 、 x_{ij} 分别表示 ij 支路的电阻值、电抗值; z_{hi} 表示 hi 支路的阻抗值; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别表示流经 ij 支路的有功功率、无功功率; $S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$ 表示流经 ij 支路的复功率; S_{hi} 表示流经 hi 支路的复功率; s_i 表示 i 节点的净复功率,数值为正时表示流入; $U_i^{(c)}$ 、 $U_j^{(c)}$ 分别表示考虑 i 、 j 节点电压幅

值为常数的变量。

1.2 气网子系统模型

天然气网络主要包含气源节点、负荷节点、输气管道和压缩机等元件。本文主要以气网子系统中节点气压和流经支路气体量作为状态量, 在天然气传输过程中, 净流量和节点气压需要满足 Weymouth 方程^[20]。

$$\omega_{mn}^2 = \text{sgn}(P_m - P_n) K_{mn} (P_m^2 - P_n^2), \quad \forall (m, n) \in E_G \quad (5)$$

$$\text{sgn}(P_m - P_n) = \begin{cases} 1 & P_m \geq P_n \\ -1 & P_m < P_n \end{cases} \quad (6)$$

式中: 下标 m 、 n 表示气网的节点标号; 下标 mn 表示首端为 m 节点、末端为 n 节点的输气支路; ω_{mn} 表示气网支路中的气体流量; K_{mn} 表示 mn 支路管道的特性系数; E_G 表示气网的支路节点集合; $\text{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数。

对于任意节点, 都有表示节点气体流量的平衡方程, 如式(7)表示。

$$W_m = \sum_n \omega_{mn}, \quad \forall (m, n) \in E_G \quad (7)$$

式中, W_m 表示 m 节点的净注入流量值。

1.3 电-气耦合转化模型

能源中心是能源互联网中能量转化的核心单元, 其重要功能是从不同能源网络中获得能量, 主要从上级配电系统获得功率或从配气系统获得流量, 并在能源中心内部进行能源转换、存储等以实现多能耦合互补。电-气耦合的能源互联网中, 主要考虑能源转换设备燃气轮机(gas-fired turbine, GFT)和电转气(power-to-gas, P2G)设备双向耦合, 从而实现多能转换互补, 其电-气耦合关系示意图如图2所示。

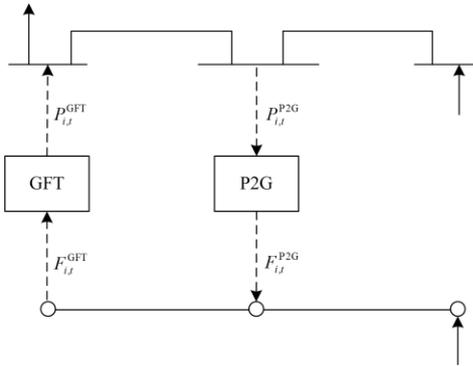


图2 电-气耦合关系示意图

Fig. 2 Coupling relationship of electricity-gas network

1.3.1 微燃机耗气量模型

$$P_{i,t}^{\text{GFT}} = F_{i,t}^{\text{GFT}} \eta_i^{\text{GFT}} G \quad (8)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{GFT}}$ 表示在 t 时刻 GFT_i 所产生的有功功率; $F_{i,t}^{\text{GFT}}$ 表示在 t 时刻 GFT_i 所消耗的天然气量; η_i^{GFT} 表

示消耗天然气转化为电能的发电效率; G 为天然气低热值。

1.3.2 P2G 装置约束模型

$$F_{m,t}^{\text{P2G}} = \frac{\eta_m^{\text{P2G}} P_{m,t}^{\text{P2G}}}{G} \quad (9)$$

式中: $F_{m,t}^{\text{P2G}}$ 表示在 t 时刻电转气设备所产生的天然气量; $P_{m,t}^{\text{P2G}}$ 表示在 t 时刻电转气设备所消耗的有功功率; η_m^{P2G} 表示电转气设备的转换效率。

1.3.3 能源中心模型

能源中心系统表示综合能源系统中多能流的耦合关系, 考虑能源输入与输出, 包含能量枢纽(energy hub, EH)的简单二端口网络模型如图3所示。

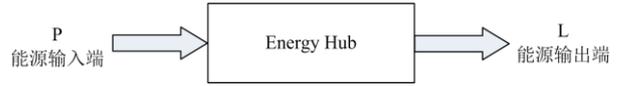


图3 能源中心输入-输出端口模型

Fig. 3 Energy hub input-output port model

本文采用 EH 模型描述电网与天然气网的耦合关系, 其抽象数学模型为

$$\begin{cases} \mathbf{P} = [\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} + \mathbf{Z}_3 \mathbf{R} \\ [\mathbf{Z}_4, \mathbf{Z}_5] \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_E \mathbf{L} - \mathbf{Z}_6 \mathbf{R} \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{P} 表示能源输入端的交换功率向量; \mathbf{S} 表示 EH 内能源转换设备输入向量; \mathbf{Q} 表示 EH 内储能设备出力向量; \mathbf{R} 表示可再生能源并网功率向量; \mathbf{L} 表示 EH 的负荷功率向量; \mathbf{Z}_1 、 \mathbf{Z}_2 、 \mathbf{Z}_3 、 \mathbf{Z}_4 、 \mathbf{Z}_5 、 \mathbf{Z}_6 、 \mathbf{Z}_E 表示常数阵。

2 基于双层优化的故障恢复模型

本文提出考虑电-气耦合的能源互联网故障恢复与优化运行策略, 需要同时考虑上层电网和下层天然气网的特性, 双层优化模型中上、下两层的优化结果可以相互影响, 因此需要采用双层优化模型并对其求解。

2.1 上层模型

上层模型通过优化供电恢复路径得到系统开关状态, 从而确定供电恢复方案。在实现过程中, 需要重点考虑天然气网对于电网的能量补充和电-气耦合特性对于电网供电恢复及优化运行的影响。

2.1.1 目标函数

上层模型的目标函数考虑供电恢复后失电负荷量、开关操作次数、网络损耗等多个子目标, 来实现故障后电网的自愈与优化运行。

子目标一为最大化供电负荷恢复量, 如式(11)所示。

$$\max f_1 = \sum_{i=1}^N c_i \omega_i P_i^{\text{re}} \quad (11)$$

式中: N 表示配电网子系统的负荷节点数; c_i 表示故障恢复后的配电网是否对第 i 个负荷节点供电, 其值取 0 或 1, 当 $c_i = 1$ 时表示故障恢复后的主动配电网对节点 i 进行供电, 当 $c_i = 0$ 时表示故障恢复后不对节点 i 供电; ω_i 表示负荷节点 i 的重要程度; P_i^{re} 表示节点 i 的恢复负荷功率。

子目标二为在恢复过程中最小化开关操作次数, 如式(12)所示。

$$\min f_2 = \sum_{j=1}^M |k_j - g_j| \quad (12)$$

式中: M 表示配电网子系统的开关数量; k_j 表示第 j 条支路上的开关在发生故障前的状态; g_j 表示第 j 条支路上的开关在故障恢复后的状态。 k_j 、 g_j 的值仅取 1 或 0, 1 表示开关闭合, 0 表示开关断开。

子目标三为故障恢复后最小化配电网子系统网络损耗, 如式(13)所示。

$$\min f_3 = \sum_{j \in S} \frac{[(P_{L,j})^2 + (Q_{L,j})^2] R_{L,j}}{U_N^2} \quad (13)$$

式中: S 表示配电网子系统所有支路的集合; $P_{L,j}$ 表示故障恢复后第 j 条支路上传输的有功功率; $Q_{L,j}$ 表示故障恢复后第 j 条支路上传输的无功功率; $R_{L,j}$ 表示第 j 条支路上的电阻值; U_N 为配电网子系统的额定电压值。

为了解决上层模型中多目标形式的目标函数, 需要将各个子目标进行处理, 并计算自适应权重和, 将其作为衡量上层决策中心决策的综合指标, 如式(14)所示。

$$\max F_{\text{up}} = \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \frac{f_2^{\max} - f_2}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} + \frac{f_3^{\max} - f_3}{f_3^{\max} - f_3^{\min}} + \frac{F_{\text{down}}^{\max} - F_{\text{down}}}{F_{\text{down}}^{\max} - F_{\text{down}}^{\min}} \quad (14)$$

式中: F_{up} 表示上层模型的故障恢复综合满意度指标; F_{down} 表示下层模型的目标函数。

2.1.2 约束条件

(1) 配电网子系统辐射运行约束

无论配电网潮流如何流向, 配电网都需要满足辐射状的拓扑结构, 该约束如式(15)所示。

$$g \in G \quad (15)$$

式中: g 表示故障恢复方案中配电网拓扑结构; G 表示所有满足辐射状配电网拓扑结构的集合。

(2) 容量平衡约束

在电-气耦合的能源互联网系统中, 电网节点的容量平衡, 需要考虑来自新能源以及天然气网对电网能量的补充。配电网子系统在故障恢复后每个节点都需要满足容量平衡约束, 该约束如式(16)和式(17)所示。

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (16)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (17)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别表示节点 i 的净有功功率、净无功功率, 数值为正表示流入; G_{ij} 、 B_{ij} 分别表示支路 ij 的电导值、电纳值; $G_{ij} + jB_{ij}$ 表示支路 ij 的导纳值; δ_{ij} 表示节点 i 和节点 j 间的电压相角差。

(3) 支路功率约束

与容量平衡约束相同, 支路功率也需要考虑来自新能源以及天然气网对电网能量的补充。当系统潮流达到平衡时各支路的容量需要满足支路容量约束, 该约束如式(18)所示。

$$P_{ij} \leq P_{ij,\max} \quad (18)$$

式中, $P_{ij,\max}$ 表示 ij 支路上流过的最大有功功率。

(4) 节点电压约束

故障恢复后系统的节点电压需要满足约束如式(19)所示。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (19)$$

式中, $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别表示节点 i 的电压幅值的上、下限。

(5) 储能充放电功率约束

该约束如式(20)所示。

$$E_{\text{ESS}}(t) = E_{\text{ESS}}(t-1) + \mu_{\text{ch}} P_{\text{ESS}}(t) \eta_{\text{ch}} \Delta t - \mu_{\text{dis}} \frac{P_{\text{ESS}}(t)}{\eta_{\text{dis}}} \Delta t \quad (20)$$

式中: $E_{\text{ESS}}(t)$ 表示 t 时段末储能的电量剩余水平; Δt 表示调度时段长; μ_{ch} 、 μ_{dis} 表示储能运行状态, μ_{ch} 与 μ_{dis} 中有且仅有一个值为 1, 当 μ_{ch} 为 1 时表示充电, 此时 $\mu_{\text{dis}} = 0$; $P_{\text{ESS}}(t)$ 表示储能在 t 时段的充放电功率, 将储能看作电源, 则当 $P_{\text{ESS}}(t)$ 大于零时为放电; η_{ch} 表示储能的充电效率; η_{dis} 表示储能的放电效率。

2.2 下层模型

下层模型通过考虑条件风险价值理论的随机规划方法, 建立以天然气网经济性为主要目标的优化

模型。约束条件考虑天然气的流量、节点气压和储气设施以保证天然气网的安全稳定运行。同时, 充分考虑系统发生故障后的天然气备用和为应对新能源出力不确定性而配置的储气设施, 实现电-气耦合综合能源系统运行风险的有效评估, 为上层模型提出的各自愈目标进行优化权重配置, 以得到最优恢复方案。

2.2.1 目标函数

在对电网的开关状态进行更新调整以实现供电恢复的过程中, 需要考虑电-气互联型综合能源系统中的多能耦合效应和新能源出力的不确定性。条件风险价值理论方法^[21]可用于分析风险, 量化未来一段时间内的最大可能损失, 本文采用 CVaR 理论构建电-气耦合的能源互联网优化重构模型, 利用 CVaR 值来描述新能源不确定性带来的风险。

(1) CVaR 理论

该理论最初用于不同金融工具构成的复杂的投资组合。具体指的是, 在一定的置信水平 β 下, 对任一决策 x , 系统存在不确定因素 ξ_s 扰动造成的损失成本为 $H(x, \xi_s)$, 引入辅助变量 z , 构造关于 z 的最小化优化问题对 CVaR 进行求解^[22], 具体公式如式(21)所示。

$$\text{CVaR}_\beta(x) = \min_{z \in R} z + \frac{1}{1-\beta} \sum_{s=1}^S P_s \max\{H(x, \xi_s) - z, 0\} \quad (21)$$

式中: ξ_s 表示在 ξ 中抽取的第 s ($s=1, 2, \dots, S$) 个样本; P_s 表示样本 s 对应的发生概率。

(2) 目标函数

下层决策者以运行成本和风险成本 CVaR 的最小值作为目标函数, 具体公式如式(22)所示。

$$F_{\text{down}} = \min f_{\text{CVaR}} = \alpha \sum_{s=1}^S P_s C_s + (1-\alpha) \left(z + \frac{1}{1-\beta} \sum_{s=1}^S P_s (C_s - z) \right) \quad (22)$$

式中: α 表示经济调度期望成本与 CVaR 值间的权重系数, $\alpha \in [0, 1]$; f_{CVaR} 表示考虑 CVaR 的系统故障恢复后的运行总成本; C_s 表示在场景 s 下的经济调度成本。

2.2.2 约束条件

(1) 天然气网系统节点流量约束

在故障恢复后天然气网中的天然气流量需满足流量平衡约束, 具体公式为

$$W_m - W_m^l - W_m^{\text{EH}} - \sum_{n \in E_g} \omega_{mn} = 0 \quad (23)$$

式中: W_m^l 表示天然气网节点 m 的天然气负荷量;

W_m^{EH} 表示与节点 m 相连的能源中心 EH 的用量; $\sum_{n \in E_g} \omega_{mn}$ 表示与节点 m 相连的所有支路的天然气流量之和。

(2) 天然气网节点气压上下限

天然气网在故障恢复后各节点需要满足气压上下限约束, 具体公式为

$$P_{m,\text{min}} \leq P_m \leq P_{m,\text{max}} \quad (24)$$

式中: P_m 表示节点 m 的气压值; $P_{m,\text{max}}$ 、 $P_{m,\text{min}}$ 分别表示节点 m 允许的气压上、下限。

(3) 储气设施约束

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} + (F_{i,t-1}^{\text{in}} - F_{i,t-1}^{\text{out}}) \Delta t \quad (25)$$

$$S_i^{\text{min}} \leq S_{i,t} \leq S_i^{\text{max}} \quad (26)$$

$$0 \leq F_{i,t}^{\text{in}} \leq F_{i,t}^{\text{in,max}} \quad (27)$$

$$0 \leq F_{i,t}^{\text{out}} \leq F_{i,t}^{\text{out,max}} \quad (28)$$

式中: $S_{i,t}$ 表示节点 i 储气设备在 t 时刻的剩余气量; S_i^{max} 、 S_i^{min} 分别表示储气设备容量上、下限; $F_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $F_{i,t}^{\text{out}}$ 分别表示 t 时刻的输入、输出流量; $F_{i,t}^{\text{in,max}}$ 、 $F_{i,t}^{\text{out,max}}$ 分别表示 t 时刻的输入、输出流量最大值。

3 双层优化模型求解

通常考虑故障期间电能网络和气能网络的能源互补协调, 为故障恢复方案提供支撑, 用以解决电-气互联型综合能源系统的故障恢复问题。上层模型与下层模型的决策会相互影响, 上层决策中心需要依据下层运行优化部门对自身决策的反馈结果来制定自身决策。具体的电-气互联型综合能源系统的故障自愈方法综合模型结构示意图如图 4 所示。

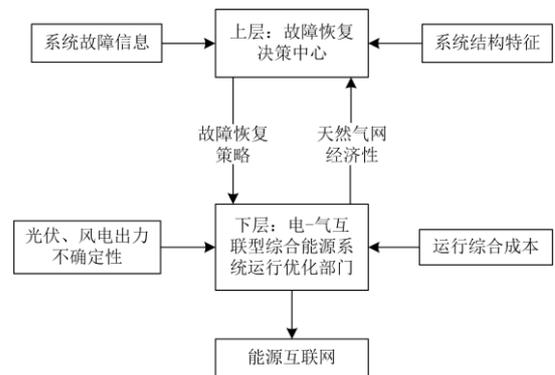


图 4 电-气互联型综合能源系统故障自愈方法模型结构

Fig. 4 Model structure of fault self-healing method for electric-gas interconnected integrated energy system

本文对双层优化模型进行求解并进行全局优化, 首先在上层故障恢复决策中心确定故障恢复方

案,然后下层电-气互联型综合能源系统运行优化部门根据上层决策中心给出的故障恢复方案进行跟进,最终使得上、下层决策达到平衡。

3.1 上层模型求解过程

本文的上层模型采用基于广度优先搜索法的改进蚁群算法进行求解,求解流程如下:

(1) 输入电-气互联型综合能源系统的系统网架参数信息,设置故障点位置;

(2) 应用改进蚁群算法得到初始的故障恢复方案,并检测故障恢复方案是否满足综合能源系统中电网辐射结构;

(3) 调用下层优化模型,得到下层电-气互联型综合能源系统运行优化部门反馈的运行结果;

(4) 通过下层模型反馈给上层模型的系统运行方案,采用随机潮流计算得到各个节点的电压分布和各条支路的传输功率信息;

(5) 计算上层模型中的目标函数,结合步骤(4)以及式(14),最终得到最优解。

3.2 下层模型求解过程

对于上层模型而言,下层优化模型可以看作是其调用的函数,上层模型提供的恢复方案是下层模型优化的基础。求解的流程如下:

(1) 初始化故障预期消除时间范围内能源中心出力以及风电、光伏出力的随机分布;

(2) 根据上层决策者给出的故障恢复方案,计算配电网综合运行成本及风险成本作为目标函数;

(3) 将(2)中计算得到的下层运行优化部门的目标函数值输入到上层目标函数中,最终得到最优解及其对应的配电网能量优化调度方案。

4 算例分析

4.1 仿真模型

本文采用的电-气互联型综合能源系统主要包括 IEEE33 节点的配电系统、连接有 2 个天然气外网的 7 节点天然气系统以及 2 个能源中心,对其进行仿真分析。IEEE33 节点配电系统网架和负荷的详细数据见文献[23]。模型中,在关键节点并入了 6 个分布式光伏电站,5 个分布式风电场以及 1 个储能设备,如图 5 所示。图 5 的下半部分为气网基本结构,并入了 2 个能源转换中心、1 个储气设备。其中实线表示正常运行时闭合的配电网馈线支路,虚线表示正常运行时断开的联络线支路。电网和天然气网设备的容量如表 1 和表 2 所示。

针对不确定性问题,本文采用预测值为均值的正态分布模型处理风电、光伏和电/气负荷,采用拉丁超立方采样并用同步回代消除算法缩减到 50 个

场景进行分析。

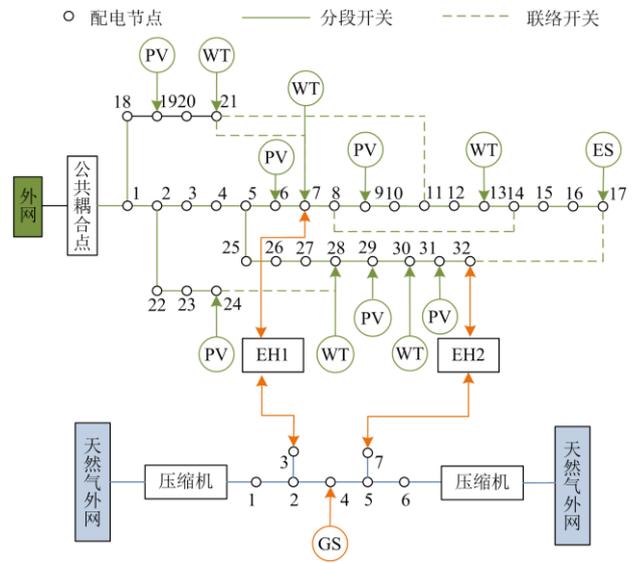


图 5 基于 IEEE33 节点系统的电-气互联型综合能源系统网架结构

Fig. 5 Electric-gas interconnection integrated energy system grid structure based on IEEE33-node system

表 1 电网设备容量

Table 1 Distribution network equipment capacity

设备名称	并网节点	并网容量/kW		
分布式光伏	PV1	6	300	
	PV2	9	350	
	PV3	19	350	
	发电	PV4	24	500
		PV5	29	200
		PV6	31	650
分布式风力发电	WT1	7	350	
	WT2	13	350	
	WT3	21	500	
	WT4	28	250	
	WT5	30	600	
储能设备	ES	17	450	

表 2 天然气网设备容量

Table 2 Gas network equipment capacity

设备名称	并网节点	并网容量/kW	
能源中心	EH1	7	1200
	EH2	32	1200

电-气互联型主动配电网中的所有节点均为负荷节点,系统负荷容量为(3715+j2300) kVA。主动配电网中的负荷节点按其重要程度分为 3 个等级,分类情况具体如表 3 所示。

表 3 配电网节点负荷等级

Table 3 Distribution network node load level

负荷重要程度	负荷节点集合	权重系数
一级负荷	1,2,5,7,11,28,32	1
二级负荷	6,8,9,13,17,19,21,24,28,29,30,31	0.5
三级负荷	3,4,10,12,14,15,16,18,20,22,23,25,26,27	0.1

算例中分别设置两种形式的故障并制定故障恢复计划和电-气互联计划。方式一为支路 7-8 发生永久性故障；方式二为靠近公共耦合点的支路 1-2 发生永久性故障。故障期间电网风光出力区间不确定性、负荷预测功率如图 6 所示。

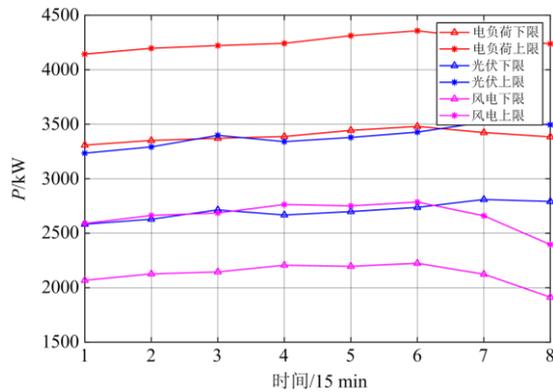


图 6 电网风光出力区间不确定性、负荷预测功率

Fig. 6 Uncertainty of power grid wind-solar output interval and load forecast power

4.2 故障恢复结果及其分析

运行本文建立的电-气互联型综合能源系统双层故障恢复模型，得到方式一和方式二下的系统故障恢复方案分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 方式一下系统故障恢复方案

Table 4 Fault restoration scheme in mode I

故障支路	7-8
断开支路	7-20,13-14,27-28,31-32
合上支路	8-14,11-21,17-32,24-28
开关操作次数	8
故障期间电网损耗/kW	111.16

表 5 方式二下系统故障恢复方案

Table 5 Fault restoration scheme in mode II

故障支路	1-2
断开支路	7-8,13-14,23-24,29-30
合上支路	7-20,8-14,11-21,17-32,24-28
开关操作次数	9
故障期间电网损耗/kW	287.89

由表 4 和表 5 可以看出,当电-气互联型主动配电网中不同支路发生故障时,其故障恢复方案也存在较大差异。由于故障方式二更靠近与上级配电网相连接的公共耦合点,因此方式二的故障较方式一严重的多,这导致方式二的主动配电网故障恢复方案比方式一下的更加复杂,开关操作次数多,故障期间电网损耗大。在分布式电源、储能以及天然气管网的支撑下,故障后的主动配电网通过开关状态的改变更新网络拓扑结构,在实现故障自愈的同时满足网损最小化。

为了验证电-气互联型综合能源系统在故障恢复过程中天然气管网对配电网的支撑作用,本文针对上述提到的两种故障方式中的故障方式一进行分析,并分别在不计及电-气互联和计及电-气互联的情形下运行故障恢复模型,得到故障恢复前后主动配电网各个节点的电压分布如图 7—图 9 所示。

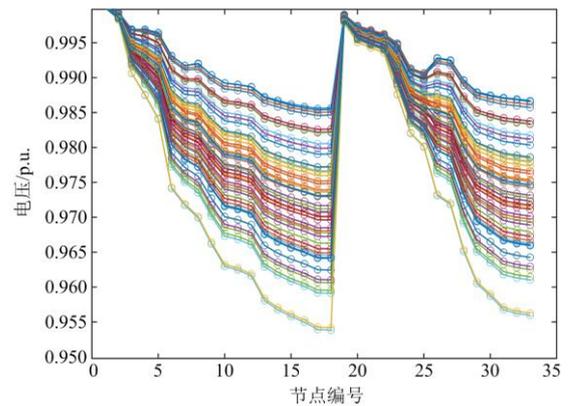


图 7 故障恢复前主动配电网电压分布

Fig. 7 Active distribution network voltage distribution before fault recovery

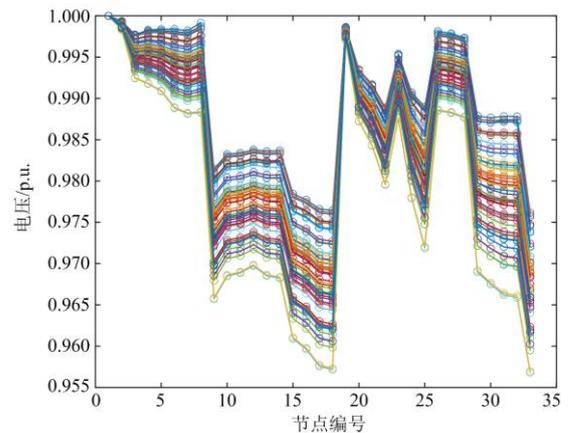


图 8 故障方式一: 不计及电-气互联时故障恢复后电压分布

Fig. 8 Fault mode I: voltage distribution after fault recovery when electrical-gas interconnection is not considered

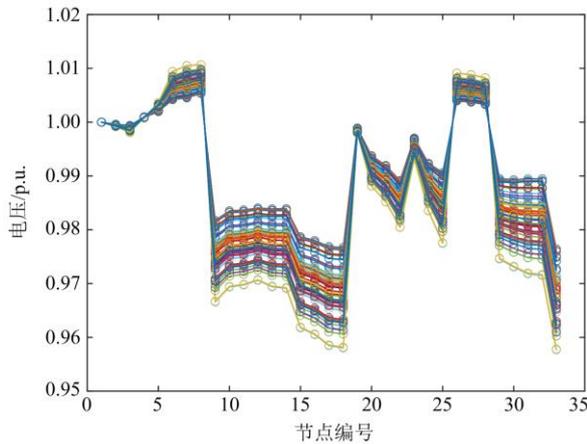


图9 故障方式一：计及电-气互联时故障恢复后电压分布
Fig. 9 Fault mode I: voltage distribution after fault recovery taking into account the electrical-gas interconnection

由图7—图9可以看出，运用本文故障恢复方法，故障恢复后可有效改善主动配电网的节点电压分布；由图8和图9可以看出，系统可在故障期间制定合理的电-气互联计划，对故障恢复方案提供支撑，保证主动配电网电压分布波动程度较小。

4.3 不确定性分析

本节分析2 h内(以15 min为1个时间段)风电、光伏发电以及储能不确定性对故障恢复结果的影响，在下层模型中，电-气互联型综合能源系统中的主动配电网故障后需要制定系统能量优化调度计划，反馈给上层决策中心。故障方式一和方式二下的主动配电网故障恢复后各项指标对比如表6和表7所示。

表6 方式一下电-气互联型综合能源系统故障恢复后指标
Table 6 Indicators after failure of electric-gas interconnected integrated energy system in mode I

时间段	损耗/kW	最大电压偏差/p.u.	产气量 W_m/m^3	P_{gas}/kW
1	111.16	0.0406	97.97	26.6
			83.02	1412.0
2	111.80	0.0409	98.11	29.3
			83.12	1418.0
3	108.46	0.0394	97.57	24.7
			82.63	1386.5
4	112.33	0.0411	98.24	32.0
			83.21	1423.0
5	114.74	0.0421	98.72	41.5
			83.63	1445.2
6	115.28	0.0424	98.86	45.2
			83.74	1450.1
7	107.09	0.0388	97.39	24.6
			82.44	1373.3
8	104.95	0.0379	96.99	20.0
			82.10	1352.3

表7 方式二下电-气互联型综合能源系统故障恢复后指标
Table 7 Indicators after failure of electric-gas interconnected integrated energy system in mode II

时间段	损耗/kW	最大电压偏差/p.u.	产气量 W_m/m^3	P_{gas}/kW
1	287.89	0.0324	117.28	977.6
			100.57	1755.0
2	290.26	0.0322	117.56	996.7
			100.84	1755.0
3	283.81	0.0328	116.76	945.1
			100.15	1754.3
4	292.33	0.0320	117.80	1013.2
			101.06	1755.0
5	298.80	0.0314	118.51	1064.1
			101.80	1755.0
6	300.63	0.0312	118.69	1078.3
			102.03	1755.0
7	282.21	0.0329	116.53	933.0
			100.00	1753.2
8	277.08	0.0334	115.87	892.4
			99.44	1751.0

由表6和表7可以看出，故障方式二由于是靠近公共耦合点的支路1-2发生永久性故障，其故障严重程度与故障方式一相比更严重，因此其网络损耗高于方式一。在2 h内8个时段里的损耗数据可以看出，故障方式二的产气量明显高于故障方式一，由于高渗透率的分布式电源、储能以及天然气网的支撑作用，使较严重的故障方式二与故障方式一的电压偏差保持在同一水平。这也说明下层模型制定的系统能量优化调度方案有利于上层模型实现故障恢复。

5 结论

为解决电-气耦合的能源互联网故障自愈问题，提出了一种能源互联网自愈及优化运行方法，通过分析得到以下主要结论。

(1) 利用能源互联网中的电-气耦合特性，充分发挥天然气网对电网的能量补充，实现电网故障恢复及优化运行的互补共济。

(2) 基于分布式新能源、储能以及天然气网的支撑，故障下的主动配电网通过开关状态的改变更新网络拓扑结构从而迅速实现故障自愈且实现网损最小化。

(3) 采用条件风险价值理论，考虑新能源出力不确定性带来的运行风险及天然气网的经济性，构建电-气互联的能源互联网优化重构模型，提高能源互联网故障自愈的可靠性和经济性。

参考文献

- [1] 唐杰, 吕林, 叶勇, 等. 多时间尺度下主动配电网源-储-荷协调经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 53-64.
TANG Jie, LÜ Lin, YE Yong, et al. Source-storage-load coordinated economic dispatch of an active distribution network under multiple time scales[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 53-64.
- [2] 张爱祥, 宋士瞻, 高扬, 等. 含能源互联微网的主动配电网分层分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 131-138.
ZHANG Aixiang, SONG Shizhan, GAO Yang, et al. Hierarchical distributed coordinated control of active distribution network including energy interconnection micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 131-138.
- [3] 骆柏锋, 穆云飞, 赵波, 等. 基于统一潮流模型的电一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.
- [4] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55.
- [5] ZHU Mengting, XU Chengsi, DONG Shufeng, et al. An integrated multi-energy flow calculation method for electricity-gas-thermal integrated energy systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 65-76.
- [6] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.
LI Licheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.
- [7] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 计及电转气的电气互联综合能源系统削峰填谷研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4601-4609.
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609.
- [8] JAIN T, GHOSH D, MOHANTA D K. Augmentation of situational awareness by fault passage indicators in distribution network incorporating network reconfiguration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 323-336.
- [9] 李振坤, 何苗, 苏向敬, 等. 基于生物体免疫机制的智能配电网故障恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7924-7936.
LI Zhenkun, HE Miao, SU Xiangjing, et al. Smart distribution network fault recovery method based on biology immune mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7924-7936.
- [10] 刘坤, 赵丽萍, 李建萍, 等. 考虑开关状态集调整的含光伏并网配电网动态故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 24-31.
LIU Kun, ZHAO Liping, LI Jianping, et al. Dynamic fault recovery method of a photovoltaic distribution network considering switch state set adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 24-31.
- [11] 吴建旭, 于永进. 基于改进和声搜索算法的多目标配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 78-86.
WU Jianxu, YU Yongjin. Multi-objective distribution network reconfiguration optimization based on an improved harmony search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 78-86.
- [12] 田书欣, 刘浪, 魏书荣, 等. 基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 1-11.
TIAN Shuxin, LIU Lang, WEI Shurong, et al. Dynamic reconfiguration of a distribution network based on an improved grey wolf optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 1-11.
- [13] 陈春, 吴宜桐, 李镒, 等. 基于网络拓扑有向遍历的配电网故障快速恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 44-52.
CHEN Chun, WU Yitong, LI Meng, et al. Method for fast recovery from distribution network fault based on directed traversal of network topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 44-52.
- [14] LI Yong, XIAO Juanxia, CHEN Chun, et al. Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,

- 10(4): 4138-4150.
- [15] 刘刚, 陈莎, 全进, 等. 含分布式电源接入的配电网故障恢复方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 50-56.
LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, et al. Fault restoration method for power distribution networks considering distributed generations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 50-56.
- [16] 马天祥, 程肖, 贾伯岩, 等. 基于不确定二层规划模型的主动配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 48-57.
MA Tianxiang, CHENG Xiao, JIA Boyan, et al. Service restoration method for active distribution network based on uncertain bi-level programming model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 48-57.
- [17] 齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 等. 极端事件下电-气混联综合能源系统的恢复力分析[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 41-51.
QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Resilience analysis of integrated electricity and natural gas energy system under extreme events[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 41-51.
- [18] 梅建春, 卫志农, 张勇, 等. 考虑关键故障筛选的电-气互联综合能源系统混合控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 23-33.
MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Hybrid control of integrated power and gas energy systems based on significant contingency screening[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 23-33.
- [19] 苏洁莹, 邓丰强, 张勇军. 考虑相依特性的电-气互联网络故障评估方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 32-39.
SU Jieying, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun. Failure assessment method of integrated electricity and natural gas network considering interdependent characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 32-39.
- [20] 卢志刚, 刘浩然, 何良策. 计及时段粒化的电-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 266-276.
LU Zhigang, LIU Haoran, HE Liangce. Low-carbon economic dispatch of integrated electricity and natural gas systems considering period granulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 266-276.
- [21] 陈泽兴, 张勇军, 黄豫, 等. 基于条件风险价值的综合能源配电网优化重构方法研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 590-599.
CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, HUANG Yu, et al. Optimal reconfiguration of distribution networks in integrated energy systems based on conditional value at risk[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 590-599.
- [22] ROCKAFELLAR R T, URYASEV S. Optimization of conditional value-at-risk[J]. The Journal of Risk, 2000, 2(3): 21-41.
- [23] KERSTING W H. Radial distribution test feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 975-985.

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-03-15

作者简介:

侯旭桐(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自愈控制等; E-mail: 605819279@qq.com

季亮(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统保护、新能源并网控制等。E-mail: jihome2002@sina.cn

(编辑 魏小丽)