

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200610

基于鲁棒优化的电-气互联型主动配电网故障恢复方法

刘家权¹, 刘 坤², 周金涛³, 李亚国⁴, 赵丽萍⁵

(1. 国网重庆电力有限公司, 重庆 400000; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100000; 3. 国网冀北电力有限公司智能配电网中心, 河北 秦皇岛 066100; 4. 国网山西省电力有限公司, 山西 太原 030021; 5. 国网冀北电力有限公司张家口供电公司, 河北 张家口 075001)

摘要: 电-气互联型主动配电网作为能源利用的重要形式, 其故障恢复对于提升系统供电可靠性至关重要。针对电-气互联型主动配电网故障恢复问题, 计及系统不确定性采用鲁棒优化理论建立故障恢复方法。模型以风光出力和故障恢复方案分别为自然决策者和系统决策者, 令两者进行博弈。其中以最大化失电负荷量为目标函数, 计及区间形式不确定性约束建立自然决策者模型。以最小化失电负荷量, 计及电气互联约束、电能网络辐射状约束, 功率平衡约束、电能网络运行约束建立系统决策者模型。基于两阶段松弛法设计故障恢复鲁棒优化模型的求解步骤。最后通过一个算例验证了所建立模型的有效性。

关键词: 电-气互联; 主动配电网; 故障恢复; 鲁棒优化; 两阶段松弛法

Fault recovery method of an integrated electricity and natural-gas active distribution network based on robust optimization

LIU Jiaquan¹, LIU Shen², ZHOU Jintao³, LI Yaguo⁴, ZHAO Liping⁵

(1. State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400000, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Corporation, Beijing 100000, China; 3. Smart Distribution Network Center, State Grid Jibei Electric Power Corporation, Qinhuangdao 066100, China; 4. State Grid Shanxi Electric Power Corporation, Taiyuan 030021, China; 5. Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Corporation, Zhangjiakou 075001, China)

Abstract: Fault recovery in an integrated electricity and natural-gas Active Distribution Network (ADN) is very important for improving the reliability of the system. To solve the problem of fault recovery in an integrated electricity and natural-gas ADN, a robust optimization theory is used considering system uncertainty. In the model, the wind photovoltaic output and the fault recovery scheme are considered as natural decision-makers and system decision-makers respectively to make them game. The natural decision-maker model is established with maximizing the power loss load as the objective function, taking into account the uncertainty constraints of the interval form; the system decision-maker model is established with minimizing the power loss load, taking into account the constraints of electricity and natural-gas integration, and radiation, power balance and operation constraints of the electrical energy network. Based on a two-stage relaxation method, the solution steps for the robust optimization model are designed. Finally, an example is given to verify the validity of the model.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873225) and the Beijing-Tianjin-Hebei Cooperation Special Program of Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2016203507).

Key words: electricity gas interconnection; active distribution network; fault recovery; robust optimization; two-stage relaxation method

0 引言

为应对能源与环境危机, 近些年来包括分布式

风电和分布式光伏在内的可再生能源得到了迅猛发展^[1-3]。主动配电网作为提升对分布式可再生能源的管理水平的重要手段, 对于提升风光消纳率以及系统运行可靠性有着重要意义^[4-7]。随着电转气技术的不断发展以及包括综合能源系统在内的能源互联技术不断成熟, 电转气技术的商业应用潜力也随着不

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873225); 河北省自然科学基金京津冀合作专项项目资助(F2016203507)

断提升。在当前新能源并网规模越来越大并且电网调峰压力越来越大的形势下, 包括电转气技术在内的电能存储技术正成为人们关注的重点, 因此电转气技术的商业应用前景非常广阔, 具备有效降低电网调峰压力, 提升系统供电可靠性的潜力。同时如何计及电-气互联型主动配电网的运行特性制定其故障恢复模型也成为了一门重要课题。

目前已有较多文献对配电网故障恢复问题进行了建模和研究, 这一方面包括针对传统配电网的故障恢复建模, 比如文献[8]提出可操作开关集的概念, 建立了非故障失电区域的供电恢复重构模型, 所建立的模型通过缩小寻优空间提升求解性能。文献[9]充分利用失电区的网络呈辐射状的特点, 把问题转化为待恢复树切割问题, 大大降低了问题的复杂度。另一方面则是针对含分布式发电并网的主动配电网进行故障恢复建模, 比如文献[10]基于不确定二层规划理论建立了主动配电网故障恢复模型, 文献[11]针对含分布式光伏发电并网的配电网运行不确定性, 采用随机机会约束规划理论建立系统的故障恢复模型, 但是只考虑到了分布式光伏。此外例如文献[12]基于时序模型针对综合能源系统建立故障恢复模型, 然而并没有考虑系统的不确定性。而在故障恢复模型求解领域, 配电网故障恢复求解方法主要有启发式搜索方法和遗传算法^[13-14]、禁忌搜索算法^[15], 近年来, 蚁群算法^[16]、多代理理论^[17]、二进制粒子群算法^[18]等前沿智能算法也开始被应用在了配电网故障恢复领域, 取得了较好的效果。

目前还很少有文献基于鲁棒优化理论针对电-气互联型配电网建立其故障恢复模型。主动配电网中分布式风电和光伏的出力具备不确定性, 这将直接影响到故障恢复指标。主动配电网故障恢复的首要目的是恢复失电负荷, 此时系统经济性因素处于次要位置, 而鲁棒优化理论正是为了解决这样的问题, 即系统能够计及风光出力不确定性最不利的情况制定适用的故障恢复方案, 保障系统可靠性的实现。在鲁棒优化理论中, 将环境不确定性即风光出力区间形式不确定性视作自然决策者, 其模型目标是破坏故障恢复指标, 将主动配电网故障恢复中心视作系统决策者, 其策略的目标是最小化失电负荷量, 同时令两者进行博弈, 通过模拟博弈过程选取合适的方法对主动配电网鲁棒优化故障恢复模型进行求解。

本文针对电-气互联型主动配电网故障恢复问题, 基于鲁棒优化理论建立电-气互联型主动配电网

故障恢复方法。通过计及故障期间电能网络和气能网络的互补协调对故障恢复方案提高支撑, 同时考虑风光出力区间形式的不确定性, 使得建立的故障恢复方案具备较好的鲁棒性。最后通过一个算例验证了所建立模型的正确性和有效性。

1 电-气互联型主动配电网故障恢复

1.1 目标函数

将主动配电网故障恢复模型中能够影响目标函数的变量分为两类, 其中以系统能够决策并实施的控制变量作为系统决策者, 以系统不能够决策的影响变量作为自然决策者。

自然决策者的控制变量为 $x_{\text{nat}} = [\hat{P}_{\text{PV}}, \hat{P}_{\text{WT}}]$, 其中 \hat{P}_{PV} 和 \hat{P}_{WT} 分别为故障期间光伏出力偏差向量和风电出力偏差向量。系统决策者的控制变量包括主动配电网在故障期间的开关状态, 电气互联计划以及风光实际消纳计划, 该控制变量为 $x_{\text{sys}} = [\mathbf{K}, \mathbf{P}_{\text{P-G}}, \mathbf{P}_{\text{grid}}, \mathbf{P}_{\text{SB}}, \mathbf{P}_{\text{WT,AB}}, \mathbf{P}_{\text{PV,AB}}]$, 其中, \mathbf{K} 为开关状态集, $\mathbf{P}_{\text{P-G}}$ 、 \mathbf{P}_{grid} 、 \mathbf{P}_{SB} 、 $\mathbf{P}_{\text{WT,AB}}$ 和 $\mathbf{P}_{\text{PV,AB}}$ 分别为电气互联计划, 购售电功率计划、储能运行计划、风电消纳计划和光伏消纳计划。

配电网故障恢复计划的最主要目的是降低失电负荷量, 提升供电可靠性。因此系统决策者的目标是最小化主动配电网在故障期间的失电负荷量, 而自然决策者作为破坏者, 其策略制定目的则是充分最大化该失电负荷量。失电负荷量如式(1)所示。

$$P_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^N u_j(t) c_j P_j(t) \quad (1)$$

式中: N 为主动配电网的负荷节点数; $u_j(t)$ 为 t 时段第 j 个负荷节点失电系数, 当 $u_j(t) = 1$ 时表示第 j 个负荷节点发生了失电; $u_j(t) = 0$ 时表示第 j 个负荷节点没有发生失电; c_j 为第 j 个负荷节点的重要程度权重; $P_j(t)$ 为第 j 个节点 t 时段的负荷水平。

由式(1)可得系统决策者和自然决策者的目标函数, 分别如式(2)和式(3)所示。

$$\min_{x_{\text{sys}}} f(x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) = \sum_{j=1}^N u_j(t) c_j P_j(t) \quad (2)$$

$$\max_{x_{\text{nat}}} f(x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) = \sum_{j=1}^N u_j(t) c_j P_j(t) \quad (3)$$

1.2 约束条件

自然决策者的策略受到风光出力不确定性的约束, 而配电网鲁棒优化故障恢复模型中风光出力不确定性采用区间形式描述如式(4)所示。

$$\begin{cases} \bar{P}_{PV}(t) = \bar{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{PV}(t) \\ \hat{P}_{PV}(t) \in [\hat{P}_{PV,\min}(t), \hat{P}_{PV,\max}(t)] \\ \bar{P}_{WT}(t) = \bar{P}_{WT}(t) + \hat{P}_{WT}(t) \\ \hat{P}_{WT}(t) \in [\hat{P}_{WT,\min}(t), \hat{P}_{WT,\max}(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\bar{P}_{PV}(t)$ 和 $\bar{P}_{WT}(t)$ 分别为分布式光伏和分布式风电在时段 t 的实际出力； $\bar{P}_{PV}(t)$ 为对分布式光伏在时段 t 的预测出力； $\hat{P}_{PV}(t)$ 表示分布式光伏在时段 t 实际出力和预测出力的偏差； $\hat{P}_{PV,\min}(t)$ 和 $\hat{P}_{PV,\max}(t)$ 分别表示该偏差的最小值和最大值； $\bar{P}_{WT}(t)$ 为配电网对分布式风电在时段 t 的预测出力； $\hat{P}_{WT}(t)$ 表示分布式风电在时段 t 实际出力和预测出力的偏差； $\hat{P}_{WT,\min}(t)$ 和 $\hat{P}_{WT,\max}(t)$ 分别为该偏差的最小值和最大值。则自然决策者策略的约束条件如式(5)所示。

$$\begin{cases} \hat{P}_{PV}(t) \in [\hat{P}_{PV,\min}(t), \hat{P}_{PV,\max}(t)] \\ \hat{P}_{WT}(t) \in [\hat{P}_{WT,\min}(t), \hat{P}_{WT,\max}(t)] \end{cases} \quad (5)$$

系统决策者策略的约束条件包括电气互联约束、电能网络辐射状约束、功率平衡约束、电能网络运行约束。

1) 电-气互联约束。电气互联约束对主动配电网制定的电气互联计划以及天然气网络的运行计划进行约束，包括天然气网络的节点气量平衡约束、天然气管道流量约束、气能网络节点气压约束、储气罐运行约束以及电转气约束，如式(6)所示。其中节点气量平衡约束针对任意节点 m 成立，管道流量约束针对任意节点 m 连接的每一条支路均成立。

$$\begin{cases} \sum_{k \in l(m)} G_k(t) + G_m^T(t) + \frac{\eta_{P-G} \cdot P_{P-G}(t)}{L_{ng}} = G_m^L(t) + \frac{P_{MT}(t)\Delta t}{L_{ng}\eta_{MT}} \\ G_{m,n}(t) \leq G_{\max}(t), \forall n \in l(m); \pi_m^{\min} \leq \pi_m(t) \leq \pi_m^{\max} \\ G_{m,n}(t) = \text{sgn}[\pi_m(t) - \pi_n(t)] \cdot K_{mn} \cdot \sqrt{|\pi_m^2(t) - \pi_n^2(t)|} \\ Q_m^T(t) = Q_m^T(t-1) - G_m^T(t) \\ Q_{m,\min}^T \leq Q_m^T(t) \leq Q_{m,\max}^T; G_{m,\min}^T \leq G_m^T(t) \leq G_{m,\max}^T \\ 0 \leq P_{P-G}(t) \leq P_{P-G,\max}; 0 \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT,\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $l(m)$ 为与节点 m 相联接的管道支路集合，在气能网络中一般将压缩机视作节点； $G_k(t)$ 为 t 时段支路 k 的天然气流量，当 $G_k(t) > 0$ 时表示流入节点 m ； $G_m^T(t)$ 为 t 时段节点 m 储气罐的运行气量，当 $G_m^T(t) > 0$ 时表示储气罐运行在放气状态； $G_m^L(t)$ 为 t 时段节点 m 的天然气负荷气量； $P_{MT}(t)$ 为微燃机(Micro gas turbine, MT)在 t 时段的出力； $\eta_{MT}(t)$ 为微

燃机在 t 时段的运行效率； L_{ng} 为天然气热值； η_{P-G} 为电转气效率； $P_{P-G}(t)$ 为 t 时段电转气功率； $G_{m,n}(t)$ 为节点 m 向节点 n 的支路传输气量； $G_{\max}(t)$ 为天然气网络的支路最大传输气量； $\text{sgn}()$ 为符号函数； π_m^{\min} 和 π_m^{\max} 分别为节点 m 气压下限和上限； K_{mn} 为天然气管道支路的Weymouth特性参数^[19]； $Q_m^T(t)$ 和 $Q_m^T(t-1)$ 分别为节点 m 储气罐在 t 时段和 $t-1$ 时段的剩余气量； $Q_{m,\min}^T$ 和 $Q_{m,\max}^T$ 分别为节点 m 储气罐剩余气量的最小值和最大值； $G_{m,\min}^T$ 和 $G_{m,\max}^T$ 分别为节点 m 储气罐充放气量的下限和上限； $P_{P-G,\max}$ 为电转气(P2G, Power-to-Gas)机组的最大运行功率； $P_{MT,\max}$ 为微燃机的最大出力。

2) 电能网络辐射状约束。该约束规定了能够制定的开关状态集集合，如式(7)所示。配电网网络拓扑用一个控制变量向量 \mathbf{g} 表示，该向量中元素即各个支路的状态(除了故障支路状态是设定的无法调整)，表征了网络拓扑结构。在寻优过程中算法会对 \mathbf{g} 进行寻优并进行辐射状验证，就实现了对网络拓扑的调整。

$$\mathbf{g} \in \mathbf{G} \quad (7)$$

式中： \mathbf{g} 为故障恢复计划制定开关状态集下的电能网络拓扑结构； \mathbf{G} 为满足辐射状的开关状态集合；采用广度优先搜索法^[20]对网络辐射状约束进行验证。

3) 电能网络功率平衡约束。该约束为

$$P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{MT}}(t) + P_{\text{WT,AB}}(t) + P_{\text{PV,AB}}(t) + P_{\text{ESS}}(t) = P_L(t) + P_{\text{loss}}(t) + P_{\text{P-G}}(t) \quad (8)$$

式中： $P_{\text{grid}}(t)$ 、 $P_{\text{MT}}(t)$ 、 $P_{\text{PV,AB}}(t)$ 、 $P_{\text{WT,AB}}(t)$ 、 $P_{\text{ESS}}(t)$ 、 $P_L(t)$ 、 $P_{\text{loss}}(t)$ 分别为 t 时段电能网络与外网交换功率、微燃机出力、光伏实际消纳出力、风电实际消纳出力、储能充放电功率、系统负荷水平以及网损功率，当 $P_{\text{ESS}}(t) > 0$ 时为放电状态。

4) 电能网络运行约束。电能网络的运行约束包括节点电压约束、储能运行约束以及风光消纳约束。具体如式(9)所示。

$$\begin{cases} U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \\ E_{\text{ESS}}^{\min} \leq E_{\text{ESS}}(t) \leq E_{\text{ESS}}^{\max}; P_{\text{ESS}}^{\min} \leq P_{\text{ESS}}(t) \leq P_{\text{ESS}}^{\max} \\ E_{\text{ESS}}(t+1) = \left[E_{\text{ESS}}(t) - u_{\text{dis}} P_{\text{ESS}}(t) \Delta t / \eta_{\text{dis}} - \right. \\ \left. u_{\text{ch}} P_{\text{ESS}}(t) \Delta t \eta_{\text{ch}} - D_{\text{ESS}} Q_{\text{ESS}} \right] \\ 0 \leq P_{\text{WT}}(t) \leq \bar{P}_{\text{WT}}(t); 0 \leq P_{\text{PV}}(t) \leq \bar{P}_{\text{PV}}(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: U_i 为第 i 个节点的电压幅值; $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 分别为第 i 个节点的最小和最大电压幅值; n 为电能网络负荷节点数; P_i 和 Q_i 分别为第 i 个节点注入的有功和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 和 δ_{ij} 分别为第 i 个节点和第 j 个节点之间支路的电导、电纳和电压相角差; $E_{\text{ESS}}(t)$ 为 t 时段储能剩余电量; E_{ESS}^{\min} 为储能最低放电深度; E_{ESS}^{\max} 为储能最大充电深度; P_{ESS}^{\max} 和 P_{ESS}^{\min} 为充放电功率限值; D_{ESS} 为储能自耗电系数; Q_{ESS} 为储能容量; η_{dis} 和 η_{ch} 分别为放电效率和充电效率; Δt 为单位时段长; u_{dis} 和 u_{ch} 分别为储能放电系数和充电系数。式(9)中风光消纳约束保障了主动配电网制定的风电光伏消纳计划在其出力范围之内。

2 鲁棒优化模型求解

鲁棒优化是一种解决不确定性问题强有力的工具, 其数学形式如式(10)所示^[21-22]。

$$\begin{cases} \max_{x_{\text{sys}}} f(x, x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}), \min_{x_{\text{nat}}} f(x, x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) \\ \text{s.t. } h(x, x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) \leq 0 \\ g(x, x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) \leq 0 \\ x_{\text{sys}} \in X_{\text{sys}} \\ x_{\text{nat}} \in X_{\text{nat}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: x 为模型状态变量; $h(x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) \leq 0$ 为模型不等式约束; $g(x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) \leq 0$ 为模型等式约束; X_{nat} 为自然决策者可行策略集; X_{sys} 为系统决策者可行策略集。

基于第一节建立的自然决策者目标函数和约束条件, 以及系统决策者目标函数和约束条件, 可以得到基于鲁棒优化的电-气互联型主动配电网故障恢复自然决策者模型和系统决策者模型分别如式(11)和式(12)所示。

$$\begin{cases} \max_{x_{\text{sys}}} f(x, x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) \\ \text{s.t. 式(6)一式(9)} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \min_{x_{\text{nat}}} f(x, x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}) \\ \text{s.t. 式(5)} \end{cases} \quad (12)$$

所建立的鲁棒优化模型中涉及到自然决策者和系统决策者策略的相互耦合和博弈过程, 因此传统的优化求解方法不再适用, 需要采用合适的方法将鲁棒优化模型转化为可求解的有限步骤。本节采用两阶段松弛法对所建立的鲁棒优化模型设计求解步骤如下述^[23-24]。

1) 在自然决策者可行策略集内随机初始化解

略 x_{nat} (1), 设置当前迭代数为 $n=1$ 。

2) 求解如式(13)所示的松弛最小值规划模型, 得到最优的辅助松弛变量 σ 。

$$\begin{cases} \min_{\lambda, x_{\text{sys}}, \sigma} \sigma \\ \text{s.t. } f(x, x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}(i)) - \lambda h(x, x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}(i)) \leq \sigma, \\ i = 1, 2, \dots, n \\ x_{\text{sys}} \in X_{\text{sys}} \\ \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: λ 为对偶变量; σ 为辅助松弛变量; 其中, 不等式约束 $f(x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}(i)) - \lambda h(x_{\text{sys}}, x_{\text{nat}}(i)) \leq \sigma$ 有 n 个, 每一个均对应故障恢复模型中的整组约束。求解得到模型的最优解以及控制变量为 $[\lambda(n), x_{\text{sys}}(n), \sigma(n)]$ 。

3) 基于 2) 得到的 $[\lambda(n), x_{\text{sys}}(n), \sigma(n)]$, 求解如式(14)所示的最大值规划问题。

$$\begin{cases} \max_{x_{\text{nat}}} f(x_{\text{sys}}(n), x_{\text{nat}}) - \lambda_n h(x, x_{\text{sys}}(n), x_{\text{nat}}) \\ \text{s.t. } x_{\text{nat}} \in X_{\text{nat}} \end{cases} \quad (14)$$

4) 如果存在足够小的正数 ξ 使得有式(15)成立, 则求解流程结束, 得到 $(x_{\text{sys}}(n), x_{\text{nat}}(n+1))$ 为鲁棒优化故障恢复模型的最优解。

$$f(x, x_{\text{sys}}(n), x_{\text{nat}}(n)) - \lambda_n h(x, x_{\text{sys}}(n), x_{\text{nat}}(n)) \leq \sigma(n) + \xi \quad (15)$$

否则令 $n = n + 1$, 返回步骤 2) 并在松弛最小值规划模型中增加如式(16)所示的约束。

$$f(x, x_{\text{sys}}(n), x_{\text{nat}}) - \lambda_n h(x, x_{\text{sys}}(n), x_{\text{nat}}) \leq \sigma \quad (16)$$

3 算例分析

3.1 故障恢复算例设置

本节以 IEEE33 节点标准系统为基础构建电-气互联型主动配电网网架结构如图 1 所示, 在 Matlab2012a 仿真平台上求解。图中包含分布式风电、分布式光伏、储能设备、微燃机、电转气装置并网运行, 展示了气能网络基本结构。图中细实线表示正常方式下运行的配电网馈线支路, 虚线表示联络线支路, 正常运行方式下断开, 包括支路 20-7、21-11、8-14、24-28 以及 17-32, 粗实线表示气能网络支路。电能网络中配置了一组分布式光伏发电、一组分布式风电以及一个储能电站, 气能网络中配置了两台微燃机、两台 P2G 装置以及一个储气罐和三台压缩机。各个并网设备的容量如表 1 所示, 为了便于制定模型中的电气协调方案, 将气能子网的天然气流量转化为功率的形式。当气能网络发生故

障时,或许会影响到天然气负荷的供能也会影响到整个系统的运行成本,但是对电能网络的供电可靠性影响非常小。气能网络在故障恢复方面的意义在于,在电能网络故障期间提供能源互联的支持从而降低失电负荷量,因此本文没有考虑气能网络的故障。

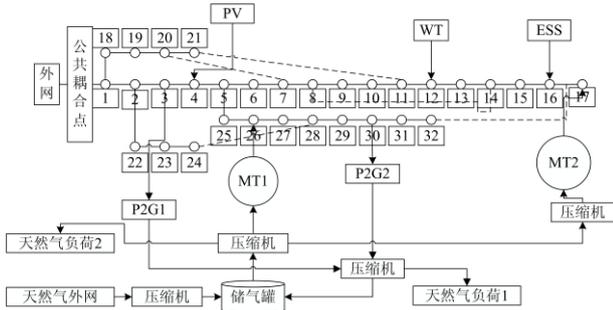


图1 基于 IEEE33 节点系统的电-气互联型主动配电网网架结构

Fig. 1 Grid structure of integrated electrical and natural-gas active distribution network based on IEEE 33-node system

表 1 电-气互联型主动配电网设备容量信息

Table 1 Device capacity information in integrated electrical and natural-gas active distribution network

电能子网设备		
设备名称	并网节点	并网容量
分布式光伏发电	节点 9	30×8 kW
分布式风力发电	节点 26	180 kW
储能设备	节点 15	150 kW(容量 1 000 kWh)
气能子网设备		
设备名称	并网节点	并网容量
微燃机 1	节点 26	130 kW
微燃机 2	节点 17	130 kW
P2G1	节点 3	80 kW
P2G2	节点 30	80 kW(容量)
储气罐	—	300 kW(容量 2 400 kWh)

设置两种形式的故障分别对其制定故障恢复计划以及电气互联计划。其中故障方式一为支路 12-13 发生永久性短路故障,故障方式二为支路 1-2 发生永久性短路故障。结合配电网历史运行经验,一般馈线支路故障需要两个小时完成恢复,因此以 2 h 为期望的故障持续时间。为了便于比较不同方式故障的故障恢复指标,两种故障持续时间均为 2 h,起始时间为 09:00,结束时间为 11:00,故障期间电气互联计划的制定以 10 min 为一个时段,外网依据文献[25]采用分时电价机制。

此外系统中各个负荷节点的重要程度权重系数如表 2 所示。故障期间电能子网的分布式风电、分布式光伏出力预测功率和区间不确定性、电负荷

预测功率以及气能子网天然气负荷预测功率如图 2 所示。

表 2 主动配电网节点负荷等级

Table 2 Importance classification of node load in ADN

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

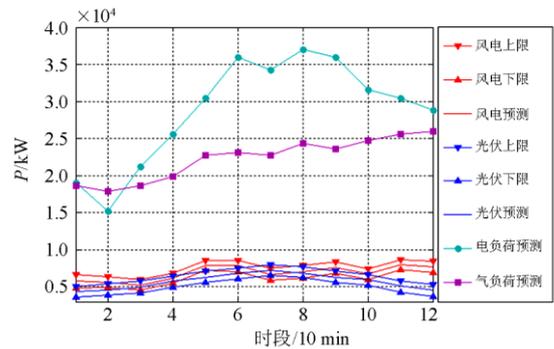


图 2 电能子网风光出力区间不确定性、电负荷和天然气负荷预测功率

Fig. 2 Band uncertainty of wind and solar power output, predicted power of electric load and natural gas load

3.2 故障恢复结果及其分析

运行所建立的电-气互联型主动配电网鲁棒优化故障恢复模型,可以得到故障方式一下的系统故障恢复计划如表 3 所示。

表 3 故障方式一下电-气互联型主动配电网故障恢复方案

Table 3 Fault recovery scheme of integrated electrical and natural-gas active distribution network under fault mode I

故障支路	12-13
断开支路	12-13
合上支路	32-17
失电负荷节点	无
孤岛情况	无
开关操作次数	2 次
失电负荷节点数	0 个
故障期间失电负荷量	0 kWh

从表 3 中可以看出,当支路 12-13 发生故障时,节点 13 及其后续的负荷节点面临失电的境况。然而主动配电网通过合理的转供计划立即恢复了失电负荷节点,即通过合上联络线支路 32-17 恢复了对节点 13、14、15、16、17 的供电,避免其成为失电负荷节点。为了满足网络辐射状约束,联络线支路 8-14 并没有合上。此时,由于系统末端支路功率较为紧

张, 因此节点 16 的储能设备以及节点 17 的 MT2 在故障期间提升出力以便对故障恢复提高支撑。事实上, 在故障方式一下系统的电气互联运行计划如图 3 所示, 图中第一时段为故障发生前的一个时段, 第二时段到第十三时段为故障持续时段。均衡下的风光出力, 实际消纳。

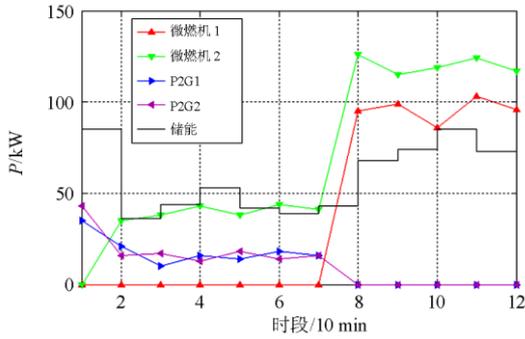


图 3 故障方式一下电气互联型主动配电网故障期间电气互联计划

Fig. 3 Integrated electricity and natural-gas plan in integrated electrical and natural-gas active distribution network under fault mode I

从图 3 中可以看出, 由于方式一的故障严重程度不高, 因此支路故障对主动配电网电气互联计划的影响不大。当系统发生故障时, 主动配电网电能网络功率相对较为紧张, 因此系统降低电转气功率。储能由于并网节点靠近故障支路, 因此从故障前的充电状态切换为放电状态, 从而提升向原本可能的失电负荷节点的功率支撑。在 10:00 之前外网分时电价水平较低, 而系统通过增加储能出力和降低 P2G 功率已经能满足故障状态下的供电要求, 因此未安排成本较高的微燃机出力。在 10:00 之后, 外网分时电价水平达到高峰, 主动配电网安排微燃机开机, 储能进一步增大出力同将 P2G 功率降至零, 从而降低运行成本。

同理针对故障方式二, 运行所建立的模型得到故障方式二下的系统故障恢复计划如表 4 所示。

从表 4 中可以看出, 故障方式二相比于故障方式一要严重得多, 主动配电网在故障期间出现更多的失电负荷节点, 同时开关操作次数更多。当支路 1-2 发生故障时, 配电网首先断开支路 1-2 进行故障隔离。接着通过合上联络线支路 20-7、21-11、8-14、24-28 恢复对失电区域的供电。由于节点 9 和节点 10 负荷重要程度较低, 因此系统通过断开支路 8-9 和支路 10-11 使其成为失电负荷节点, 这一方面缓解了系统功率紧张, 另一方面也避免了由于同时合

表 4 故障方式二下电-气互联型主动配电网故障恢复方案
Table 4 Fault recovery scheme of integrated electrical and natural-gas active distribution network under fault mode II

故障支路	1-2
断开支路	1-2,8-9,10-11,12-13,13-14,2-22,23-24,14-15,31-32,29-30,15-16
合上支路	20-7,21-11,8-14,24-28
失电负荷节点	9,10,13,22,23,30,31,15
孤岛情况	孤岛(16,17,32)
开关操作次数	23 次
失电负荷节点数	8 个
故障期间失电负荷量	1 356.27 kWh

上联络线支路 20-7 和 21-11 使得网络不满足辐射状约束。为了增大对节点 28、29 的供电能力, 主动配电网合上了联络线支路 24-28, 然而由于支路容量限值, 系统不得已通过断开支路 29-30 和支路 31-32 使得重要程度较低的节点 31、节点 32 成为失电负荷节点。在配电网主干线上, 故障期间无法实现对末端链路 13-17 的供电, 于是通过断开支路 12-13 和支路 13-14 使得节点 13 成为失电负荷节点, 同时通过断开支路 14-15 和支路 15-16 使得节点 15 成为失电负荷节点。然而尽管节点 15、16、17 已经失去与配电网主网的联系, 内部仍然具有包括储能和 MT2 在内的供电能力, 因此形成孤岛进行运行, 此时该孤岛无论是通过支路 31-32 还是支路 15-16 与主网并网, 都将被迫恢复重要程度较低的节点 31 或 15 供电, 使得系统供电容量不足。

事实上, 在故障方式二下系统的电-气互联运行计划如图 4 所示。

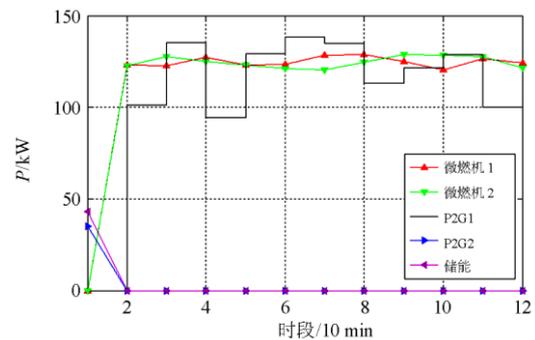


图 4 故障方式二下电-气互联型主动配电网故障期间电气互联计划

Fig. 4 Integrated electricity and natural-gas plan in integrated electrical and natural-gas active distribution network under fault mode II

从图 4 中可以看出, 由于在方式二下的主动配电网故障更加严重, 因此系统制定了充分的电-气互

联计划对故障恢复方案提供支撑。当故障发生之后，系统安排 P2G 功率降至零，从而减少能量从电能网络向气能网络的流动；在安排 P2G 功率降至零的同时，充分增加微燃机的出力，使得两台微燃机的出力基本上接近满载状态。最后，主动配电网中储能设备从故障前的充电状态切换未放电状态，以便为电能网络提供功率支撑，但由于储能容量的限制，储能放电功率无法达到最大放电深度。综上所述，在故障方式二下，电气互联型主动配电网为通过调整故障期间电气互联计划从而降低电能网络的功率紧缺情况，降低失电负荷量。

同时以故障方式二为例，还可以得到在鲁棒优化理论下故障期间自然决策者风电出力策略、光伏出力策略以及自然决策者风电消纳策略，光伏消纳策略的纳什均衡如图 5 所示。方式二下系统故障恢复方案于该均衡制定，这意味着该方案用于其他自然决策者风光出力策略下，故障恢复指标不会变得更差，使得故障恢复方案具备较好的鲁棒性。

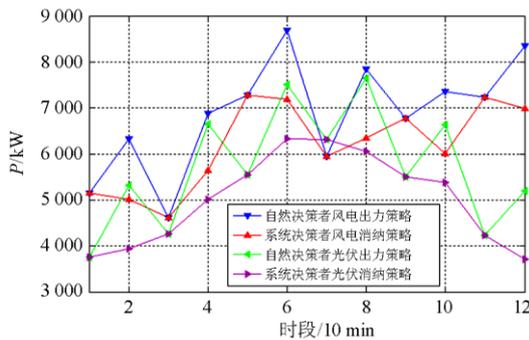


图 5 故障方式二下故障期间自然决策者和系统决策者纳什均衡策略

Fig. 5 Nash equilibrium strategy of natural decision maker and system decision maker during fault on mode 2

为了验证电-气互联型主动配电网在故障恢复期间气能子网对其的支撑作用，再次针对两种故障方式，分别在不计及电-气互联以及计及电-气互联的情形下运行故障恢复模型，得到故障恢复指标对比如表 5 所示。

从表 5 中可以看出，电-气互联型主动配电网在发生较为严重的支路永久性故障时，系统制定故障期间合理的电气互联计划能够对故障恢复方案提供支撑，提升故障恢复指标。在故障方式一下，由于故障支路处于系统末端节点，因此严重程度不高，在不考虑电-气互联计划下电能网络能够满足供电要求。然而在较为严重的故障方式二下，通过电-气互联计划，主动配电网开关操作次数从 18 次下降为 15 次，失电负荷节点数从 11 个减少为 8 个，而

失电负荷量从 1 863.46 kWh 降低为 1 356.27 kWh，下降幅度为 27.21%，效果明显。

表 5 是否计及电气互联下故障恢复指标对比

Table 5 Failure recovery index comparison with/without considering integrated electricity and natural-gas plan

故障恢复场景	计及电气互联	不计及电气互联
故障方式一		
开关操作次数	2 次	2 次
失电负荷节点数	0 个	0 个
失电负荷量	0	0
故障方式二		
开关操作次数	15 次	18 次
失电负荷节点数	8 个	11 个
失电负荷量	1 356.27 kWh	1 863.46 kWh

为了对比鲁棒优化相比于传统不确定性优化的优势，以故障方式二为例分别采用传统的随机机会约束规划^[26]和本文鲁棒优化制定故障恢复方案和电气互联方案。针对制定的方案采用蒙特卡洛法模拟 200 次实际的风电光伏出力进行检验，得到如表 6 所示的指标对比。表中采用标准离差率(Coefficient of Variance, C.V)来衡量两种决策下的风险。

表 6 鲁棒优化与传统不确定模型的对比

Table 6 Comparison between robust optimization and traditional uncertain model

不确定方法	随机机会约束规划	本文鲁棒优化
平均失电负荷量	1 387.26 kWh	1 350.49 kWh
最大失电负荷量	1 462.83 kWh	1 368.06 kWh
最小失电负荷量	1 325.73 kWh	1 343.51 kWh
C.V 指标	0.246 3	0.118 3

从表 6 可以看出，鲁棒优化相比于传统的不确定优化具备更低的失电负荷量以及波动性，能够应对系统最不利情况下的不确定性。在风光出力最不利的情况下，传统的不确定性优化不可避免地增加了对重要负荷节点的失电，导致失电负荷量增加，而鲁棒优化则较好地满足了配电网供电可靠性的要求，制定的故障恢复计划和电气互联计划具备较好的鲁棒性，对于决策者具有较好的参考价值。

4 结论

本文针对电-气互联型主动配电网故障恢复问题，计及风光出力的区间形式不确定性以及电气互联计划对故障恢复方案的支撑，采用鲁棒优化理论建立电-气互联型主动配电网故障恢复问题，仿真结果表明：

1) 当主动配电网故障支路越靠近公共耦合点，则故障越严重，造成的失电负荷量越高，同时故障

恢复方案也更复杂。

2) 相比于不考虑电-气互联计划的情况, 电-气互联型主动配电网通过故障期间合理的电气互联计划能够对故障恢复方案提供支撑, 降低失电负荷量。

3) 相比于传统的故障恢复方案, 采用鲁棒优化理论制定系统故障恢复方案, 能够使得该方案应对其他风光出力情形下故障恢复指标不会更差, 从而具备较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] PUTTON H B, MACGREGOR P R, LANBERT F C. Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1(1): 22-29.
- [2] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [3] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75.
- [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. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [5] 徐凌逊, 范韩璐, 祁宇, 等. 一种配电网量测系统设计与优化方案[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 143-148.
XU Lingxun, FAN Hanlu, QI Yu, et al. Design and optimization of distribution network measurement system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 143-148.
- [6] 黄素娟, 张晓青, 孙保华, 等. 主动配电网协调控制系统设计及应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 25-30.
HUANG Sujuan, ZHANG Xiaoqing, SUN Baohua, et al. Design and application of coordinated control system in active distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 25-30.
- [7] 孙国强, 陈霜, 卫志农, 等. 计及相关性的电-气互联系统概率最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 11-17.
SUN Guoqiang, CHEN Shuang, WEI Zhinong, et al. Probabilistic optimal power flow of combined natural gas and electric system considering correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 11-17.
- [8] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-55, 65.
ZHANG Zhao, FENG Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-55, 65.
- [9] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-54.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-54.
- [10] 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.
- [11] 陈昕玥, 唐巍, 陈禹, 等. 基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 99-106.
CHEN Xinyue, TANG Wei, CHEN Yu, et al. Chance constrained programming based fault recovery of distribution network containing photovoltaic generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 99-106.
- [12] 陈玮, 丁筱, 施云辉, 等. 考虑双向耦合的电-气综合能源系统时序故障恢复方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 86-94.
CHEN Wei, DING Xiao, SHI Yunhui, et al. Sequential fault restoration method for electricity-gas integrated energy system considering two-way coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 86-94.
- [13] 巩伟峥, 房鑫炎. 基于混合编码方式的配电网故障恢复算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 105-108.
GONG Weizheng, FANG Xinyan. Research of distribution system service restoration algorithm based on hybrid encoding[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 105-108.
- [14] SHIN D J, KIM J O, KIM T K. Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-Tabu algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(2): 145-152.
- [15] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优

- 算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-55, 65.
ZHANG Zhao, FENG Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-55, 65.
- [16] 杨丽君, 曹玉洁, 梁景志, 等. 基于博弈思想的需求响应视角下的主动配电网故障恢复[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(7): 51-60.
YANG Lijun, CAO Yujie, LIANG Jingzhi, et al. Active distribution network fault restoration based on game theory in demand response perspective[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(7): 51-60.
- [17] 杨丽君, 刘建超, 曹良晶, 等. 基于黑板模型的配电网故障恢复多代理协作机制设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 85-89.
YANG Lijun, LIU Jianchao, CAO Liangjing, et al. Multi-agent coordinated mechanism design of distribution network fault restoration based on blackboard model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 85-89.
- [18] 马天祥, 王春英, 贾静然, 等. 基于二进制粒子群算法的交直流混合配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 112-119.
MA Tianxiang, WANG Chunying, JIA Jingran, et al. Fault recovery method for AC/DC hybrid distribution network based on binary particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 112-119.
- [19] 陈胜, 卫志农, 孙国强, 等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6331-6340.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6331-6340.
- [20] 张海波, 张晓云, 陶文伟. 基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 103-108.
ZHANG Haibo, ZHANG Xiaoyun, TAO Wenwei. A breadth-first searchbased service restoration algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 103-108.
- [21] MALCOLM S A, ZENIOS S A. Robust optimization for power systems capacity expansion under uncertainty[J]. Journal of the Operational Research Society, 1994: 1040-1049.
- [22] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论及应用[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 197-203.
- [23] SHIMIZU K, AIYOSHI E. Necessary conditions for min-max problems and algorithms by a relaxation procedure[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1980, 25(1): 62-66.
- [24] 赵文仓. 风光储微网与充电桩一体化系统管理与能量调度[J]. 新能源汽车供能技术, 2018, 2(4): 18-22.
ZHAO Wencang. Management and energy scheduling system based on wind-photovoltaic-storage microgrid and charging station for electric vehicles[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2018, 2(4): 18-22.
- [25] 赵晋泉, 胡佳, 王珂, 等. 一种日前发电调度与日前分时电价联合优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 56-63.
ZHAO Jinquan, HU Jia, WANG Ke, et al. A joint optimization model of day-ahead generation scheduling and day-ahead time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 56-63.
- [26] 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.

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-12-23

作者简介:

刘家权(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电自动化、主动配电及分布式发电管理; E-mail: liujiaquan2014@126.com

刘 坤(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为可再生能源与配电自动化及网络与信息安全;

周金涛(1973—), 男, 本科, 高级技师, 主要研究方向为配电自动化。

(编辑 葛艳娜)