

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211517

面向弹性提升的主动配电网重构与元件修复协同方法

彭寒梅^{1,2}, 刘子威¹, 谭貌^{1,2}, 王维首¹, 苏永新^{1,2}

(1. 湘潭大学自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 多能协同控制技术湖南省工程研究中心(湘潭大学), 湖南 湘潭 411105)

摘要: 极端事件会导致主动配电网出现多处故障且故障元件修复时间长, 传统的故障恢复方法会使得系统的弹性低。针对主动配电网的故障恢复阶段, 提出了一种面向弹性提升的重构与故障元件修复协同方法。首先, 结合计及负荷重要程度的主动配电网弹性指标, 分析出故障恢复阶段弹性提升的主要措施; 在此基础上, 提出重构与故障元件修复协同策略框架, 给出交替协同中线路状态变量和节点负荷供电状态变量的更新与关联。其次, 建立全过程故障元件修复和重构的目标函数。针对主动配电网含多分布式电源特点带来的故障元件上下游关系难以判别问题, 提出基于消线解故障环法和圈源等效法的判别方法。最后, 算例结果表明, 所提方法能有效地提升主动配电网的弹性。

关键词: 主动配电网; 弹性提升; 元件修复; 重构; 协同方法

Collaborative method for an active distribution network reconfiguration and component repair for resilience improvement

PENG Hanmei^{1,2}, LIU Ziwei¹, TAN Mao^{1,2}, WANG Weishou¹, SU Yongxin^{1,2}

(1. College of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. Hunan Engineering Research Center of Multi-energy Cooperative Control Technology (Xiangtan University), Xiangtan 411105, China)

Abstract: Extreme events will cause multiple failures in an active distribution network and involve a long repair time for faulty components. Traditional failure recovery methods will make the system less resilient. Considering the fault recovery stage of an active distribution network, we propose a collaborative method of reconfiguration and faulty component repair oriented to resilience improvement. First, combined with a resilience index of the active distribution network that takes into account the importance of the load, the main measures of resilience improvement in the fault recovery stage are analyzed. Then a framework for collaborative strategies for reconfiguration and faulty component repair is proposed, and the update and correlation of line state and node load power supply state variables in alternate coordination are given. Then, the objective functions of faulty component repair in the whole process and reconfiguration are established. There is a problem that it is difficult to distinguish the upstream and downstream relationship of faulty components. This is because of the characteristics of active distribution network with multiple distributed power sources. To tackle this problem, a distinguishing method based on the method of eliminating the fault loop and circling source equivalent method is proposed. Finally, example results show that the proposed method can effectively improve the resilience of the active distribution network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873222).

Key words: active distribution network; resilience improvement; component repair; reconfiguration; collaborative method

0 引言

近年来, 包括台风、冰雪、地震等极端自然灾

害及恶意为网络攻击在内的极端事件频发, 导致电力系统发生大规模停电事故, 造成了巨大的经济损失。电网的弹性定义为系统抵制各种危害、承受初始故障后果以及快速恢复到正常运行状态的能力^[1-2], 强调的是应对极端事件的能力^[3-4]。配电网位于电力系统末端, 相较于输电网更为脆弱; 不同

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873222); 湖南省自然科学基金项目资助(2020JJ4580)

于网状拓扑的输电网，配电网大多具有径向树状网络拓扑和固有的电力资源密度特性，这些使得配电网对强烈干扰更敏感。已证明，配电系统是电力基础设施中最脆弱的部分^[5-7]，且配电网直接面向用电用户，是保障社会经济发展和人民生活的基础设施。因此，构建极端扰动后实现快速恢复的弹性配电网成为配电网建设的迫切需要。

2008年国际大电网会议C6.11项目组提出主动配电网的概念，其最显著的特征是具有一定可调控的分布式资源^[8-10]。极端事件发生前后，弹性电网的故障响应过程分为3个阶段：故障前预防阶段；故障抵御、响应与适应阶段；故障恢复阶段，即运营者组织电网修复并使电网逐渐恢复到正常运行水平的阶段。恢复力是弹性电网具有的主要特征^[11-13]。在发生极端事件后：传统的被动式配电网会因系统元件损坏而导致电力负荷长时间停电，且接入的分布式电源(Distributed Generator, DG)会退出运行；主动配电网对接入的DG采用主动管理和主动控制技术，使得非故障的非间歇性DG可向负荷供电，从而提升系统的弹性；因此，如何通过主动控制来增强恢复能力是主动配电网弹性提升研究的重要内容。

近年来，国内外对配电网的弹性评估^[14-15]及弹性提升^[16-17]已经开展了一定的研究。文献[14]建立了极端冰雪灾害下的配电网弹性评估指标。文献[15]分析了影响配电网弹性的关键因素，提出了一种采用图论和Choquet积分量化配电网弹性的方法。文献[16]提出了基于远动开关的鲁棒优化配置模型，以提升配电网的弹性。文献[17]提出了基于两阶段随机混合整数线性模型的配电网弹性规划。电力系统弹性提升的方法与措施分为基础设施措施和运行措施。文献[16-17]研究了面向弹性提升的配电网基础设施规划与加强。基础设施规划措施适用于长远性的弹性提升方法，此外在极端恶劣条件下不能保证规划加固的所有组件完好，因此，在现有配电网基础设施条件下有效的恢复运行措施是配电网弹性提升的关键。

目前，对配电网故障恢复方法的研究已有一定的成果，但大多是从拓扑重构和元件修复单方面考虑或者分开考虑进行的^[18-21]，且没有针对极端事件造成的多故障及其弹性提升。文献[18]提出了一种同时包含重构与孤岛划分的故障恢复方法，以提高故障恢复的水平。文献[19]采用遗传算法与二阶锥松弛技术对供电恢复中的网络重构进行双层规划，解决严重故障情况下配电网供电能力不足的问题。文献[20-21]论述了极端自然灾害后配电网的优化抢

修策略。弹性电网故障响应过程的故障恢复阶段又可分为3个阶段：准备阶段、网架重构阶段和故障元件修复阶段。极端事件破坏性强，会导致多故障且故障元件修复时间长，传统的先网架重构再进行故障元件修复的方法没有考虑两者之间的全过程协同，导致部分失电负荷需等所有故障元件全部修复后才能恢复供电，使得失电负荷的停电时间长，系统的弹性低。

本文针对极端事件下主动配电网的故障恢复阶段，提出一种面向弹性提升的重构与故障元件修复协同方法：首先，结合考虑负荷重要程度的主动配电网弹性指标，分析出故障恢复阶段弹性提升的主要措施；在此基础上，提出重构与故障元件修复协同策略框架，其通过线路状态变量和节点负荷供电状态变量的更新与关联，将重构操作与故障元件修复交替协同进行，完成故障恢复阶段；然后，建立全过程故障元件修复模型和重构统一目标函数，针对主动配电网含多个DG特点带来的故障元件上下游关系难以判别问题，提出基于消线解故障环法和圈源等效法的判别方法，以有效地判别出故障元件上下游关系；最后，算例结果验证了所提方法的可行性和有效性。

1 主动配电网故障恢复策略框架

1.1 弹性指标与故障恢复阶段

极端事件发生前后，主动配电网典型响应过程如图1所示。图1中，系统功能应满足负荷需求，考虑负荷重要程度并采用体现负荷状态的系统功能函数 $F(t)$ 。

$$F(t) = \sum_{i \in A} D_i S_{i,t} L_i \quad (1)$$

式中： A 为主动配电网中的节点集合； L_i 为节点 i 上的负荷量； D_i 为节点 i 上负荷的重要程度权重，由用户重要程度决定； $S_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的负荷供电状态， $S_{i,t}=0$ 表示负荷处于断电状态， $S_{i,t}=1$ 表示负荷处于供电状态。

图1中： F_0 为极端事件发生前主动配电网的正常负荷状态； t_0 为极端事件发生时刻； t_1 为造成主动配电网负荷损失最大时刻； t_2 为故障恢复开始时刻； t_3 为故障恢复完成时刻。在系统没有不可修复的故障元件情况下， t_3 时刻主动配电网恢复到正常负荷状态。

电网的弹性体现在系统恢复到正常运行状态的能力。将主动配电网的弹性量化为极端事件下的弹性指标 R_{ADN} 。

$$R_{ADN} = \int_{t_0}^T (F_0 - F(t))dt \quad (2)$$

式中, T 为极端事件发生到恢复正常状态的时间。图 1 中 T 等于 $t_3 - t_0$, 故障恢复阶段所需时间为 $t_3 - t_2$ 。

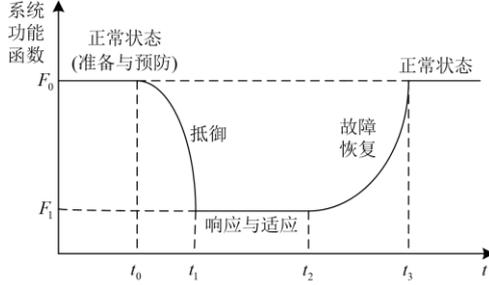


图 1 弹性主动配电网的故障响应过程

Fig. 1 Failure response process of resilient active distribution network

结合式(1)、式(2)和图 1 可知, 式(2)反映了主动配电网故障恢复阶段的负荷损失, 负荷损失越小, 则 R_{ADN} 值越小, 表示该主动配电网的弹性越高, 反之弹性越低。主动配电网故障恢复阶段的弹性提升措施可从两个方面进行: 1) 采用有效的故障恢复措施, 减小负荷损失量及其故障恢复时间; 2) 充分利用各种弹性修复资源优先恢复关键负荷, 缩短其停电时间。

1.2 重构与故障元件修复协同策略框架

极端事件会造成主动配电网多个元件故障且损坏性强, 导致负荷损失量大, 且一些元件的损坏需要花费大量时间来修复才能重新投入使用, 故障恢复时间长, 导致系统弹性低。而主动配电网含多个 DG, 且能对 DG 进行主动控制, 有利于孤岛的实施; 此外, 修复个别故障元件后的网架重构能快速恢复部分非故障区域的负荷供电, 由此, 本文面向主动配电网的弹性提升, 提出故障恢复阶段的重构与故障元件修复协同策略, 其框架如图 2 所示, 其中重构包括两种形式: 利用联络开关进行负荷转供的网架重构及利用非故障的非间歇性 DG 形成孤岛供电。极端事件下主动配电网故障恢复过程经准备阶段进入重构与故障元件修复协同阶段, 具体如下所述。

1) 首先进行重构, 实现对非故障区的负荷快速恢复; 并在重构后的拓扑状态下进行故障元件修复。

2) 每进行一次故障元件修复后, 对系统拓扑进行更新, 并检测是否存在有效重构: 符合约束条件且能带来负荷恢复的重构操作, 使得重构之后的系统功能函数 $F(t)$ 值大于重构操作之前的 $F(t)$ 值; 若

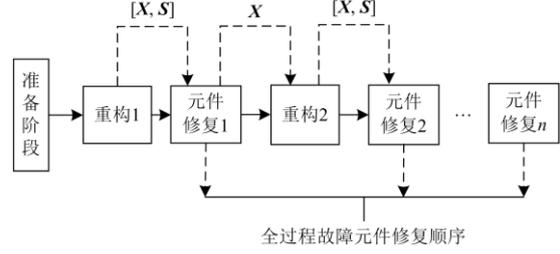


图 2 重构与故障元件修复协同策略框架

Fig. 2 Framework for the collaborative strategy of reconfiguration and faulty component repair

存在有效重构, 则得到最优重构方式, 并进行重构。

3) 如此循环协同进行, 直到完成故障恢复阶段。

重构与故障元件修复协同策略中, 重构与故障元件修复的关联变量为线路状态变量和节点负荷供电状态变量, 如式(3)和式(4)所示。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & \mathbf{L} & x_{1N} \\ \mathbf{M} & x_{ij} & \mathbf{M} \\ x_{N1} & \mathbf{L} & x_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{X} 为线路状态变量矩阵; x_{ij} 为节点 i 与 j 之间的线路状态, $x_{ij}=0$ 表示节点 i 与 j 之间不连接, $x_{ij}=1$ 表示节点 i 与 j 之间线路处于非故障状态, $x_{ij}=2$ 表示节点 i 与 j 之间线路处于故障状态; N 为系统的节点总数。

$$\mathbf{S} = [S_{1,t}, S_{2,t}, \mathbf{L}, S_{i,t}, \mathbf{L}, S_{N,t}] \quad (4)$$

式中, \mathbf{S} 为节点负荷供电状态变量。

每完成一次重构, \mathbf{X} 和 \mathbf{S} 中的元素更新一次。

$$[\mathbf{X}, \mathbf{S}] = I_k(\mathbf{X}, \mathbf{S}) \quad (5)$$

式中, $I_k(\cdot)$ 表示第 k 次重构后的 \mathbf{X} 和 \mathbf{S} 更新。

每完成一次故障元件修复, \mathbf{X} 中的元素更新一次, 如式(6)所示。

$$\mathbf{X} = J_k(\mathbf{X}) \quad (6)$$

式中, $J_k(\cdot)$ 表示第 k 次故障元件修复后的 \mathbf{X} 更新。

重构是基于上一次故障元件修复后的 \mathbf{X} 更新值, 故障元件修复是基于重构后的 \mathbf{X} 和 \mathbf{S} 的更新值, 如图 2 所示。

2 全过程故障元件修复方法

重构与故障元件修复协同策略包括故障元件修复方法和重构方法。传统的故障元件修复方案主要有按照负荷重要程度顺序抢修方式和随机抢修方式, 未考虑负荷量恢复的优化。目前已有较多提出以削减负荷总价值最小为目标的故障元件修复优化措施, 但目标函数未考虑修复全过程中可进行的重

构及其带来更多的非故障区负荷恢复。本文提出一种全过程故障元件修复方法, 考虑在修复过程中可进行重构, 以修复全过程的负荷损失价值最小为目标, 求解面向弹性最高的故障元件修复顺序。

2.1 目标函数

$$\min f_1 = \sum_{n=1} \sum_{i \in A} v_i (1 - S_{i,t}) L_i T_n \quad (7)$$

式中: f_1 为故障元件修复过程的负荷损失价值; v_i 为节点 i 的损失单位负荷单位时间的价值, 由用户重要程度决定, 关键负荷的 v_i 大于非关键负荷的 v_i ; t 为前一次重构后的时刻; T_n 为第 n 次故障元件修复所需时间, 每个元件的故障修复时间是确定的。

式(7)中, 负荷供电状态 $S_{i,t}$ 由前一次的重构得到, 其值与重构方式有关, 且不同的故障元件修复顺序带来的 $S_{i,t}$ 和 T_n 的值不同, 由此, 由式(7)求解出的故障元件最优修复顺序与可进行的重构和其重构方式有关。由式(2)和式(7)可知, f_1 越小, 则故障元件修复过程的负荷损失越小, R_{ADN} 越小, 主动配电网的弹性越高, 反之弹性越低。因此, 全过程故障元件修复方法是面向主动配电网的弹性提升。

1) 修复资源约束

考虑故障元件和抢修队伍的数量, 其约束为

$$\begin{cases} \sum_{u=1}^H e_{gu} = 1, g = 1, 2, \dots, E \\ z < H \end{cases} \quad (8)$$

式中: e_{gu} 表示故障元件 g 是否分配给抢修队伍 u , $e_{gu} = 1$ 表示分配, $e_{gu} = 0$ 表示未分配; E 为故障元件的总数; H 为抢修队伍的总数; z 为同时进行修复的故障元件个数。

式(8)表示每个故障元件必须分配且只能分配给一个抢修队伍进行修复, 且一个抢修队伍不能同时进行两个或多个故障元件的修复, 若分配多个任务, 只能进行先后修复操作。

2) 上下游故障元件修复顺序约束

配电网多数为辐射状拓扑结构, 不考虑联络开关操作, 当上游元件故障时修复下游故障元件后不能带来负荷恢复, 由此上游故障元件的修复应先于下游故障元件修复, 该约束的实现需判断故障元件的上下游关系。但重构中需要操作联络开关, 且主动配电网中含非间歇性 DG, 使得系统具有多个电源, 导致故障元件的上下游关系难以判别。

2.2 上下游故障元件判别方法

情况 1: 故障元件修复过程可进行有效的重构,

由于前一次重构可能存在联络开关闭合的情况, 有可能导致出现包含故障元件在内的故障环结构。情况 2: 在前一次重构拓扑状态下, 当故障元件的下游含非故障的非间歇性 DG 时, 且 DG 的发电功率容量大于形成的孤岛内负荷功率。出现上述情况时难以判别故障元件的上下游关系, 针对此问题, 本文提出了一种基于消线解故障环法和圈源等效法的判别方法, 具体如下所述。

1) 首先判别是否出现情况 1, 如果出现, 则提出消线解故障环法进行解环。

步骤 1: 设 l_{oop} 为当前要解的故障环中的节点集合, l_{max} 是当前故障环中线路的总数, 遍历当前故障环中的所有线路 (记为第 r 次遍历, $r = 1, 2, \dots, l_{max}$), 将第 m 条故障线路暂时看作没有连接 ($m = 1, 2, \dots, l_{max}$), 即当 $x_{ij} = 2$ 且 $i, j \in l_{oop}$ 时, 令 $x_{ij} = 0$, 形成第 m 个无此故障环的拓扑, 记为 G_1, G_2, \dots, G_m , 并保存, 当 $r = l_{max}$ 时, 解当前故障环结束。

步骤 2: 判断 G_1, G_2, \dots, G_m 拓扑中是否仍然存在其他故障环, 若存在, 则继续按步骤 1 的方法对 G_1, G_2, \dots, G_m 进行解故障环, 并进行循环, 直至消除所有的故障环, 得到所有不含故障环的拓扑。

如果拓扑状态存在 2 个故障环, 第 1、2 个故障环中分别含有 a 、 b 条故障线路, 则采用消线解故障环法得到 $a \times b$ 个无故障环的拓扑。

2) 在此基础上, 再判别是否出现情况 2, 如果出现, 提出圈源等效法进行上下游故障元件的判别。

步骤 1: 搜索非故障非间歇性 DG 的带载辐射范围。将之前 DG 形成的孤岛看作为 1 个电源节点, 分别向其各分支方向进行搜索, 每经过 1 个负荷节点, 消耗一定的功率, 直到不能恢复某个负荷节点, 则搜索结束; 再对搜索到的各分支负荷节点集合进行并集运算, 形成此 DG 的带载辐射范围, 称之为“圈”。

步骤 2: 圈外的故障元件上下游判断, 圈外的负荷必须通过主电源恢复供电, 将圈等效为 1 个负荷节点, 从主电源出发判断圈外负荷故障元件的上下游关系。

步骤 3: 圈内的故障元件上下游判断, 在主电源和非间歇性 DG 所在节点之间的最后一条故障线路修复之前, 考虑 DG 可能形成的所有孤岛状态, 对每一种孤岛状态单独分析, 可判断出上下游关系。

图 3 为主动配电网某前一次重构后的拓扑状态, 存在 8 条故障线路: 2-8、8-9、9-10、11-12、12-13、4-5、5-6、14-15, 非间歇性 DG 形成孤岛给节点 10、11 上的负荷供电, 且 DG 的发电功率容量

大于节点 10、11 的负荷功率。采用圈源等效法, 首先搜索出 DG 孤岛的带载辐射范围(节点 8、9、10、11), 并形成圈, 则: (1) 圈外可判断上下游顺序依次为故障线路 2-8、11-12、12-13(记为上下游关系约束①), 故障线路 4-5 为故障线路 5-6 的上游(记为上下游关系约束②); (2) 在 DG 并网之前, 圈内有 3 种可能的孤岛状态, 若最后的孤岛状态为 DG 仅给节点 10、11 上的负荷供电, 则可判断出上下游顺序依次为故障线路 2-8、8-9、9-10、11-12(记为上下游关系约束③), 若最后的孤岛状态为 DG 仅给节点 9、10、11 上的负荷供电, 则可判断出上下游顺序依次为故障线路 2-8、8-9、11-12(记为上下游关系约束④), 若最后的孤岛状态为 DG 仅给节点 8、9、10、11 上的负荷供电, 则故障线路 9-10 为故障线路 8-9 的上游(记为关系约束⑤), 则一共有 3 组上下游关系约束(①②③、①②④、①②⑤); (3) 在 8! 种可能的故障元件上下游关系中排除不满足其中任何一组的关系约束, 得到最后的故障元件上下游关系。

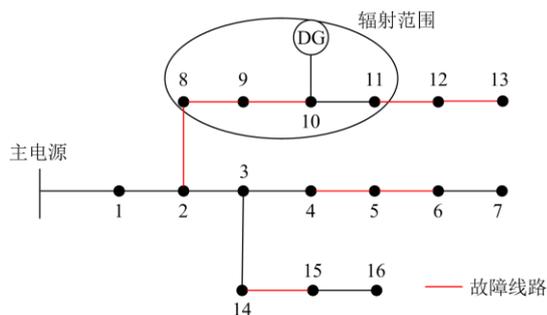


图 3 圈源等效法示例

Fig. 3 Example of circling source equivalent method

2.3 全过程故障元件修复流程

结合建立的全过程故障元件修复目标函数及提出的消线解环法和圈源等效法判断故障元件上下游关系, 全过程故障元件修复方法的流程如图 4 所示, 具体步骤如下所述。

步骤 1: 判断重构后的拓扑是否存在情况 1, 若存在转到步骤 2; 若否, 转到步骤 3。

步骤 2: 采用提出的消线解故障环法得到所有不含故障环的拓扑。

步骤 3: 判别是否存在情况 2, 若存在则转到步骤 4; 若否, 直接判别故障元件上下游关系, 转到步骤 5。

步骤 4: 采用提出的圈源等效法判断故障元件上下游关系。

步骤 5: 求解全过程故障元件修复目标函数, 得到故障元件的最优修复顺序, 流程结束。

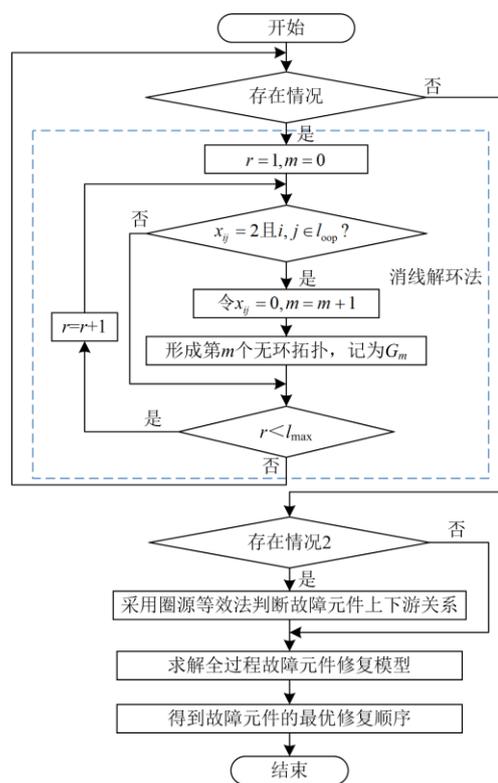


图 4 全过程故障元件修复方法流程

Fig. 4 Flow chart of faulty component repair method in the whole process

3 统一重构方法

极端事件下主动配电网的第 1 次网架重构能快速恢复全部或部分非故障区域的负荷供电, 后续每进行 1 次故障元件修复后重新进行有效的重构(包括网架重构和孤岛生成)。本文提出的统一重构方法首先进行辐射状约束处理, 再建立重构统一目标函数, 最后求解出最优重构方式。

3.1 辐射状约束处理

主动配电网中非间歇性 DG 的接入, 使得其含有多个电源节点, 导致求解重构方式的优化过程中会出现大量环状拓扑结构。针对此问题, 先进行辐射状拓扑约束处理, 判断所有可能生成的拓扑是否会形成环, 利用 Yen 算法计算电源节点到负荷节点之间的供电路径^[22], 如果 1 个负荷节点有 2 条及以上由同一电源节点供电的路径, 则会出现环, 找到出现环的负荷节点到电源节点路径中的联络开关, 将此联络开关在此次拓扑生成中只能断开, 即若之前此联络开关处于闭合状态, 则此次拓扑生成中必须被操作, 反之, 不能被操作。

3.2 重构的统一目标函数

重构是基于前一次故障元件修复后的拓扑, 统

一目标函数以不可恢复负荷量最小为目标, 即

$$\min f_2 = w_{re} \cdot \sum_{i \in A} D_i (1 - S_{i,t}) L_i + w_{sw} \cdot \left[\sum_{ij \in W_{ie}} \lambda_{ij} Y_{ij} + \sum_{ij \in W_{sec}} \delta_{ij} B_{ij} \right] \quad (9)$$

式中: 等号右侧第 1 项为重构操作后系统的不可恢复负荷量, 第 2 项为重构的开关操作成本; w_{re} 、 w_{sw} 分别为不可恢复负荷量和开关操作成本的权值; W_{ie} 为配有联络开关的线路集合; Y_{ij} 表示线路 ij 上的联络开关是否被操作; W_{sec} 为配有分段开关的线路集合; B_{ij} 表示线路 ij 上的分段开关是否被操作; λ_{ij} 和 δ_{ij} 分别为联络开关和分段开关单次操作的成本; $Y_{ij} = 0$ 、 $B_{ij} = 0$ 表示开关没有被操作, $Y_{ij} = 1$ 、 $B_{ij} = 1$ 表示开关被操作。

由式(2)和式(9)可知, 每一次重构是使不可恢复负荷量最小, 则可减小故障恢复阶段的负荷损失, 从而减小 R_{ADN} 值, 由此, 所提的重构方法是面向主动配电网的弹性提升。

约束条件主要有潮流约束和负荷恢复约束。潮流约束描述为

$$\begin{cases} P_i + P_{L_i} - P_{G_i} = 0 \\ Q_i + Q_{L_i} - Q_{G_i} = 0 \\ P_{G_{i,min}} < P_{G_i} < P_{G_{i,max}} \\ Q_{G_{i,min}} < Q_{G_i} < Q_{G_{i,max}} \\ U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \end{cases}, i \in C \quad (10)$$

式中: P_i 、 Q_i 、 P_{L_i} 、 Q_{L_i} 、 P_{G_i} 、 Q_{G_i} 分别为节点 i 的注入有功和无功功率、负荷消耗的有功和无功功率、电源发出的有功和无功功率; $P_{G_{i,min}}$ 、 $P_{G_{i,max}}$ 、 $Q_{G_{i,min}}$ 、 $Q_{G_{i,max}}$ 分别为给定的节点 i 上电源发出有功和无功功率的最小值和最大值; $U_{i,min}$ 、 $U_{i,max}$ 分别为给定的节点电压 U_i 的最小值和最大值; C 为重构形成的拓扑系统中节点集合。

已恢复供电的负荷不允许再次断电, 设置负荷恢复约束为

$$0 \leq S_{i,t-1} \leq S_{i,t} \leq 1 \quad (11)$$

4 算例分析

设置 IEEE33 节点主动配电网^[23]算例, 拓扑结构如图 5 所示, 其中节点 7、16、21、24 接入 DG, 线路 8-20、25-29、12-22、18-33 装有联络开关, 每条线路两端均装有分段开关。DG1、DG3 和 DG4 为非间歇性可调控的 DG, 分别能提供的有功功率

为 390 kW、142 kW 和 177 kW, DG2 为光伏发电, 为间歇性不可调控的 DG; 节点负荷大小如表 1 所示, 其中节点 5、28 上的负荷为关键负荷, 其他节点负荷为非关键负荷。全过程故障元件修复目标函数和重构统一目标函数中, 关键负荷、非关键负荷的重要程度权重 D_i 和损失单位负荷单位时间的价值 v_i 分别取为 100 和 1^[24], 不可恢复负荷量和开关操作成本的权值 w_{re} 、 w_{sw} 分别取 0.8、0.2^[25]。采用 CPLEX 求解器求解目标函数。

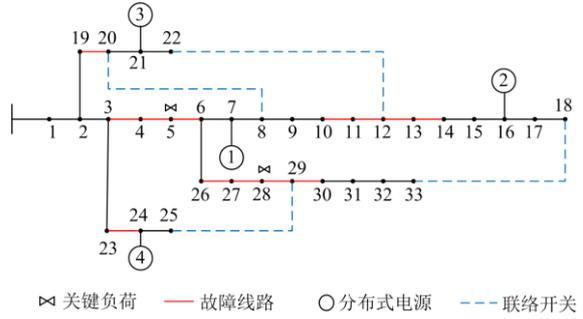


图 5 33 节点主动配电网算例拓扑图

Fig. 5 Topology diagram of 33-node active distribution network example

表 1 负荷参数

Table 1 Load parameters

节点编号	负荷功率/kW	节点编号	负荷功率/kW	节点编号	负荷功率/kW
1	124	12	65	23	65
2	78	13	60	24	70
3	55	14	72	25	52
4	100	15	80	26	48
5	8	16	90	27	45
6	80	17	86	28	5
7	70	18	58	29	50
8	70	19	50	30	29
9	62	20	52	31	18
10	52	21	78	32	30
11	45	22	64	33	32

极端事件发生后主动配电网发生多处故障, 且抢修队伍资源有限, 故障元件修复存在先后关系, 则故障恢复阶段的恢复运行措施是弹性提升的关键。设主动配电网算例系统某次极端事件后对应的故障位置为节点 3-6、10-14、19-20、23-24、26-30, 共有 13 条故障线路; 设配有一支抢修队伍, 故障线路的抢修时间均为 1 h, 故障线路修复完成后即刻投运。

4.1 协同策略下主动配电网的故障恢复过程结果

算例故障下采用本文提出的重构与故障元件修复协同策略进行故障恢复, 得到的恢复过程结果如下所述。

1) 第一次重构后的系统拓扑状态结果如图 6 所示, 包括主电源供电区域和 DG1、DG3、DG4 形成的孤岛 1—孤岛 3。由于 DG2 是间歇性 DG, 在上游发生故障后不能形成孤岛供电。

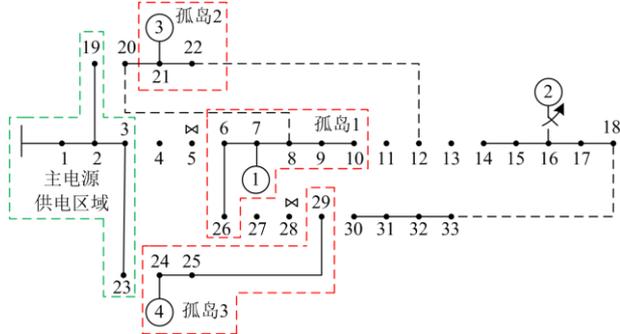


图 6 第一次重构后的系统拓扑状态

Fig. 6 System topology state after the first reconfiguration

2) 第一次重构后, 由于线路 25-29 上的联络开关闭合导致出现 1 个故障环: 3-4-5-6-26-27-28-29-25-24-23-3, 故障环中有 7 条故障线路, 采用本文所提的全过程故障元件修复方法, 得到故障元件最优修复顺序, 如表 2 所示。由表 2 可知: (1) 由于故障环的存在, 采用消线解故障环法及求解全过程故障元件修复目标函数, 得到了 7 种不含故障环拓扑下对应的 7 种故障元件最优修复顺序; (2) 消线路 26-27 和 27-28 解故障环下的最小负荷损失价值相同, 故障元件最优修复顺序仅最后 2 个顺序不一样, 这是因为先修复故障线路 26-27 或先修复故障线路 27-28, 都是恢复节点 27 上的负荷。由此, 得到的此故障场景下的全过程故障元件最优修复顺序为: 5-6、28-29、3-4、4-5、10-11、11-12、12-13、13-14、23-24、29-30、19-20、27-28(或 26-27)、26-27(或 27-28)。

3) 按得到的故障元件最优修复顺序进行全过程故障元件修复, 每修复 1 个故障元件后, 检测并进行有效重构。(1) 修复故障线路 4-5 后检测到存在有效重构, 采用提出的统一重构方法求得此时的最优重构操作, 即其他开关不动作, 闭合联络开关 8-20, 可恢复节点 20 上的负荷。(2) 修复故障线路 13-14 后, 检测到有效重构, 求得最优重构操作为: 其他开关不动作, 闭合联络开关 18-33, 可恢复节点 30、31、32、33 上的负荷。(3) 修复故障线路 29-30、19-20、26-27(或 27-28)后, 相应断开联络开关 18-33、

表 2 得到的故障元件最优修复顺序

Table 2 Optimal repair order of faulty components obtained

消除故障线路	故障元件最优修复顺序	最小负荷损失价值
3-4	5-6、28-29、23-24、29-30、27-28、 26-27、10-11、11-12、12-13、13-14、 4-5、19-20、3-4	9420
4-5	5-6、28-29、3-4、23-24、29-30、27-28、 26-27、10-11、11-12、12-13、13-14、 19-20、4-5	9330
5-6	28-29、3-4、4-5、23-24、29-30、27-28、 26-27、10-11、11-12、12-13、13-14、 19-20、5-6	100105
23-24	5-6、28-29、3-4、4-5、10-11、11-12、 12-13、13-14、19-20、26-27、27-28、 29-30、23-24	8449
26-27	5-6、28-29、3-4、4-5、10-11、11-12、 12-13、13-14、23-24、29-30、19-20、 27-28、26-27	8425
27-28	5-6、28-29、3-4、4-5、10-11、11-12、 12-13、13-14、23-24、29-30、19-20、 26-27、27-28	8425
28-29	5-6、3-4、4-5、26-27、27-28、10-11、 11-12、12-13、13-14、23-24、29-30、 19-20、28-29	10182

8-20、25-29。

上述结果及其分析验证了本文提出的重构与故障元件修复协同策略的正确性。

4.2 不同故障恢复策略下主动配电网的弹性比较

考虑 3 种不同的主动配电网故障恢复策略, 策略 1: 先重构, 再按照负荷重要程度进行故障元件修复。策略 2: 先重构, 再采用不考虑重构协同的全过程故障元件修复方法进行修复。策略 3: 本文提出的重构与故障元件修复协同方法。设在 00:00 时刻进入故障恢复阶段, 此时算例系统的系统功能函数 $F(t)$ 值等于 1068, 为负荷损失最大时刻, 采用 3 种不同故障恢复策略得到的系统功能函数 $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 、 $F_3(t)$, 如图 7 所示, 并得到系统弹性值 R_{ADN} 分别为 10581、8425、7843。

1) 由图 7 可知, 在 00:00—04:00 时段, $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 和 $F_3(t)$ 大小相等, 其中 00:00—01:00、01:00—02:00、02:00—03:00 和 03:00—04:00 这 4 个时段的 $F(t)$ 分别为 1068、1868、2368、2468。这是因为 3 种不同故障恢复策略均考虑了用户重要程度的差异性, 都分别在 01:00、02:00 恢复了节点 5 和节点 28 上的关键负荷, 在 03:00 恢复了负

荷量最大的节点 4 上的负荷, 使得系统功能函数 $F(t)$ 相等。

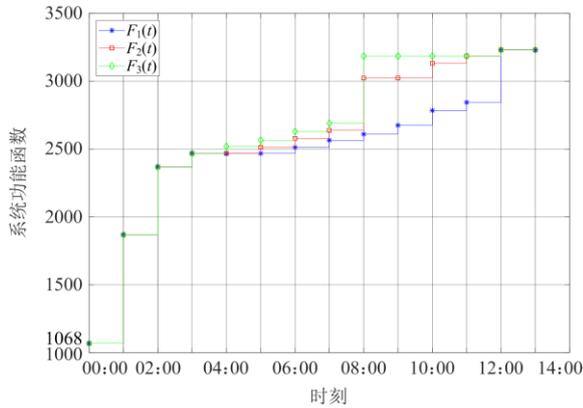


图 7 不同故障恢复策略下的系统功能函数变化

Fig. 7 System function changes under different failure recovery strategies

2) 由图 7 可知, 在 04:00—12:00 时段, $F_1(t) < F_2(t) < F_3(t)$, 表明本文提出的重构与故障元件修复协同方法下的系统功能函数值最大, 提升了系统的弹性。这是因为: 策略 1 没有考虑故障元件修复之间的相互影响, 导致中后期系统功能恢复缓慢; 策略 2 考虑了故障元件修复之间的相互影响, 比策略 1 下系统功能恢复得更快, 但未考虑元件修复过程中可进行的重构; 策略 3 在故障元件修复过程中通过重构使得节点 20、30、31、32、33 上的负荷提前恢复, 无需等所有故障元件全部修复之后才恢复供电, 进而加快系统功能的恢复。

3) 在 3 种不同故障恢复策略下得到的系统弹性值 R_{ADN} 分别为 10 581、8425、7843, 主动配电网采用重构与故障元件修复协同方法对应的弹性值最小, 即系统弹性最高。

上述结果及其分析验证了本文提出的重构与故障元件修复协同策略的有效性。

4.3 故障恢复阶段的弹性提升措施

3 种不同故障恢复策略下的算例表明了有效的故障恢复策略可提升主动配电网的弹性, 此外, 故障恢复阶段的弹性提升措施还可包括以下措施。

1) 非间歇性 DG 提升主动配电网的弹性

设置 4 个场景, 场景 1: 算例系统; 场景 2: 算例系统中不含 DG; 场景 3: 算例系统中所有 DG 均为间歇性 DG; 场景 4: 算例系统中间歇性 DG2 改为非间歇性 DG, 能提供 314 kW 有功功率, 其他 DG 不变。设配电网所连主网供电充足, 采用本文方法分别对 4 个场景进行故障恢复, 得到表 3 所示的结果。

由表 3 可知, 场景 2 和场景 3 下的负荷损失价值相同, 场景 2 下的负荷损失价值最大, 场景 4 下的负荷损失价值最小, 则场景 2 下系统的弹性最低, 场景 4 下最高。这是因为: 在故障恢复过程中, 非间歇性 DG 可形成孤岛运行, 快速地恢复部分负荷的供电, 能有效地减小负荷损失价值, 从而减小 R_{ADN} , 提升了系统的弹性; 而间歇性 DG 即使在非故障下, 由于出力具有随机性不能形成孤岛运行, 无法带来负荷的恢复。

表 3 不同 DG 设置下配电网的故障恢复

Table 3 Fault recovery of distribution network under different DG set

	故障元件最优修复顺序	最小负荷损失价值
场景 1	5-6、28-29、3-4、4-5、10-11、11-12、12-13、13-14、23-24、29-30、19-20、27-28、26-27	7843
场景 2/ 场景 3	3-4、4-5、5-6、26-27、27-28、19-20、10-11、11-12、12-13、13-14、23-24、28-29、29-30	13277
场景 4	5-6、28-29、3-4、23-24、29-30、19-20、4-5、10-11、11-12、12-13、13-14、27-28、26-27	6030

2) 优先对关键负荷的恢复

对图 5 所示算例(拓扑及故障设置不变)采用本文提出的协同策略进行故障恢复, 得到是否考虑节点负荷损失单位负荷单位时间的价值 v_i 差异性的结果, 其对比如表 4 所示。

表 4 考虑/不考虑 v_i 差异性下主动配电网的故障恢复

Table 4 Active distribution network fault recovery with/without considering the difference of v_i

	故障元件最优修复顺序	最小负荷损失价值
考虑 v_i 差异性	5-6、28-29、3-4、4-5、10-11、11-12、12-13、13-14、23-24、29-30、19-20、27-28、26-27	7843
不考虑 v_i 差异性 (所有节点 v_i 取为 1)	3-4、4-5、5-6、10-11、11-12、12-13、13-14、19-20、26-27、27-28、28-29、29-30、23-24	9529

由表 4 可知, 是否考虑负荷 v_i 差异性, 得到的全过程故障元件最优修复顺序不同, 且考虑负荷 v_i 差异性比不考虑负荷 v_i 差异性的主动配电网负荷损失价值小, 进而提升了系统的弹性。这是因为: 在不考虑负荷 v_i 差异性且所有节点负荷 $v_i=1$ 下, 求得考虑修复过程中可进行重构的全过程故障元件最优

修复顺序,不会优先对关键负荷进行恢复,导致按节点负荷的实际 v_i 值计算出的负荷损失价值会更大;而在考虑负荷 v_i 差异性下会优先对关键负荷进行恢复,使得关键负荷的损失价值小,可减小全过程的负荷损失价值,进而减小 R_{ADN} ,提升了系统的弹性。

5 结论

本文针对主动配电网的故障恢复阶段,提出一种面向弹性提升的重构与故障元件修复协同方法,建立了全过程故障元件修复和重构的统一目标函数,提出基于消线解故障环法和圈源等效法的故障元件上下游关系判别方法。

1) 提出的极端事件下主动配电网故障恢复方法,将重构与故障元件修复交替协同进行,其重构包括网架重构和孤岛供电。该方法考虑了主动配电网含多非间歇性 DG 利于孤岛供电的特性,也考虑了修复个别故障元件后的重构能快速恢复非故障区域的负荷,使得部分失电负荷无需等所有故障元件全部修复之后才恢复供电,加快了系统功能的恢复,具有较好的工程实用性。

2) 提出的全过程故障元件修复和统一重构目标函数,考虑了修复过程中可进行重构,分别以面向弹性最高的修复全过程负荷损失价值最小和不可恢复负荷量最小为目标,有效地提升了主动配电网的弹性。

3) 提出的基于消线解环法和圈源等效法的故障元件上下游关系判别方法,可有效且简便地判别出上下游关系,解决了主动配电网含多非间歇性 DG 特性带来的多故障元件上下游关系难以判别的问题。

考虑主动配电网通信系统故障影响的电力系统重构与故障元件修复协同将是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 别朝红,林超凡,李更丰,等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9):2735-2745.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [2] LIU J, QIN C, YU Y. Enhancing distribution system resilience with proactive islanding and RCS-based fast fault isolation and service restoration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(3): 2381-2395.
- [3] MA S, SU L, WANG Z, et al. Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4842-4853.
- [4] WANG Y, CHEN C, WANG J, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [5] LI Z, SHAHIDEHPOUR M, AMINIFAR F, et al. Networked microgrids for enhancing the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1289-1310.
- [6] 汤旻安, 张凯越, 许希元. 基于启发式规则与 AHP-CRITIC 算法的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 1-9.
TANG Min'an, ZHANG Kaiyue, XU Xiyuan. Service restoration strategy of a distribution network based on heuristic rules and the AHP-CRITIC algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 1-9.
- [7] 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 Shen, 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.
- [8] D'ADAMO C, JUPE S, ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks—update of CIGRE C6.11 working group activities[C] // CIRED 2009-20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution: Part 1, June 8-11, 2009, Prague, Czech: 1-4.
- [9] 张煜, 牟龙华, 王蕴敏, 等. 计及可控负荷动态调节的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 104-110.
ZHANG Yu, MU Longhua, WANG Yunmin, et al. Optimal dispatching of an active distribution network considering dynamic regulation of controllable load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 104-110.
- [10] 倪识远, 张林垚. 考虑动态重构的主动配电网多目标双层优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 38-47.
NI Shiyuan, ZHANG Linyao. Multi-objective bi-level optimal dispatch method of an active distribution network considering dynamic reconfigurations[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 38-47.
- [11] BEDOYA J C, WANG Y, LIU C C. Distribution system resilience under asynchronous information using deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Power

- Systems, 2021, 36(5): 4235-4245.
- [12] 彭寒梅, 王小豪, 魏宁, 等. 提升配电网弹性的微网差异化恢复运行方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2328-2335.
PENG Hanmei, WANG Xiaohao, WEI Ning, et al. Microgrid differentiated recovery operation for enhancing distribution system resilience[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2328-2335.
- [13] MOUSAVIZADEH S, ALAHYARI A, GHODSINYA S R M, et al. Incorporating microgrids coupling with utilization of flexible switching to enhance self-healing ability of electric distribution systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 300-310.
- [14] 王守相, 黄仁山, 潘志新, 等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 123-132.
WANG Shouxiang, HUANG Renshan, PAN Zhixin, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 123-132.
- [15] BAJPAI P, CHANDA S, SRIVASTAVA A K. A novel metric to quantify and enable resilient distribution system using graph theory and Choquet integral[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2918-2929.
- [16] 卞艺衡, 别朝红. 面向弹性提升的智能配电网远动开关优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 33-39.
BIAN Yiheng, BIE Zhaohong. Resilience-enhanced optimal placement model of remote-controlled switch for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 33-39.
- [17] MA S, LI S, WANG Z, et al. Resilience-oriented design of distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2880-2891.
- [18] 汤一达, 吴志, 顾伟, 等. 主动配电网故障恢复的重构与孤岛划分统一模型[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2731-2740.
TANG Yida, WU Zhi, GU Wei, et al. Research on active distribution network fault recovery strategy based on unified model considering reconfiguration and island partition[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2731-2740.
- [19] 霍崇辉, 王淳, 陶多才, 等. 考虑精准负荷控制的配电网供电恢复策略[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 4020-4028.
HUO Chonghui, WANG Chun, TAO Duocai, et al. Restoration strategy of distribution network considering precise load control[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 4020-4028.
- [20] 高兆丽, 胥明凯, 丁素英, 等. 基于改进人工蜂群算法的配电网多点故障应急抢修优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 107-114.
GAO Zhaoli, XU Mingkai, DING Suying, et al. Optimization scheduling of multi-fault rush repair for distribution networks based on modified artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 107-114.
- [21] 杨丽君, 安立明, 杨博, 等. 基于可达性分析的主动配电网多故障分区修复策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4864-4875.
YANG Lijun, AN Liming, YANG Bo, et al. Multi-fault partition repair strategy of active distribution network based on reachability analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4864-4875.
- [22] YEN J Y. An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1970, 27(4): 526-530.
- [23] 陈彬, 于继来. 考虑通信影响的配网恢复力评估及提升措施研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2314-2320.
CHEN Bin, YU Jilai. Research on resilience assessment and improvement measures of distribution network considering the influence of communication system[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2314-2320.
- [24] 葛少云, 张成昊, 刘洪, 等. 考虑微能源网支撑作用的配电网弹性提升策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2306-2317.
GE Shaoyun, ZHANG Chenghao, LIU Hong, et al. Resilience enhancement strategy for distribution network considering supporting role of micro energy grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2306-2317.
- [25] SEKHAVATMANESH H, CHERKAOUI R. A multi-step reconfiguration model for active distribution network restoration integrating DG start-up sequences[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2879-2888.

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2022-02-25

作者简介:

彭寒梅(1979—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为智能电网弹性分析及提升和综合能源系统潮流计算; E-mail: penghanmei8@163.com

刘子威(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为主动配电网的弹性评估及提升;

谭貌(1981—), 男, 博士, 教授, 研究方向为综合能源系统及其优化。

(编辑 姜新丽)