

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200181

# 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

刘坤<sup>1</sup>, 赵丽萍<sup>2</sup>, 李建萍<sup>2</sup>, 侯壮<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054; 2. 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:** 故障恢复作为智能配电网自愈能力的重要保障, 对系统运行可靠性至关重要。针对含分布式光伏并网的配电网故障恢复问题, 计及故障期间光伏出力和负荷水平变化建立光伏型配电网动态故障恢复方法。以当前时段系统失电负荷量最小为目标函数, 计及网络辐射状约束、功率平衡约束、节点电压约束、开关状态集约束等必要约束条件建立光伏型配电网动态故障恢复方法。所建立的模型通过故障期间改变系统开关状态集使得故障恢复方案对于运行工况进行适应从而减少失电负荷量。采用种群的精英策略和混沌搜索对基本萤火虫算法进行改进, 采用改进萤火虫算法对所建立的模型设计求解流程。最后通过仿真算例验证了所建立模型的有效性。

**关键词:** 配电网; 分布式光伏; 动态故障恢复; 开关状态集; 萤火虫算法; 精英策略

## Dynamic fault recovery method of a photovoltaic distribution network considering switch state set adjustment

LIU Shen<sup>1</sup>, ZHAO Liping<sup>2</sup>, LI Jianping<sup>2</sup>, HOU Zhuang<sup>2</sup>

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China; 2. Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075001, China)

**Abstract:** As an important guarantee for the self-healing ability of an intelligent distribution network, fault recovery has been very important for the operational reliability of the system. For the distribution network fault recovery with distributed photovoltaic grid connection, considering the photovoltaic output and load level changes during the fault period, a dynamic fault recovery is built. Taking the minimum load loss as the objective function, considering the network radiation, power balance and node voltage constraints, the switch state intensive beam and other necessary constraints, the recovery method is established. By changing the switch state set of the system during the fault period, the established model makes the fault recovery scheme adapt to the operational conditions, so as to reduce the load loss. The elite strategy of population and chaos search are used to improve the basic firefly algorithm, and it is used to design and solve the model. Finally, the effectiveness of the model is verified by a simulation example.

This work is supported by Beijing-Tianjin-Hebei Cooperation Project of Hebei Natural Science Foundation (No. F2016203507).

**Key words:** distribution network; distributed photovoltaic; dynamic fault recovery; switch state set; firefly algorithm; elite strategy

## 0 引言

传统配电网是由馈电线路、保护与监控装置、负荷等模块集成的小型发、配、用电系统, 能实现

自我控制管理, 在降低系统运行成本、提高供电可靠性等方面具有较大的优势<sup>[1-4]</sup>。随着分布式光伏发电的应用越来越广泛, 将其并网接入配电网形成光伏型配电网已成为了重要趋势<sup>[5-6]</sup>, 其故障恢复也成为了一门重要课题。

配电网故障恢复是一个多目标、多约束的非线性优化问题, 最终得到的解是一系列开关状态组

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

合<sup>[7]</sup>, 该开关状态集能够在系统发生故障时重新分配系统功率, 实现恢复供电的功能。在这方面已有较多文献进行了研究, 比如文献[8]通过计及用户负荷削减到配电网故障恢复计划中, 进一步降低了系统的失电负荷损失。文献[9]提出了配电网故障恢复的区间数灰色关联决策方法。另一方面其他文献则是对含分布式发电并网的配电网进行故障恢复建模, 比如文献[10]采用交替乘子方向法针对含分布式发电配电网制定故障恢复模型。文献[11]针对中压配电网系统, 提出了基于多阶段优化的配电网故障恢复模型, 所建立的模型考虑到了分布式电源辅助供电。文献[12]则计及分布式发电出力的不确定性, 提出了基于机会约束规划的配电网故障恢复策略。在故障恢复模型求解领域也有较多文献进行了研究, 事实上配电网故障恢复求解方法<sup>[13]</sup>主要有启发式搜索方法和遗传算法<sup>[14-15]</sup>、禁忌搜索算法<sup>[16]</sup>, 而近年来蚁群算法<sup>[17]</sup>、多代理理论<sup>[18]</sup>等前沿智能算法也开始被应用在了配电网故障恢复领域。

然而目前大部分文献制定的配电网故障恢复计划只是针对故障发生时刻的状态, 也没有考虑故障期间的开关状态集调整。配电网发生的往往是永久性故障, 这样的故障需要一定的时间才能处理恢复。在故障期间光伏型配电网中光伏出力以及各个节点负荷水平会发生变化, 从而使得最初制定的故障恢复计划不再适用或者不再是最优。计及故障期间开关状态集动态调整的配电网故障恢复模型能够进一步降低系统失电负荷量, 提升配电网运行的可靠性和兼容性。这样的模型要求系统故障恢复模型能够根据配电网的实时运行状态对开关状态集进行动态修正, 形成动态故障恢复方案。

针对光伏型配电网的故障恢复问题, 计及故障期间开关状态集方案的调整建立光伏型配电网动态故障恢复方法。所建立的模型以当前时段系统失电负荷量最小为目标函数, 计及网络辐射状约束、功率平衡约束、节点电压约束、开关状态集约束等必要约束, 考虑到光伏出力和负荷水平的变化对系统开关状态集进行动态调整。采用种群的精英策略和混沌搜索对基本萤火虫算法进行改进, 采用改进萤火虫算法对所建立的模型设计求解流程。最后设置两种典型的光伏型配电网故障场景对所提出的模型进行验证。

## 1 含光伏配电网动态故障恢复模型

### 1.1 目标函数

在配电网发生故障时, 系统处于功率紧缺状态, 因此故障恢复计划首要考虑的是提升系统供电

可靠性。假设当前光伏型配电网运行到故障期间的第  $t$  时段, 光伏型配电网动态故障恢复模型的目标函数为当前时段系统失电负荷量最小, 如式(1)所示。

$$\min f = \sum_{j=1}^N u_j(t) c_j P_j(t) \quad (1)$$

式中:  $N$  为光伏型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。

### 1.2 约束条件

光伏型配电网动态故障恢复模型需要满足多项必要的约束条件, 包括网络辐射状约束, 功率平衡约束、节点电压约束以及开关状态集约束。

#### 1) 网络辐射状约束。

该约束如式(2)所示。

$$\mathbf{g}(t) \in \mathbf{G} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{g}(t)$  为当前时段配电网拓扑结构向量, 通过系统开关状态集表征;  $\mathbf{G}$  为满足该网络辐射状的配电网开关状态集合。采用广度优先搜索法来制定集合  $\mathbf{G}$  作为判断的基础<sup>[19]</sup>。

#### 2) 节点电压约束。

光伏型配电网动态故障恢复过程中随着光伏出力和负荷水平的变化以及开关状态集的调整, 系统需要在当前时段满足节点电压约束, 如式(3)所示。

$$U_{i,\min} \leq U_i(t) \leq U_{i,\max}, i=1,2,\dots,N \quad (3)$$

式中:  $U_i(t)$  为  $t$  时段第  $i$  个节点的电压幅值;  $U_{i,\min}$  和  $U_{i,\max}$  分别为第  $i$  个节点的电压最小幅值和最大幅值。其中  $U_i(t)$  通过式(4)所示的潮流计算方程得到<sup>[20]</sup>。

$$\begin{cases} P_i(t) - U_i(t) \sum_{j=1}^n U_j(t) (G_{ij} \cos \delta_{ij}(t) + B_{ij} \sin \delta_{ij}(t)) = 0 \\ Q_i(t) - U_i(t) \sum_{j=1}^n U_j(t) (G_{ij} \sin \delta_{ij}(t) - B_{ij} \cos \delta_{ij}(t)) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $n$  为系统节点数;  $P_i(t)$  和  $Q_i(t)$  为  $t$  时段第  $i$  个节点注入的有功和无功功率, 由该节点  $t$  时段负荷水平和并网光伏出力决定;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  和  $\delta_{ij}(t)$  分别为连接第  $i$  个节点和第  $j$  个节点支路的电导、电纳和  $t$  时段电压相角差;  $U_i(t)$  和  $U_j(t)$  分别为  $t$  时段第  $i$  个节点和第  $j$  个节点的电压幅值。

其中  $P_i(t)$  和  $Q_i(t)$  的计算分别如式(5)和式(6)所示。

$$P_i(t) = v_i P_{PV,i}(t) - u_i(t) P_i(t) \quad (5)$$

$$Q_i(t) = v_i Q_{PV,i}(t) + S_i(t) - u_i(t) Q_i(t) \quad (6)$$

式中:  $v_i$  为负荷节点  $i$  的光伏并网系数,  $v_i = 1$  表示该节点含分布式光伏并网,  $v_i = 0$  表示不含;  $P_{PV,i}(t)$  为负荷节点  $i$  在  $t$  时段光伏出力;  $Q_{PV,i}(t)$  为负荷节点  $i$  在  $t$  时段光伏逆变器的无功补偿;  $S_i(t)$  为负荷节点  $i$  在  $t$  时段无功补偿设备的出力;  $Q_i(t)$  为负荷节点  $i$  在  $t$  时段无功负荷。

### 3) 开关状态集约束。

在光伏型配电网中开关的操作次数受到限制, 当某一开关的历史操作次数达到最大次数则不允许加入故障恢复计划, 该约束如式(7)所示。

$$|k_i(t) - g_i(t-1)| \leq K_i(t), \quad i=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

式中:  $M$  为系统开关数量;  $k_i(t)$  为第  $i$  个开关在当前时段制定的状态;  $g_i(t-1)$  为第  $i$  个开关在上一个时段的状态, 当  $k_i(t) = 1$  且  $g_i(t-1) = 0$  时开关拉开, 当  $k_i(t) = 0$  且  $g_i(t-1) = 1$  时为开关合上;  $K_i(t)$  表示第  $i$  个开关的当前时段历史操作饱和状态, 随着开关操作次数不断更新, 当  $K_i = 0$  则表示不允许操作,  $K_i = 1$  表示允许操作。

### 4) 功率平衡约束。

光伏型配电网作为包含分布式发电并网的系统, 在故障恢复方案下可能形成孤岛, 所以功率平衡约束需要针对主网以及孤岛均成立, 该约束如式所示。其中式(8)为主动配电网功率平衡约束, 式(9)为第  $q$  个孤岛内的功率平衡约束。

$$P_{\text{grid}}(t) + \sum_{i=1}^N v_i P_{PV,i}(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t)[1 - u_i(t)] + P_{\text{loss}}(t) \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N_q} v_j P_{PV,j}(t) = \sum_{j \in N_q} P_j(t) + P_{\text{loss},q}(t) \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{grid}}(t)$  为  $t$  时段配电网向外网购电功率;  $P_{\text{loss}}(t)$  为  $t$  时段配电网网损功率;  $N_q$  为第  $q$  个孤岛的负荷节点集合;  $P_{\text{loss},q}(t)$  为  $t$  时段第  $q$  个孤岛的网损功率。由于孤岛是指独立运行的节点集合, 式内不考虑孤岛内的失电负荷节点。

## 1.3 动态故障恢复综合模型

基于以上光伏型配电网动态故障恢复模型目标函数和约束条件的建模, 可以得到当前  $t$  时段动态故障恢复综合模型如式(10)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\mathbf{g}(t)} f[\mathbf{g}(t), \mathbf{g}(t-1), \mathbf{P}_{PV}(t), \mathbf{P}(t)] = \sum_{j=1}^N u_j(t) c_j P_j(t) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(t) \in \mathbf{G}; \\ U_{i,\min} \leq U_i(t) \leq U_{i,\max}, \quad i=1, 2, \dots, N \\ |k_i(t) - g_i(t-1)| \leq K_i(t), \quad i=1, 2, \dots, M \\ P_{\text{grid}}(t) + \sum_{i=1}^N v_i P_{PV,i}(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t)[1 - u_i(t)] + P_{\text{loss}}(t) \\ \sum_{j \in N_q} v_j P_{PV,j}(t) = \sum_{j \in N_q} P_j(t) + P_{\text{loss},q}(t), \quad \forall q \end{array} \right. \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{P}_{PV}(t)$  为  $t$  时段配电网光伏出力向量;  $\mathbf{P}(t)$  为  $t$  时段配电网负荷水平向量; 从该综合模型可以看出, 动态故障恢复优化模型的控制变量为当前时段的开关状态集  $\mathbf{g}(t)$ , 而目标函数既受到  $\mathbf{g}(t-1)$  的影响, 也受到  $\mathbf{g}(t-1)$  的影响。控制变量  $\mathbf{g}(t)$  在  $\mathbf{g}(t-1)$  的基础上进行调整, 而调整基于的依据则是  $\mathbf{P}_{PV}(t)$  和  $\mathbf{P}_i(t)$  相对于上一个时段的变化。

## 2 基于改进萤火虫算法的模型求解

### 2.1 萤火虫算法基本原理及其改进

光伏型配电网故障恢复模型作为一个高维度、非线性、多变量的混合整数规划问题, 对智能算法的求解性能要求较高。本文采用改进萤火虫算法 (Firefly Algorithm, FA) 对所建立故障恢复模型设计求解流程。萤火虫算法中萤火虫个体具有以下行为特性:

1) 只要是在互相之间的感知范围之内, 任意两个萤火虫之间都会相互吸引, 吸引的结果是两者增强了向对方运动的倾向。

2) 荧光素值高的萤火虫能更多地吸引其余萤火虫趋向自己移动, 但是吸引的程度与距离有关, 距离越远则吸引力越小。

当  $r \leq r_0$  时, 第  $j$  个荧光素值较低的萤火虫向荧光素值较高的第  $i$  个萤火虫的运动, 第  $j$  个萤火虫的行为特性在数学上表述为如式(11)、式(12)所示<sup>[21-22]</sup>。

$$\mathbf{X}_j(t+1) = \mathbf{X}_j(t) + \beta_{(0)} \exp(-\gamma r^m) (\mathbf{X}_i(t) - \mathbf{X}_j(t)) + u_j \quad (11)$$

$$u_j = \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{X}_j(t+1)$  和  $\mathbf{X}_j(t)$  分别为第  $t$  时段和第  $t+1$  时段中第  $j$  个萤火虫的位置向量;  $\mathbf{X}_i(t)$  为第  $t$  时段第  $j$  个萤火虫感知范围内最亮的萤火虫的位置向量;  $\beta_{(0)}$  为两个萤火虫距离为零时的吸引力, 当距离不为零时吸引力随着距离呈现指数递减;  $r$  为萤火虫

之间的距离;  $\gamma$  为光强系数, 为一常数;  $m$  为萤火虫的数量;  $\text{rand}$  为 $[0,1]$ 之间的随机参数;  $\alpha$  为随机变量幅度参数;  $u_j$  为随机搜索量, 其幅度由  $\alpha$  来调节。

然而基本萤火虫算法在求解故障恢复模型时仍然会出现陷入局部最优解、求解效率较低、迭代次数较高等问题, 本节通过引入种群的精英策略和混沌搜索对基本萤火虫算法进行改进。

### 1) 种群的精英策略

根据文献巴莱多定律, 在智能算法的寻优过程中实际上种群中能起到引导寻优关键作用的个体比例仅为 20%<sup>[23]</sup>。因此通过引入精英策略到基本萤火虫算法中可以侧重于让精英萤火虫种群发挥更大的寻优引导作用, 提升寻优效率。对于种群数目为  $N$  的萤火虫种群, 首先依据目标函数以及约束条件对每个个体计算其适应度函数, 将适应度函数排序得到:

$$X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D), (i = 1, 2, \dots, [N/5]) \quad (13)$$

采用式(14)、式(15)所示的方式进行计算, 将得到的新种群补充到原来的萤火虫种群中, 同时重新根据适应度函数的排序, 保留适应度函数在前 20%  $N$  的萤火虫种群组成新的寻优种群。

$$K = d_{\text{istar}} \frac{\text{rand}(-0.5, 0.5)}{D} \quad (14)$$

$$X_{\text{inew}} = KX_i \quad (15)$$

式中:  $K$  为新解的变异因子;  $d_{\text{istar}}$  为最优解和离其最近的解之间的欧氏距离;  $D$  为解空间的维数,  $\text{rand}(-0.5, 0.5)$  代表在区间  $(-0.5, 0.5)$  随机取值。

### 2) 引入混沌搜索

萤火虫群体寻优的过程中, 对当前全局最优解在迭代过程中引入混沌搜索, 从而在该个体所在位置的一定范围内寻找更优的位置, 可以有效避免算法的全局最优解在运动过程中错过这些最优解, 同时提升当前全局最优解对其余萤火虫个体的指引效果。引入的混沌搜索过程如式(16)和(17)所示, 式中采用 Logistic 映射作为混沌运动公式<sup>[24]</sup>。

$$\chi_{u+1} = 4\chi_u(1 - \chi_u) \quad \chi_u \in (0, 1) \quad (16)$$

$$\chi_0 = \text{rand}(\cdot) \quad \chi_0 \notin \{0.25, 0.5, 0.75\} \quad (17)$$

式中:  $\chi_{u+1}$  和  $\chi_u$  分别为第  $u+1$  次和第  $u$  次迭代时的混沌变量值;  $\chi_0$  为混沌变量初始值。公式(16)中存在不动点 0.25、0.5 和 0.75, 故应避免混沌变量的初值为这些值。

首先将当前荧光素值最高的萤火虫所对应的每一维位置变量分别映射到 $[0,1]$ , 采用式(16)和(17)进行迭代, 每一次迭代记录下该萤火虫所对应的适

应度。当迭代完毕后, 选取过程中荧光素值高的萤火虫位置变量作为混沌搜索的结果。最后再映射回原来的位置变量范围作为迭代到该代时的该萤火虫位置。

## 2.2 动态故障恢复模型求解流程

基于改进萤火虫算法对所建立的光伏型配电网动态故障恢复模型设计求解流程如图 1 所示。

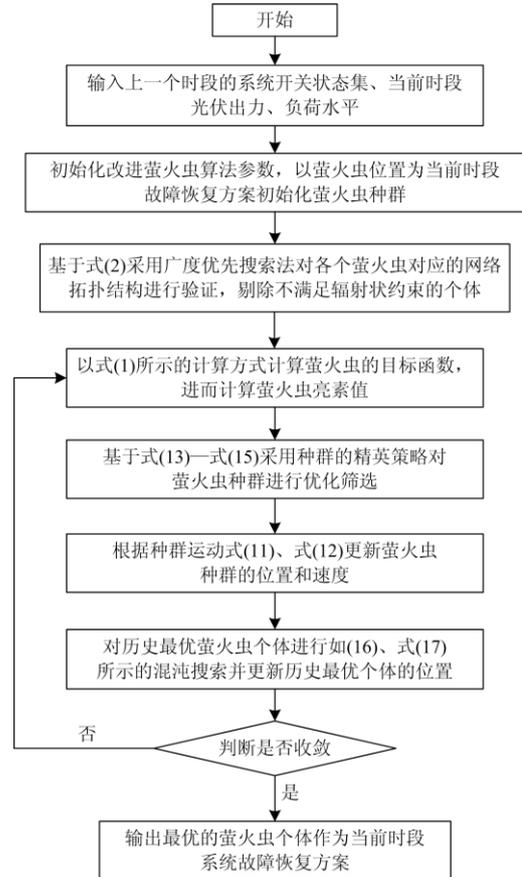


图 1 基于改进萤火虫算法的光伏型配电网动态故障恢复模型求解流程

Fig. 1 Solution flow of photovoltaic distribution network dynamic fault recovery model based on improved firefly algorithm

## 3 算例分析

### 3.1 故障恢复仿真设置

以 IEEE33 节点配电网系统为基础<sup>[25]</sup>, 对系统配置若干个并网分布式光伏形成光伏型配电网, 对所提出的模型进行验证。配电网网络拓扑图如图 2 所示, 图中实线为正常方式下运行馈线, 虚线为联络线, 故障期间内系统总负荷水平和各个分布式光伏出力功率如图 3 所示, 图中每个时段为 15 min, 配电网每 15 min 对系统的分布式光伏出力和负荷水平进行一次超短期预测作为故障恢复计划动态调整的基础, 其中节点 5 配置分布式光伏 1 容量为 120

kW, 节点 31 配置了分布式光伏 2 容量为 80 kW, 节点 16 配置了分布式光伏 2 容量为 90 kW。配电网系统的额定电压为 12.66 kV, 系统在故障初始时段的负荷水平为 3.715 MW 和 2.3 Mvar。此外各个负荷节点的重要权重系数如表 1 所示。

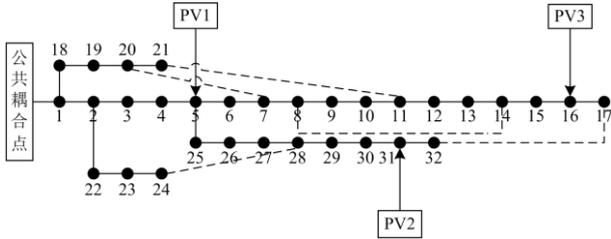


图 2 基于 IEEE33 节点标准系统的含分布式光伏并网的光伏型配电网网架结构图

Fig. 2 Grid structure of photovoltaic distribution network with distributed photovoltaic grid connection based on IEEE33 node standard system

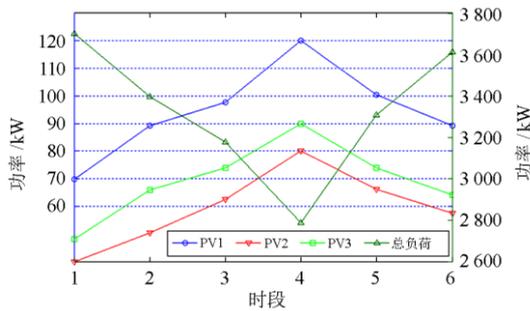


图 3 故障期间配电网分布光伏出力以及总负荷功率  
Fig. 3 Distributed photovoltaic output and total load power of distribution network during fault

表 1 配电网节点负荷等级

Table 1 Importance classification of node load in distribution network

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

为了分析动态故障恢复模型中各个要素对故障恢复方案的影响, 设置以下两种配电网故障场景如表 2 所示, 采用本文所建立的模型进行仿真, 以 15 min 为一个时段对故障恢复方案进行动态调整, 则配电网需要在初始时段故障恢复方案的基础上在后续每个时段进行开关状态集调整。

从表 2 中和图 3 中可以看出, 由于故障发生在中午时段, 所以光伏出力处于高峰期同时负荷水平处于低谷期。

表 2 配电网故障方式设置

Table 2 Setting of fault mode of distribution network

| 故障方式 | 故障支路 | 故障持续时长 | 故障起始时间 |
|------|------|--------|--------|
| 方式一  | 3-4  | 1.5 h  | 11:00  |
| 方式二  | 1-2  | 1.5 h  | 11:00  |

### 3.2 故障恢复结果及分析

运行所建立的光伏型配电网动态故障恢复模型, 可以得到方式一故障下的配电网故障恢复方案如表 3 所示, 表中包含了故障恢复初始方案以及后续各时段的开关状态集调整方案。

表 3 故障方式一下光伏型配电网动态故障恢复方案

Table 3 Dynamic fault recovery scheme of photovoltaic distribution network under fault mode 1

| 初始时段故障恢复方案 |  |
|------------|--|
| 故障支路       | 3-4  |
| 断开支路       | 2-3,3-4,15-16,16-17,30-31,31-32,8-9,11-12,13-14,29-30,25-26,26-27,9-10 |
| 合上支路       | 20-7,21-11,24-28   |
| 失电负荷节点     | 3,12,13,32,17,30,26,9,3  |
| 孤岛情况       | 孤岛一 16; 孤岛二 31   |
| 开关状态集调整方案  |  |
| 时段 2       | 合上 9-10, 合上 25-26  |
| 时段 3       | 合上 31-32, 合上 13-14   |
| 时段 4       | 合上 16-17, 合上 17-32   |
| 时段 5       | 拉开 25-26   |
| 时段 6       | 拉开 16-17,17-32   |

从表 3 中可以看出, 光伏型配电网首先基于故障情况和当前时段运行情况制定系统的初始故障恢复计划, 并基于该初始计划在后续时段进行调整。在初始故障恢复计划中, 当支路 3-4 发生故障时, 首先将该支路断开以隔离故障点, 接着通过合上上联络线支路 21-7, 21-11 和 24-28 对原本由支路 3-4 供电的后续配电网节点进行供电。出于支路容量的约束, 配电网通过断开支路 8-9 和支路 9-10 使节点 9 成为失电负荷节点, 通过断开支路 25-26 和支路 26-27 使得节点 26 成为失电负荷节点, 同时也使得系统网络拓扑满足了辐射状约束。由于对末端负荷节点的供电能力不足, 系统牺牲了三级负荷节点 30 和节点 15 以满足对一级负荷节点 31 和节点 16 的供电, 在这个过程中, 不得不形成了孤岛一节点 16 以及孤岛二节点 31。

在后续的若干时段中, 随着分布式光伏出力的提升以及系统负荷水平的下降, 配电网通过调整开关状态集降低失电负荷。首先在第二时段合上支路 9-10 和支路 25-26 对节点 9 和节点 26 恢复送电, 接着在第三时段通过合上支路 31-32 和支路 13-14 恢

复对节点 32 和节点 13 的供电。第四时段中, 主要是因为随着分布式光伏出力的进一步提升, 使得系统末端节点的供电能力增强, 而由于分布式光伏出力提升有限, 还不足以使得孤岛并网并行或者恢复对节点 15 和节点 30 的供电, 因此系统通过合上支路 16-17, 支路 31-32 和支路 17-32 重构了孤岛, 将原有的两个小型孤岛合并为了大型孤岛(节点 16,17,31,32), 充分利用了分布式光伏发电的出力。在时段 5 和时段 6 中, 由于分布式光伏出力降低以及负荷水平的上升, 系统不得不重新对节点 26, 17, 32 进行失电以保障功率平衡。事实上, 故障方式一下系统在故障期间的总失电负荷量为 1 392.56 kWh。

同理运行所建立的光伏型配电网动态故障恢复模型, 可以得到方式二故障下的配电网故障恢复方案如表 4 所示。

表 4 方式二配电网故障恢复方案

Table 4 Dynamic fault recovery scheme of photovoltaic distribution network under fault mode 2

| 初始时段故障恢复方案 |  |
|------------|--|
| 故障支路       | 1-2  |
| 断开支路       | 1-2,3-4,8-9,10-11,11-12,12-13,14-15,16-17,31-32, 29-30,30-31,23-24 |
| 合上支路       | 20-7,21-11,24-28,8-14  |
| 失电负荷节点     | 2,3,9,10,12,13,15,17,30,32,22,23                                   |
| 孤岛情况       | 孤岛一 31, 孤岛二 16   |
| 开关状态集调整方案  |  |
| 时段 2       | 合上 8-9, 断开 9-10  |
| 时段 3       | 合上 31-32, 合上 3-4,断开 2-3, 合上 23-24, 断开 22-23                        |
| 时段 4       | 合上 16-17, 合上 17-32   |
| 时段 5       | 断开 3-4   |
| 时段 6       | 断开 23-24   |

从表 4 中可以看出, 方式二的故障由于故障支路更加靠近上级配电网公共耦合点, 因此相比于方式一故障要严重得多。从初始故障恢复方案中可以看出, 系统主要通过联络线支路 20-7 和 21-11 后续节点进行供电。通过断开支路 8-9 和支路 9-11 使得节点 9 和 10 成为失电负荷节点, 断开支路 11-12 和 13-14 使得节点 12 和 13 成为失电负荷节点。在系统前端, 原本较为靠近电源点的负荷节点 2、3、22、23 由于支路 1-2 故障反而成为远离电源点的节点, 又由于其重要程度低成为失电负荷节点。在系统末端, 孤岛形成方式与方式一故障下相同, 满足了对重要节点 16 和 31 的供电。

从故障期间后续时段的开关状态集调整计划中可以看出, 开关状态集的调整对于降低失电负荷

量有着积极作用。在第二时段, 配电网通过合上 8-9 并断开 9-10 恢复了对节点 9 的供电, 在第三时段配电网通过合上 31-32 形成了新的孤岛(31,32), 恢复了对节点 32 的供电, 同时通过改变对应开关状态恢复了对节点 3 和节点 23 的供电。第四时段随着分布式光伏出力的提升, 配电网通过形成新的大型孤岛(节点 16,17,31,32)恢复了对节点 17 的供电。而在第 5 时段和第 6 时段, 由于分布式光伏出力下降以及负荷水平的回升, 系统不得不使节点 3 和 23 重新成为失电负荷节点。事实上, 故障方式一下系统在故障期间的总失电负荷量为 1 827.41 kWh。

为了验证计及开关状态集调整对故障恢复指标的影响, 分别针对方式一和方式二故障, 在不计及和计及开关状态集调整下的故障恢复指标对比如表 5 所示。从表 5 中可以看出, 无论是在方式一还是方式二的故障下, 本文计及开关状态集调整的光伏型配电网动态故障恢复模型都能够显著降低失电负荷量。事实上, 在方式一和方式二中配电网在故障恢复方案的执行下各个节点的电压偏差范围均在 $\pm 10\%$ 额定电压以内, 满足《电力系统安全稳定导则》中对系统电压范围的规定。

表 5 是否计及开关状态集调整下故障恢复期间失电负荷量对比

Table 5 Comparison of load loss during fault recovery whether the switch state set adjustment is taken into account

| 故障方式     | 不计及开关状态集调整   | 计及开关状态集调整    |
|----------|--------------|--------------|
| 方式一失电负荷量 | 1 566.25 kWh | 1 392.56 kWh |
| 方式二失电负荷量 | 2 108.84 kWh | 1 827.41 kWh |

为了验证本文改进萤火虫算法在求解配电网动态故障恢复模型中的效果, 以计及开关状态集的场景为例, 统计包括初始时段在内的各时段平均求解时间以及寻优效果形成对比如表 6 所示。从表 6 中可以看出, 采用改进萤火虫算法对配电网动态故障恢复模型进行求解, 能够增强寻优能力, 降低寻优时间并提升寻优效率。

表 6 基于基本 FA 算法和改进 FA 算法的模型求解指标对比

Table 6 Comparison of model solving indexes based on basic FA algorithm and improved FA algorithm

| 模型求解指标  | 基本萤火虫算法      | 改进萤火虫算法      |
|---------|--------------|--------------|
| 方式一寻优   | 1 424.32 kWh | 1 392.56 kWh |
| 方式二寻优   | 1 863.57 kWh | 1 827.41 kWh |
| 方式一求解时间 | 2.36 s       | 1.59 s       |
| 方式二求解时间 | 2.69 s       | 1.68 s       |

事实上, 以方式二故障下为例分别采用基本萤火虫算法和本文改进萤火虫算法求解配电网动态故

障恢复模型时的算法收敛曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,改进 FA 算法相比于基本 FA 算法,收敛速度更快,寻优能力更优。

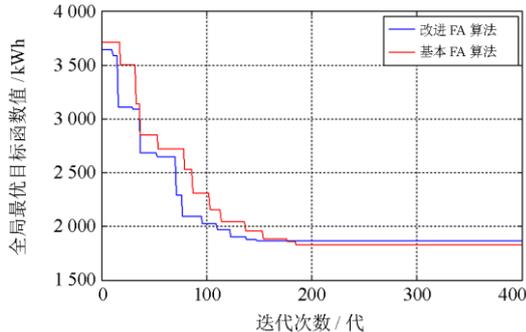


图 4 方式二故障下初始故障恢复方案求解算法收敛曲线对比

Fig. 4 Comparison of algorithm convergence curves for initial fault recovery under fault mode 2

## 4 结论

针对含分布式光伏并网的光伏型配电网故障恢复问题,考虑到故障期间对开关状态集调整建立含光伏并网配电网动态故障恢复模型,仿真结果表明:

1) 配电网故障支路越靠近系统公共耦合点,则故障越严重,失电负荷量越高,系统供电可靠性受到的影响越大。

2) 相比于不计及故障期间对开关状态集的调整,考虑开关状态集调整下的基于光伏型配电网动态故障恢复方法能够进一步降低系统失电负荷量。

3) 改进萤火虫算法相比于基本萤火虫算法在求解故障恢复模型中算法的性能指标更优。

## 参考文献

- [1] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.  
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Active distribution network technology and its progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [2] 王成山, 王丹, 周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9.  
WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9.
- [3] SHEN S, LIN D, WANG H, et al. An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized Thevenin equivalent parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 411-419.
- [4] 康文文, 赵建国, 丛伟, 等. 含分布式电源的配电网故障检测与隔离算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 25-29.  
KANG Wenwen, ZHAO Jianguo, CONG Wei, et al. Fault detection and isolation algorithm for distribution network with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 25-29.
- [5] ZHOU Xinyang, DALL'ANESE E, CHEN Lijun, et al. An incentive-based online optimization framework for distribution grids[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(7): 2019-2031.
- [6] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.  
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [7] 黎恒焜, 孙海顺, 文劲宇. 含分布式电源的配电网多代理故障自恢复系统[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 49-56.  
LI Hengxuan, SUN Haishun, WEN Jinyu. A multi-agent system for service restoration of distribution systems with distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 49-56.
- [8] KLEINBERG M, MILLER K M. Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1110-1117.
- [9] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 251-257.  
ZANG Tianlei, ZHONG Jiachen, HE Zhengyou, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 251-257.
- [10] SHEN Feifan, WU Qiuwei, XU Yan, et al. Hierarchical service restoration scheme for active distribution networks based on ADMM[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 118.
- [11] WANG Feng, CHEN Chun, LI Canbing, et al. A multi-stage restoration method for medium-voltage distribution system with DGs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2627-2636.
- [12] 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.
- [13] 黎恒焜, 孙海顺, 文劲宇. 含分布式电源的配电网多代理故障自恢复系统[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(4): 49-56.
- LI Hengxuan, SUN Haishun, WEN Jinyu. A multi-agent system for service restoration of distribution systems with distributed generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(4): 49-56.
- [14] IRVING M R, LUAN W P, DANIEL J S. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2002, 24(6): 447-457.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 search based service restoration algorithm for distribution network[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(7): 103-108.
- [20] YANG Yude, SONG Anjun, LIU Hui, et al. Parallel computing of multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 204-213. DOI: 10.1186/s41601-018-0095-z.
- [21] YANG X S. Firefly algorithms for multimodal optimization[C] // *Proceedings of the 5th International Conference on Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, 2009: 169-178.
- [22] 戴璐平, 吴薇, 黄蓓雯. 考虑不确定性的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(3): 48-55.
- DAI Luping, WU Wei, HUANG Beiwen. Optimal energy scheduling for family grid-connected photovoltaic systems considering uncertainty[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 48-55.
- [23] RAHNAMAYAN S, TIZHOOSH H R, SALAMA M M A. Opposition-based differential evolution[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, 12(1): 64-79.
- [24] 张兰勇, 孟坤, 刘胜, 等. 基于改进双粒子群算法的舰船电力系统网络故障重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 90-96.
- ZHANG Lanyong, MENG Kun, LIU Sheng, et al. Reconstruction of ship power system network fault based on improved two particle swarm algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9): 90-96.
- [25] 王艳松, 孙桂龙, 曹明志. 基于动态规划法的配电网联络线优化规划研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(10): 30-36.
- WANG Yansong, SUN Guilong, CAO Mingzhi. Research on the optimization of the tie lines based on dynamic programming for distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(10): 30-36.
- 
- 收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2020-04-03
- 作者简介:
- 刘 坤(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能配电自动化和配电网设备运行管理; Email: liushenjb1988@126.com
- 赵丽萍(1973—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电自动化及网络与信息安全;
- 李建萍(1983—), 女, 学士, 高级工程师, 研究方向为继电保护及其自动化。
- (编辑 葛艳娜)