

# 基于预想事故集的启发式故障恢复策略研究

传统配电网供电恢复策略花费大量在线处理时间,在一定程度上延长了整个故障恢复的处理进度,不利于缩短配电网非故障区域的停电时间。提出一种基于预想事故开关操作集的配启发式故障恢复策略,通过离线形成匹配库,故障发生后搜索相匹配的开关操作集合,快速完成非故障区域的供电恢复。以沈阳某实际配电网为例对故障恢复策略进行了验证,得到的恢复方案更符合电网对自愈能力的要求。

张岩<sup>1</sup> 潘轩<sup>2</sup> 张璇<sup>3</sup>/1. 国网北京市电力公司电力科学研究院 2. 国网北京电力调度控制中心 3. 国网北京市电力公司物资分公司

## 0 引言

传统配电网供电恢复策略<sup>[1]</sup>完成对传统的故障恢复过程都是在故障隔离之后,去除故障区域,然后再利用各种智能优化算法,确定一组满足各种约束条件的开关开闭组合,最终恢复对非故障区域的供电。上述过程故障隔离需要花费在线处理时间,去掉故障区域后的配电网重构会进一步占用在线时间,这样从故障恢复各个功能模块的配合上就在一定程度上延长了整个故障恢复的处理时间,不利于缩短配电网非故障区域的停电时间。

本文提出了一种基于预想事故匹配集的配电网故障恢复策略,以节点收缩分析法作为自愈策略的启动项,通过在线和离线相结合的方式,运用启发式算法生成最优故障恢复方案。其中目标函数指标涵盖自愈功能和负荷均衡度等因素,通过模糊评价得出各指标权重。用沈阳某实际配电网为例,对该故障恢复策略进行了详细说明。



张岩/助理工程师

### 关键词/Keywords

故障恢复·  
预想事故集·  
优化函数·  
自愈性·

## 1 配电网故障恢复目标函数

配电网的故障恢复是一个多目标的问题,其优化函数与传统故障恢复目标函数<sup>[1]</sup>的不同之处在于除了考虑常规的一些指标外,还要计及配电网的自愈能力指标,使选择出来的故障恢复方案更符合电网对“自愈”能力的要求,提高防范再次故障的能力,并且尽量达到各电源点载荷平衡。由于自愈目标不同所对应的故障策略优化目标函数各异。根据不同的自愈目标和侧重点完成对故障恢复目标函数的建立。主要考虑以下指标。

(1) 开关操作代价 $Y_{op}$  (本文用开关换位次数表示)

故障的自愈主要是通过对开关的操作进行控制来完成,因此会造成开关的磨损。开关的操作次数会直接影响开关的使用寿命。又因目前我国配电网的自动化程度还亟待提高,因此无法实现对所有开关实行远动操作,因此在计算开关操作代价的时候分为可遥控操作的开关和需就地操作的开关分别进行计算,计算公式为

$$Y_{op} = Y_1 + K_{op} Y_2 \quad (1)$$

式中,  $Y_1$  为故障恢复过程中可实现远程操作的开关的操作次数;  $Y_2$  为故障恢复过程中只能实行就地操作的开关的操作次数;  $K_{op}$  为实行就地操作的开关对自愈造成影响的等价惩罚系数。隶属函数为

$$\mu(Y_{op}) = \begin{cases} 1.0 & n \leq 1 \\ -\frac{(Y_{op})}{8} + \frac{9}{8} & 1 < n \leq 9 \\ 0.0 & n > 1 \end{cases} \quad (2)$$

描述开关操作代价隶属度的曲线如图1所示, 其中 $S_{N1}=1$ ,  $S_{N2}=9$ 。

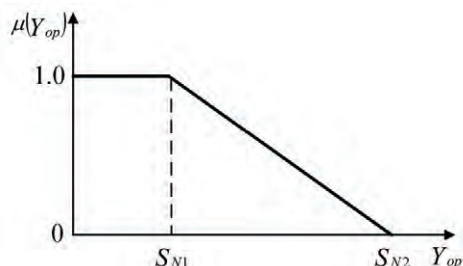


图1 分段开关操作代价隶属度曲线

## (2) 失电负荷量 $L_{out}$

在电网建设时期会考虑给馈线留有一定的裕度, 以便在电网发生故障后, 可以通过部分馈线转带非故障失电区的供电。但是当故障较严重, 影响范围太大时会存在馈线裕度容量无法满足所有非故障失电区负荷供电的情况, 此时应尽可能地减少停电损失, 计及负荷优先级, 优先对重要负荷进行供电恢复, 失电负荷量计算公式为

$$L_{out} = K_{out} \sum L_{1i} + \sum L_{2i} \quad (3)$$

式中,  $L_{1i}$ 为第 $i$ 个没有恢复供电的重要负荷;  $L_{2i}$ 为第 $i$ 个没有恢复供电的普通负荷;  $K_{out}$ 为重要负荷失电所对应的惩罚系数。

描述失电负荷量隶属度的曲线如图2所示。

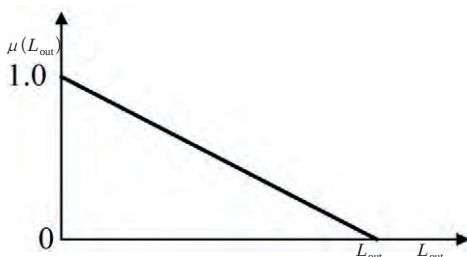


图2 失电区未恢复负荷隶属度曲线

## (3) 负荷分配均衡度 $J$

为了保证在进行配电网的自愈过程中考虑各电源点的载荷均衡分配问题, 本文提出一种计及负荷分配均衡度的指标, 以所有馈线中最大载流量与最小载流量的之差最小为目标函数。具体做法为: 将所有馈线的载流量进行从小到大排序, 取排列中最小值与最大值的比值即为 $J$ , 计算公式为

$$J = L_1 + L_m \quad (4)$$

式中,  $m$ 为线路数目;  $L_1$ 为各条馈线载流量的最小值;  $L_m$ 为各条馈线载流量的最大值。

描述负荷分配均衡度的隶属度曲线如图3所示。

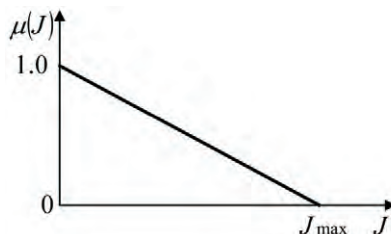


图3 负荷分配均衡度隶属度曲线

## (4) 网损 $w$

网损是衡量电力系统运行经济性的重要指标。进行配电网故障恢复的方案选择时应尽量减少系统的功率损耗, 提高运行经济效益<sup>[2]</sup>。由于配电网的负荷是在时刻发生变化的, 因此文中选择某一具体时刻的负荷状态作为代表来计算功率损耗。此处用系统的有功损耗作为衡量网损的指标, 计算公式为

$$W = \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (5)$$

式中,  $n$ 为支路总数 $r_i$ 为支路的电阻 $P_i$ 、 $Q_i$ 、 $|V_i|$ 为支路的有功功率、无功功率和节点电压幅值<sup>[3]</sup>。

描述失电负荷量隶属度的曲线如图4所示, 其中,  $W_1$ 为0.7倍故障前网损,  $W_2$ 为2倍故障前网损。

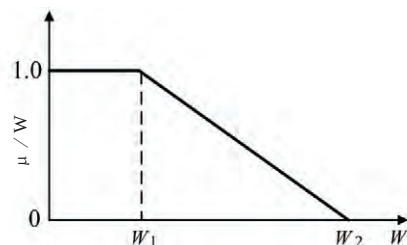


图4 网损隶属度曲线

## (5) 未失电区负荷转移量 $L_t$

当非故障失电区停电范围过大, 超出相邻电源的后备容量时, 必要时要考虑将这些电源正常供电区域的部分负荷转移到较远的其他电源处, 以增加与失电区相邻的电源的后备容量, 这部分被转移走的负荷就称为非失电区负荷转移量。从供电经济性和供电可靠性的角度希望减少对未失电区的影响,  $L_t$ 越小越好。  $L_t$ 函数表达式为

$$L_t = \sum_{j=1}^n L_{tj} / I_{loss} \quad (6)$$

式中,  $L_{tj}$ 为第 $j$ 处的负荷转移量;  $T$ 为负荷转移的数量。

描述未失电区负荷转移量 $L_t$ 隶属度的曲线如图

5所示。

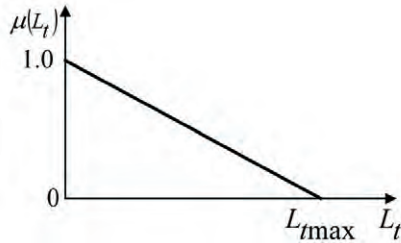


图5 未失电区负荷转移量隶属度曲线

(6) 对再次故障的储备度 $R$

系统发生故障后,需要正常的线路替代故障线路转供一部分供电,因此在电网各线路要留有一定的备用容量才能更好地实现自愈。为了衡量系统发生故障后线路对再次发生故障后的储备程度,用线路的最大馈线负载量作为考虑对再次故障时的恢复储备,计算公式为

$$R = \frac{S_i}{S_{\max}} \quad (7)$$

$$\mu(R) = \begin{cases} 1.0 & R \leq 0.7 \\ -\frac{10}{7}R + \frac{10}{7} & 0.7 < R \leq 1.0 \\ 0.0 & R > 1.0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $S_i$ 为实际的馈线负载功率, $S_{\max}$ 为馈线的极限负载功率。

描述再次故障的储备度 $R$ 的隶属度曲线如图6所示,其中 $R_1=0.7$ , $R_2=1.0$ 。

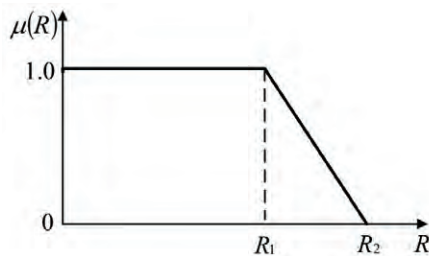


图6 对再次故障的储备度隶属度曲线

(7) 电压质量 $V$

完成故障恢复后,各节点的电压质量关系到系统的稳定运行。用各节点远离系统电源电压的程度作为评判电压质量的指标,即各节点最大电压降落百分数的绝对值,计算公式为

$$V = \max \left| \frac{V_i - V_0}{V_0} \right| \quad (9)$$

式中, $V_i$ 为各节点实际电压; $V_0$ 为系统电源电压。

描述负荷分配均衡度的隶属度曲线如图7所示。

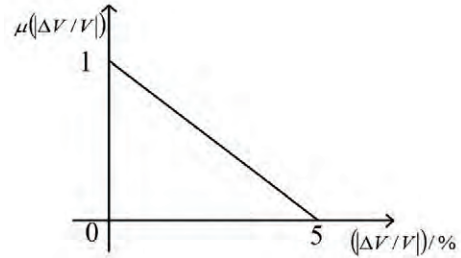


图7 电压质量隶属度曲线

(8) 自愈能力指标 $K$

自愈能力<sup>[7]</sup>指标用来描述故障后的网络抵抗再次故障和风险的能力,用抗毁度来体现。抗毁度越高,自愈能力指标取值越高,又由于实际配电网抗毁度数值均较小,因此将其扩大10倍后作为自愈能力指标的值。

$$K = 10mv(G) \quad (10)$$

描述自愈能力指标的隶属度曲线如图8所示。

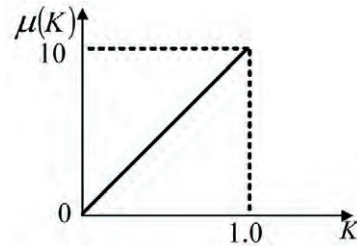


图8 自愈能力指标隶属度曲线

不同的配电网衡量标准以及故障恢复要求各不相同,以上各指标对自愈策略的影响力和侧重点均有差异,因此各指标用0~1区间的隶属度来表示,并对各指标进行模糊性评价得出相应权重。最后用模糊加权求和得到综合优化故障恢复策略的目标函数为

$$f = \max [\lambda_{Y_{op}} \mu(Y_{op}) + \lambda_{L_{out}} \mu(L_{out}) + \lambda_j \mu(j) + \lambda_W \mu(W) + \lambda_{L_t} \mu(L_t) + \lambda_R \mu(R) + \lambda_V \mu(V) + \lambda_K \mu(K)] \quad (11)$$

式中, $\lambda_i$ 为各个指标的权重系数,且满足

$$\lambda_{Y_{op}} + \lambda_{L_{out}} + \lambda_j + \lambda_W + \lambda_{L_t} + \lambda_R + \lambda_V + \lambda_K = 1 \quad (12)$$

最终各指标的权重用层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 得出结果。

## 2 基于预想事故集的故障恢复策略

在配电网当前运行方式和负荷水平下,离线

对每一段配电区域作为预想事故加以切除, 选用适合配电网规模的供电恢复算法, 确定出针对该区域切除后网络重构需要的一组开关操作集合, 形成包含该网络每一种故障的预想事故开关操作集合。一旦配电网发生故障, 利用故障区域定位与隔离算法确定故障位置作为匹配条件, 在线实时对预想事故开关操作集合进行搜索, 找到与预想事故集中相匹配的开关集合, 并迅速做出动作以达到快速自愈的预期。这样, 传统故障恢复方案中需要在线完成的故障恢复算法, 提前到故障发生前进行离线计算, 以预想事故集的方式加以描述, 故障后直接调用匹配库, 从根本上缩短供电恢复时间。

基本框架如图9所示。

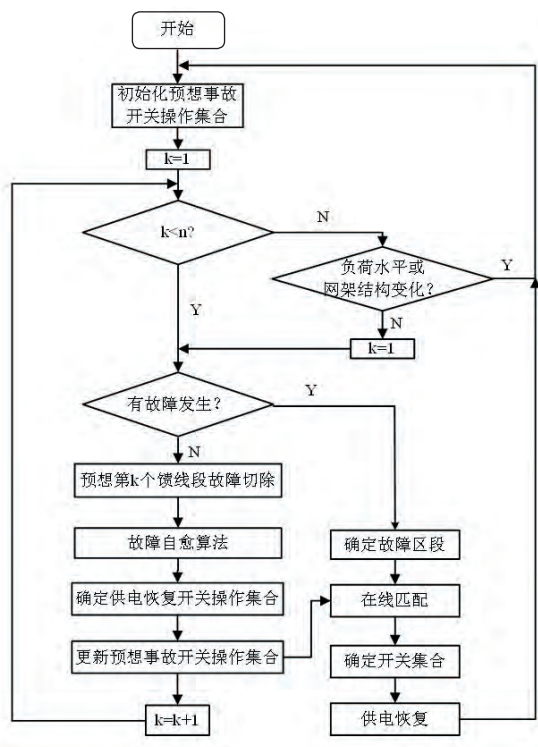


图9 基于预想事故集的故障恢复策略流程图

### 3 启发式故障恢复算法

启发式故障恢复算法<sup>[6]</sup>是在网络搜索时根据网络自身特点融入部分启发性知识, 使搜索方向向最优结果发展, 通过开关操作加以实现。该方法时效性高、通用性广及实用性强, 可以在一定时间内有效缩小搜索空间, 启发规则广泛适用于配电网结构且算法易于实现<sup>[8]</sup>。

#### 3.1 启发式故障恢复策略

首选一级馈线进行整区恢复供电, 即闭合一个一级联络开关对失电区实行复电。当其备用容量可以满足失电区的全部供电并且不发生电流电压越限情况, 则该方案作为备选方案。

选取与失电区直接相连, 且备用容量 $I_L$ 大于失电区失电量 $I_{loss}$ 的联络开关作为候选联络开关, 将这些联络开关根据备用容量的降序排列, 从排在第一个的联络开关开始闭合, 依次对失电区复电并进行三相潮流计算和安全校验<sup>[4]</sup>, 若仅存在电压越限, 则选择下一个候选联络开关; 对满足电流电压要求的方案进行输出, 作为备选方案。

若所有联络开关均不满足容量要求或仍存在电压电流越限问题, 则直接输出结果, 无法用一级支持馈线完成自愈。

选择闭合两个一级联络开关进行分区供电恢复, 同时为保证电网的辐射状结构还需打开某一个分段开关, 当满足容量和电流电压要求时, 将方案作为备选方案。

将一级联络开关两两组合形成组合对 $(t_1, t_2)$ , 选取满足两个联络开关的备用容量之和 $(I_{t1} + I_{t2})$ 大于失电区失电量 $I_{loss}$ 的组合对作为候选组合对, 即希望通过两个联络开关同时对失电区进行供电, 为保证电网的辐射状结构还应打开某一个分段开关, 选择分段开关时只考虑失电区内的分段开关。如此, 候选的联络开关和分段开关只是全部开关集的一个子集, 大大缩小了搜索空间。

分段开关的选取方法为: 计算 $t_1$ 和 $t_2$ 之间的候选分段开关SS的可转移负荷量 $I_s$ , 闭合 $t_1$ 、 $t_2$ 后, 断开一个满足 $I_s < I_L$ 的分段开关并进行三相潮流计算和安全校验, 若满足电流电压要求, 则联络开关组合对与该分段开关可以为失电区恢复供电, 作为备选方案输出, 然后继续寻找新的候选分段开关进行验证。若不存在满足条件的分段开关, 则考虑下一个候选组合对<sup>[5]</sup>。

若不存在满足容量要求的组合对, 则通过二级支持馈线进行供电恢复; 若仅存在电压越限, 则通过切负荷满足安全约束。

当无法通过一级支持馈线进行整区恢复时,

考虑用二级支持馈线完成故障的自愈，将未失电区的部分负荷转移到二级馈线以增加一级馈线负荷裕度；当满足容量和电流电压要求时，将方案作为备选方案输出。

若无法通过一级馈线和二级馈线完成对所有失电负荷的故障恢复时，用切负荷的方式满足系统的容量要求和安全约束。

若所有供电电路径均已搜索完毕或仍存在安全越限问题，仅存电压越限时，从越界母线向变电站方向搜索，打开搜索到的第一个处在失电区中的分段开关，完成切负荷。故障恢复算法的流程图如图10所示。

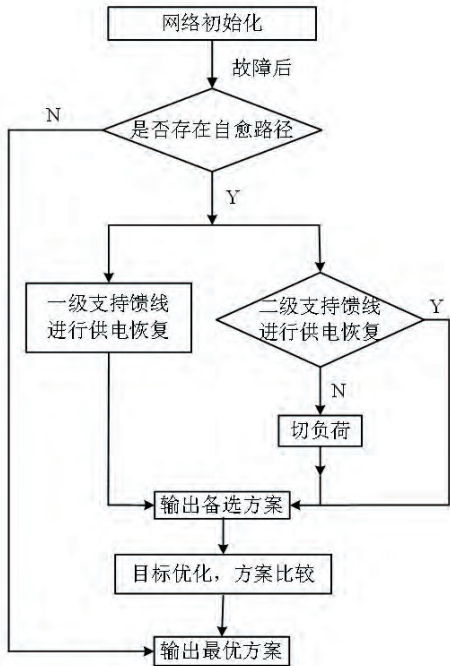


图10 故障恢复算法流程图

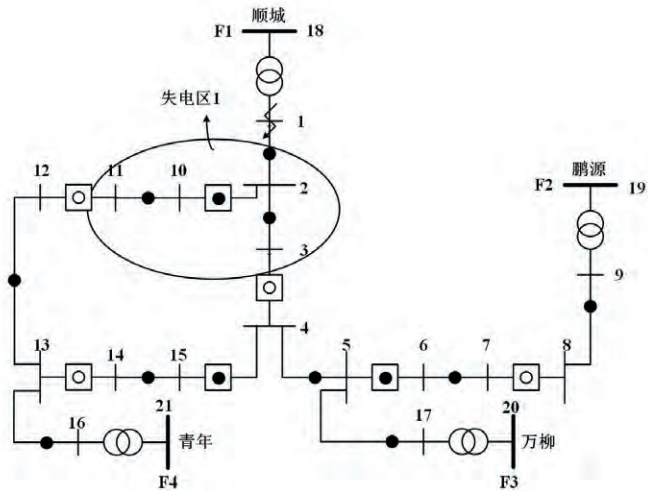
3.2 算例分析

以沈阳某实际配电网为例，如图11所示，该配电网中含有4条馈线，21个节点，4个联络开关，13个分段开关，其中4个联络开关和4个分段开关为可远程遥控的开关，其余9个分段开关是不可遥控需要人为手动的普通开关。

以母线1发生故障为例说明本文故障恢复的策略。

故障发生后，跳开开关S(1-2)隔离故障，得到非故障失电区为图中“失电区1”。根据节点收缩法判断该非故障失电区存在自愈路径，因此启动故障恢复策略，为其寻找最优故障恢复方案。

非故障区域包含的支路有{2, 3, 10, 11}，



F1-F4: 馈线 1-17: 负荷和母线 ●: 开关闭合  
○: 开关断开 □: 可遥控开关

图11 配电网故障恢复策略及优化算例

总失电负荷为 $I_{loss1}$ 。

通过一级馈线实现自愈:一级联络开关有{ $T(11-12)$ ， $T(3-4)$ }，通过计算得到联络开关的备用容量关系为: $I(t11-12) > I_{loss1} > I(t3-4)$ 。

因此闭合联络开关 $I(t11-12)$ ，对配电网进行潮流计算，若有电压越限，则尝试下一满足电流要求的联络开关；若无越限情况发生，则输出该方案为自愈策略之一。

由此得到，通过一个一级联络开关进行自愈的方案有：方案一{闭合 $T(11-12)$ }。

选择闭合两个一级联络开关进行分区供电恢复，同时为保证电网的辐射状结构还需打开某一个分段开关。一级联络开关组合对只有{ $T(11-12)$ ， $T(3-4)$ }，且 $I(t11-12) + I(t3-4) > I_{loss1}$ ，因此该组合对可作为候选组合对。两者之间的分段开关有 $S(2-3)$ ， $S(2-10)$ ， $S(10-11)$ 。计算各分段开关SS的可转移负荷量 $I_s$ ，选择满足 $I_s < I_i$ 的作为候选分段开关。该联络开关组合主要考虑各分段开关相对 $T(3-4)$ 的可转移负荷量。本算例中，分段开关 $S(2-3)$ 可向联络开关(3-4)转移的负荷的母线集为{母线3}， $I(s2-3) < I(m3-4)$ ，满足容量要求，则闭合 $T(11-12)$ ， $T(3-4)$ ，断开 $S(2-3)$ 并进行潮流计算，不存在越限问题，因此可输出该方案作为自愈策略之一。同理， $I(s2-10) < I(m3-4)$ 并满足电流电压要求， $S(2-10)$ 与该组合对可以作为自

愈策略输出； $I(s10-11) > I(m3-4)$ ，因此，S(10-11)与该组合对无法构成自愈策略。

由此得出，通过一级联络开关组合对与分段开关的配合进行自愈的方案有：方案二{闭合T(11-12)、T(3-4)，断开S(2-3)}；方案三{闭合T(11-12)、T(3-4)，断开S(2-10)}。

### 3.3 方案比较

由于故障策略意在尽量减少失电负荷，因此如果存在可以将失电区负荷全部恢复的区域就不再考虑只能恢复部分供电的方案。根据线路具体情况和当地负荷水平本算例目标函数指标只考虑开关操作代价 $Y_{op}$ 、对再次故障的储备度 $R$ 、自愈能力指标 $K$ 、未失电区负荷转移量 $L_t$ 和负荷分配均衡度 $J$ 。由模糊度评价并结合经验得到各指标的权重如下表所示：开关操作代价权重最高， $\lambda_y = 0.5$ ；描述自愈能力的两个指标共同权重为0.25（ $\lambda_r = 0.125$ ， $\lambda_k = 0.125$ ）；负荷分配均衡度权重为 $\lambda_j = 0.15$ ；未失电区负荷转移量权重为 $\lambda_{L_t} = 0.1$ 。目标函数指标权重系数见表1，三种方案比较结果如表2所示。

表1 目标函数指标权重表

| 指标 | 开关操作代价<br>$\lambda_{Y_{op}}$ | 负荷分配均衡度<br>$\lambda_j$ | 再次故障储备度<br>$\lambda_R$ | 抗毁度<br>$\lambda_k$ | 未失电区负荷转移量<br>$\lambda_{L_t}$ |
|----|------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|------------------------------|
| 权重 | 0.5                          | 0.15                   | 0.125                  | 0.125              | 0.1                          |

表2 失电区1自愈方案比较

| 指标隶属度<br>方案 | 开关操作<br>代价<br>$\mu(Y_{op})$ | 负荷分配<br>均衡度<br>$\mu(J)$ | 再次故障<br>储备度<br>$\mu(R)$ | 自愈能力<br>指标<br>$\mu(K)$ |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 方案一         | 1                           | 0.231                   | 1                       | 0.421                  |
| 方案二         | 0.5                         | 0.225                   | 0.429                   | 0.395                  |
| 方案三         | 0.75                        | 0.188                   | 0.372                   | 0.414                  |

由表2得到，方案一的目标函数值最大，为母线1故障后的最优故障恢复方案。通过本文自愈策略寻找到的方案开关操作代价小，且优先考虑了可遥控开关，并且自愈后的网络对再次故障的储备度较高。

## 4 结束语

配电网故障恢复策略的生成与优化采用离线

和在线相结合的方法，正常运行时离线建立预想事故集和开关动作匹配库，故障发生后在线搜索与故障元素相匹配的开关操作集合，这样大大减少了故障恢复的时间。匹配库的生成采用启发式算法得到多个候选方案，用目标函数选择出综合指标最优的最终方案记入匹配库。本文采用的优化函数除了考虑传统目标函数涉及的因素，还考虑了自愈能力和载荷平衡，使选择出来的方案更符合电网对自愈能力的要求。

### 参考文献

- [1] 鲁丽娟. 自愈性的智能电网[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(35): 92-95.
- [2] 孙雅明, 杜红卫. 可靠性知识与最优评估配电网故障恢复(二): 最优评估[J]. 电力系统自动化, 2003, 127(13): 36-40.
- [3] 史晟辉. 基于图形化的配电网重构算法研究[J]. 吉林电力, 2002, (4): 24-27.
- [4] 盛四清. 基于树型结构的配电网故障处理新算法[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 42-46.
- [5] 谷群辉, 罗安. 一种快速高效的配电网供电恢复算法[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2003, 34(3): 52-56.
- [6] Aoki K, Satoh T. Outage state optimal load allocation by automatic sectionalizing switches operation in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, PWRD-2(4).
- [7] 张璇. 配电网自愈控制及优化策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [8] 战杰. 分布式电源和微网在智能配电网自愈功能中的作用分析[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2010, 13(2): 33-36.
- [9] 刘莉, 陈学锋. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13).

(收稿日期: 2015-05-26) EA

### 作者简介

张岩(1988-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 从事电网运行分析、电力系统计算等工作。

潘轩(1983-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事电网调度运行及安全稳定分析等工作。