

# 计及过程安全性的配电网重构开关顺序优化

朱嘉麒<sup>1</sup>,朱炳铨<sup>2</sup>,徐玮韡<sup>3</sup>,董树锋<sup>1</sup>,徐立中<sup>2</sup>,倪秋龙<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;

2. 国网浙江省电力公司,浙江 杭州 310007;

3. 国网浙江省电力公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014)

**摘要:**配电网重构过程应采用合理、可靠的开关操作顺序以避免对配电网的稳定运行产生冲击。采用改进的二进制粒子群算法求取配电网重构解集,对迭代过程中的无效粒子进行随机性的坐标修正,提升搜索效率;提出配电网重构实施过程合环、解环应满足的安全性约束,并应用戴维南等效模型计算合环冲击电流;提出用于求解计及过程安全性的配电网重构开关顺序的递归算法,搜索过程遵循贪心策略;针对递归过程中的无效中间解,以二进制编码方式记录,避免重复计算。IEEE 33 节点系统、PG&E 69 节点系统算例结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:**配电网重构开关顺序;过程安全性;二进制粒子群算法;合环冲击电流;递归算法

**中图分类号:**TM 761

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.006

## 0 引言

配电网中包含大量的常闭分段开关和部分常开联络开关。从图论的角度看,若配电网以辐射状运行为必要约束条件,其实际可有多种不同的运行结构,进而就引出了一个择优问题。配电网重构的目的就是通过改变线路的开关状态改变配电网的网络结构,以实现某种目标下的最优运行。配电网重构是降低配电网损耗的有效途径,并且还可均衡负荷、消除过载以及提高供电电压质量<sup>[1]</sup>。

目前已有大量文献针对配电网重构的求解提出可行算法,包括传统数学优化算法<sup>[2-3]</sup>、启发式算法<sup>[4-7]</sup>以及各类人工智能随机优化算法,如遗传算法<sup>[8-11]</sup>、免疫算法<sup>[12-15]</sup>、粒子群算法<sup>[16-18]</sup>等,都取得了一定的效果。目前,大多关于配电网重构求解的研究仅停滞于获得优化后的重构解,但并非所有优化后的重构解都可应用于配电网实际运行中,例如某些配电网重构方案会导致联络开关合环过程中合环冲击电流越限或重构过程中的节点电压过高,从而危害配电网安全可靠运行。因此,得到优化的重构解仅是配电网重构的第一步,如何将配电网从初始运行状态通过合理的开关顺序安全过渡至最优运行状态是实现配电网安全重构的关键。

目前对于开关操作顺序的研究主要集中在系统故障恢复场景<sup>[19-24]</sup>,以最大化恢复系统可用发电容量或经济效益为目标函数。不同于故障恢复场景,运行方式规划中配电网重构的目标是提升系统的运行效率以及供电质量,开关操作顺序也应当以系统

安全、可靠运行为首要目标。实际运行中,配电网调度部门通常通过合环、解环交替操作实现配电网运行方式的调整,在合环过程中,若联络开关两端的电压相量差较大,会产生较大的合环冲击电流,造成电流保护动作,影响系统的稳定运行,而解环过程则无冲击电流影响<sup>[25-27]</sup>。因此,需要分别对合环、解环过程建立安全性约束,进而通过一定的搜索策略获取安全、可靠的重构开关操作顺序。

综上,在目前已有的配电网重构研究中,很多方法都能高效、准确地获得最终拓扑的最优解,但均没有考虑重构实施策略的安全性,无法确保重构结构的顺利转换。基于此,本文提出一种基于递归思路的重构实施策略求解方法,该方法分为2步:首先通过改进二进制粒子群算法获得配电网重构解集;然后建立重构过程合环、解环的安全性约束,遵循贪心策略<sup>[28]</sup>,提出一种采用递归思路的搜索算法,依次求取集合中各解在安全性约束下的开关顺序。针对递归过程的无效中间解,以一种二进制编码方式进行记录,避免重复计算。本文所提方法能够保证输出的重构策略可在实际运行环境中投入使用,避免因重构策略不当导致配电网重构对配电网运行造成较大的冲击。

## 1 考虑过程安全性重构策略的基本思路

配电网运行方式规划中的重构实施应以系统运行安全性为主要考量,该问题有2种解决思路。第一种是将重构过程的安全性约束加入优化问题描述中,该方法若遵循贪心策略,则无法保证最后结果是最优的,若采用遍历手段,则计算复杂性过高,对于大型网架系统,搜索可能会不收敛。本文提出第二种思路,分2步解决该问题:第一步,采用改进的二进制粒子群算法求取配电网重构的最优解集,将迭

收稿日期:2018-10-25;修回日期:2019-03-13

基金项目:国家电网公司科技项目(52110418000M)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(52110418000M)

代过程中更新产生的目标值最小粒子记录于集合中,并按照优选顺序排序;第二步,考虑过程安全性,提出重构过程中合环、解环的约束条件,同时建立合环冲击电流的戴维南等值计算模型,提出基于递归思路的开关操作顺序搜索算法,按优选顺序依次对第一步产生的解求取重构实施策略,遵循贪心策略,一旦找到可行方案,便停止搜索并输出结果,同时保证在确认无解前遍历全部可能情况。在第二步中,若出现当前选取的重构解不能找到可行实施策略的情况,顺次选取第一步生成集合中的次优解,可以在确保系统安全可靠的前提下最大化提升配电网的运行效率。这种方法效率较高且计算稳定,流程图如图 1 所示。

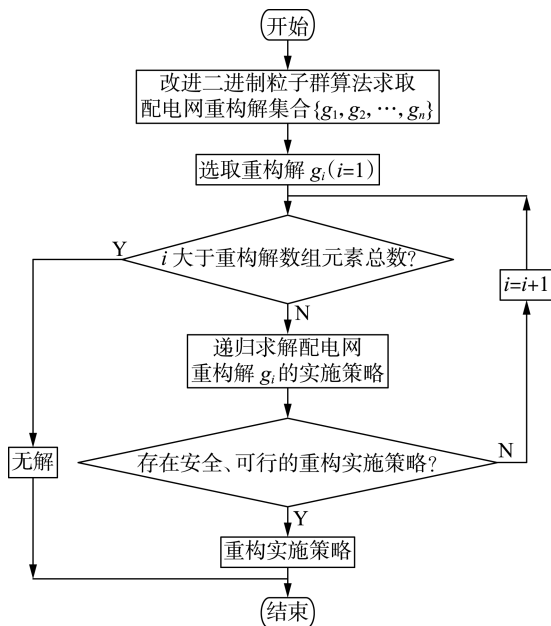


图 1 本文方法流程图

Fig.1 Flowchart of proposed method

## 2 基于改进二进制粒子群算法的配电网重构解集求解

在获取配电网重构的实施策略前,首先需要获得按优选顺序排序的配电网重构解集。传统的数学规划方法只能给出最优解,而不能保留次优解,一旦最优解不能通过校验,就无法进一步考虑应用次优解的情况。本文采用二进制粒子群算法解决该问题,将每次新产生的目标值最小粒子添加至解集的第一位,其余解则往后顺延一位,以获取按优选顺序排序的解集。对于断开开关数不等于联络开关数的无效粒子,提出一种类同于遗传算法变异操作的修正方式,提升粒子的有效率,同时增强算法搜索的随机性。

### 2.1 配电网重构数学模型

配电网重构的目标有很多,不失一般性,本文以网损最小目标为例。采用文献[17]中的配电网重

构建模方式,建立重构解应当满足的潮流约束、节点电压约束、支路容量约束和网络辐射状约束。

$$\min f = \sum_{i=1}^B k_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (1)$$

$$A_i = I \quad (2)$$

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

$$S_i \leq S_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, B \quad (4)$$

$$g \in G \quad (5)$$

其中,变量含义见文献[17]。

### 2.2 二进制粒子群算法

二进制粒子群算法<sup>[29-30]</sup>具有收敛速度快、计算稳定等特点。粒子的速度更新公式如式(6)所示,式中各变量含义详见文献[30]。

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (6)$$

$$d = 1, 2, \dots, D$$

二进制粒子群算法的位置更新公式采用 Sigmoid 函数映射粒子的速度值。

$$S(v_{id}^{t+1}) = 1 / [1 + \exp(-v_{id}^{t+1})] \quad (7)$$

进一步,坐标  $x_{id}^{t+1}$  迭代公式如下:

$$x_{id}^{t+1} = \begin{cases} 1 & r_3 < S(v_{id}^{t+1}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $r_3$  为(0,1)之间的随机数。

### 2.3 编码及坐标修正

对于一个含  $B$  条支路的配电网系统,规定粒子的维数为  $B$ 。粒子每一维的坐标为 0 或者 1,分别表示对应支路开关的断开、闭合。

对于一个包含  $L$  个环路的配电系统,根据图论树的含义,为了保证网络辐射状约束得到满足,每个粒子的位置均应有  $L$  个维度的坐标为 0,即对应  $L$  条支路的开关断开。而在粒子群算法的迭代过程中,由于算法的随机性,不可避免地会出现某些粒子坐标为 0 的数量不等于  $L$  的情况。为减少无效粒子的产生,此时采用一种随机置 0 或 1 的修正方法。设第  $t$  次迭代,粒子  $i$  坐标为 0 的数量为  $k$  ( $k \leq B$ ),分别为第  $j_1, j_2, \dots, j_k$  维坐标,对应的坐标集合为  $S_{\text{zero}} = \{x_{ij_1}^t, x_{ij_2}^t, \dots, x_{ij_k}^t\}$ ; 粒子  $i$  坐标为 1 的数量为  $B-k$ ,分别为第  $l_1, l_2, \dots, l_{B-k}$  维坐标,对应的坐标集合为  $S_{\text{one}} = \{x_{il_1}^t, x_{il_2}^t, \dots, x_{il_{B-k}}^t\}$ 。当  $k > L$  时,从  $S_{\text{zero}}$  中随机选取  $k-L$  个坐标,强制置 1; 当  $k < L$  时,从  $S_{\text{one}}$  中随机选取  $L-k$  个坐标,强制置 0。从而保证满足系统断开支路数等于环路数这一辐射状运行的必要条件。

上述修正方式类同于遗传算法的变异操作,增强了算法搜索的随机性,使算法能跳出局部最优解,从而更大概率地收敛于全局最优解。

### 3 配电网重构实施策略生成

在实际工程中,为了保证通电的不中断,配电网重构的转换一般采用合环、解环交替的方式进行<sup>[26]</sup>。故重构实施策略的本质其实是一组合环、解环交替进行的开关操作顺序,在满足合环、解环过程安全性约束的情况下,使网络拓扑逐渐从初始状态过渡到重构解。其中合环过程因为会产生冲击电流,需要建立相应的计算模型对冲击电流进行校验。

对于同一个重构解可能存在多个可行的实施策略。仅从能否安全实施的角度看,不同的实施策略是等价的,因此搜索过程只要找到一个可行方案便可结束。可将搜索问题分解为若干阶段,遵循贪心策略,每个阶段寻找到一组满足安全性约束的闭合、断开支路即可停止,然后直接跳至下一阶段进行搜索,直至完成网络重构。从形式上来看,每个阶段求解的问题是一致的,即寻找当前网络下可行的闭合、断开支路组,因而采用递归算法解决该问题。

由于递归算法涉及开关操作的排序遍历,相同开关操作方案的重复验证会降低算法效率,本文提出改进手段,采用二进制方式对开关操作过程进行唯一编码,记录无解拓扑对应的编码,以避免重复计算。

在实际求解配电网重构实施策略的过程中,可能会出现最优重构解因不满足约束而不能应用的情况,此时,应当求取次优解下的配电网重构实施策略。同理,若次优解也不能生成满足条件的实施策略,则选用第3优解,依此类推。

#### 3.1 合环冲击电流计算

实际运行中,合环冲击电流受系统额定电压、线路等值阻抗、负荷分布等因素影响,不同位置的合环操作冲击电流差异较大,而冲击电流上限与馈线最大供电能力有关。文献[25]推导了合环冲击电流的暂态过程计算公式,但求解过程过于复杂,不适用于策略搜索过程的大量合环校验计算。文献[26]基于戴维南等效模型,得到合环冲击电流的简化计算公式。文献[27]考虑继电保护动作,进一步推导出合环应满足的条件。本文参考文献[26]中的合环冲击电流计算建模方式,推导得到合环冲击电流的计算公式。

对于即将进行闭合操作的线路,可以对该线路两端以内的配电网进行戴维南等效,等效结果如图2所示。

图中, $a$ 、 $b$ 为将要闭合开关的线路两端点; $z_{eq}$ 为等效阻抗; $z_s$ 为线路 $a$ - $b$ 的阻抗。在线路 $a$ - $b$ 开关关闭前,通过对系统进行潮流计算,可以得到 $a$ 、 $b$ 这2点的电势 $U_a$ 、 $U_b$ ,进而可得 $a$ 、 $b$ 两端以内的等效交流源 $U_{ab}$ ,如式(9)所示。

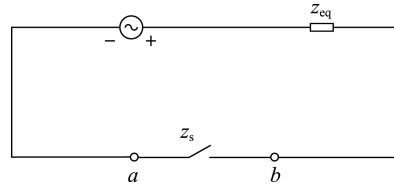


图2 配电网等效图

Fig.2 Equivalent diagram of distribution system

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (9)$$

在网络参数已知的情况下,很容易获得网络的导纳矩阵 $Y$ ,对导纳矩阵求逆可以得到网络的阻抗矩阵 $Z$ 。利用单位电流法<sup>[31]</sup>可得等效阻抗如式(10)所示。

$$z_{eq} = z_{aa} + z_{bb} - 2z_{ab} \quad (10)$$

其中, $z_{aa}$ 为节点 $a$ 对应的自阻抗; $z_{bb}$ 为节点 $b$ 对应的自阻抗; $z_{ab}$ 为节点 $a$ 、 $b$ 间的互阻抗。合环暂态冲击电流 $I_M$ 和合环稳态电流 $I_c$ 的关系<sup>[32]</sup>如下:

$$I_M = \sqrt{2} K_M I_c = \sqrt{2} K_M \left| \frac{U_{ab}}{z_{eq} + z_s} \right| \quad (11)$$

其中, $K_M$ 为冲击系数,一般取1.8~2.0。

#### 3.2 配电网重构实施策略的递归求解

所谓递归是指函数通过调用自身来求解问题,即子问题是改变参量的母问题。将递归算法应用于重构实施策略的求解,适应搜索过程的阶段相似性,可以在找到可行解时立刻终止搜索过程,并且保证程序确认无解前遍历所有可能的情况。

##### 3.2.1 合环、解环的安全性约束

重构实施过程分合环、解环2类操作,分别对2类操作建立安全性约束。合环操作应满足如下约束:

a. 在合环过程中,闭合支路产生的冲击电流小于保护整定值,避免误动作;

b. 合环操作结束后,配电网系统正常运行需要满足约束式(2)~(4)。

解环操作应满足如下约束:

a. 解环开关应在合环产生的环中寻找,从而保证解环后系统满足辐射状结构;

b. 解环操作结束后,配电网依然要满足约束式(2)~(5)。

##### 3.2.2 递归算法及改进

通过对比配电网的初始网络 $g_{orin}$ 和重构解 $g_{final}$ ,即可得到需要进行断开操作的支路集 $S_{toopen}$ 和需要进行闭合操作的支路集 $S_{toclose}$ 。递归函数的输入参数为初始网络 $g_{orin}$ 、需要断开的支路集 $S_{toopen}$ 和需要闭合的支路集 $S_{toclose}$ 。在每次递归运算过程中,都会找一组当前可行的闭合、断开支路,然后去除 $S_{toopen}$ 、 $S_{toclose}$ 中的相应元素,更新 $g_{orin}$ ,并作为下一次递归的参量。存在解的情况下,递归函数以 $S_{toopen}$ 、



$S_{\text{toclose}}$  为空集作结束情形,即只要找到一个可行方案,程序就返回结果,停止运行。递归函数的主体分以下 4 步。

**a.** 按  $S_{\text{toclose}}$  中的次序对第  $i$  ( $i$  初值为 1) 条支路开关进行合环校验,若合环冲击电流小于保护整定值且合环后系统满足约束式(2)–(4),则进行步骤 **b**,否则  $i$  加 1 后重复步骤 **a**。当  $i$  大于  $S_{\text{toclose}}$  中元素的总数时,返回程序无解。

**b.** 按  $S_{\text{toopen}}$  中的次序对第  $j$  ( $j$  初值为 1) 条支路开关进行断开校验,若断开该开关后系统满足约束式(2)–(5),则进行步骤 **c**,否则  $j$  加 1 后重复步骤 **b**。当  $j$  大于  $S_{\text{toopen}}$  中元素的总数时, $i$  加 1 后返回步骤 **a**。

**c.** 去除  $S_{\text{toopen}}$  中第  $i$  条支路、 $S_{\text{toclose}}$  中第  $j$  条支路,然后更新网络  $g_{\text{orin}}$ 。当  $S_{\text{toopen}}$ 、 $S_{\text{toclose}}$  均为空集,返回当前闭合、断开支路组;否则,进行步骤 **d**。

**d.** 用更新后的  $S_{\text{toopen}}$ 、 $S_{\text{toclose}}$ 、 $g_{\text{orin}}$  递归调用本函数,求解相应的子问题。若子问题有解,则将当前闭合、断开支路组加上子问题的解作为返回结果。若子问题无解,则  $j$  加 1 后返回步骤 **b**。

递归求解过程中涉及开关操作的排序遍历,可能会出现相同拓扑重复出现的情况。若该拓扑已在前期的递归运算中被求证为无解,此时无需再对该拓扑及其后续拓扑进行递归求解,避免重复计算而导致计算资源浪费。因此,在递归计算过程中,需将无效拓扑记录在列表中。采用二进制数  $A$  对开关操作过程进行编码,每一条待操作的支路对应一个二进制位  $a_i$ ,初值为 0,开关动作后置 1。设  $S_{\text{toclose}}$ 、 $S_{\text{toopen}}$  包含支路数为  $m$ , $S_{\text{toclose}}$  中各支路依次对应  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\dots$ 、 $a_m$ , $S_{\text{toopen}}$  中各支路依次对应  $a_{m+1}$ 、 $a_{m+2}$ 、 $\dots$ 、 $a_{2m}$ ,则:

$$A = (a_1 a_2 \dots a_{2m})_2 \quad (12)$$

初始时, $A$  的各二进制位均为 0。开关动作后,产生的二进制数与当前配电网拓扑唯一对应。改进的递归函数运算流程如图 3 所示。

### 3.2.3 简单算例

以图 4 所示简单配电网系统为例进行算法流程说明。对比图 4(a)、(c),得到需要闭合的支路集  $S_{\text{toclose}} = \{2-5, 4-6\}$ ,需要断开的支路集  $S_{\text{toopen}} = \{3-5, 3-4\}$ ,支路 2-5、4-6、3-5、3-4 依次对应二进制位  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 。在第一次递归运算中,选择支路 2-5 作为闭合支路不能通过过程安全性校验,记录无解拓扑对应二进制数  $(0001)_2$ 。重新选择支路 4-6 为闭合支路,此时通过过程安全性校验。选择 3-5 为断开支路,显然重构结果不能满足辐射状运行约束条件,记录无解拓扑对应二进制数  $(0110)_2$ 。因此重新选择 3-4 为断开支路,该操作组合满足所有约束,则网络重构结果如图 4(b) 所示。去除相应支路

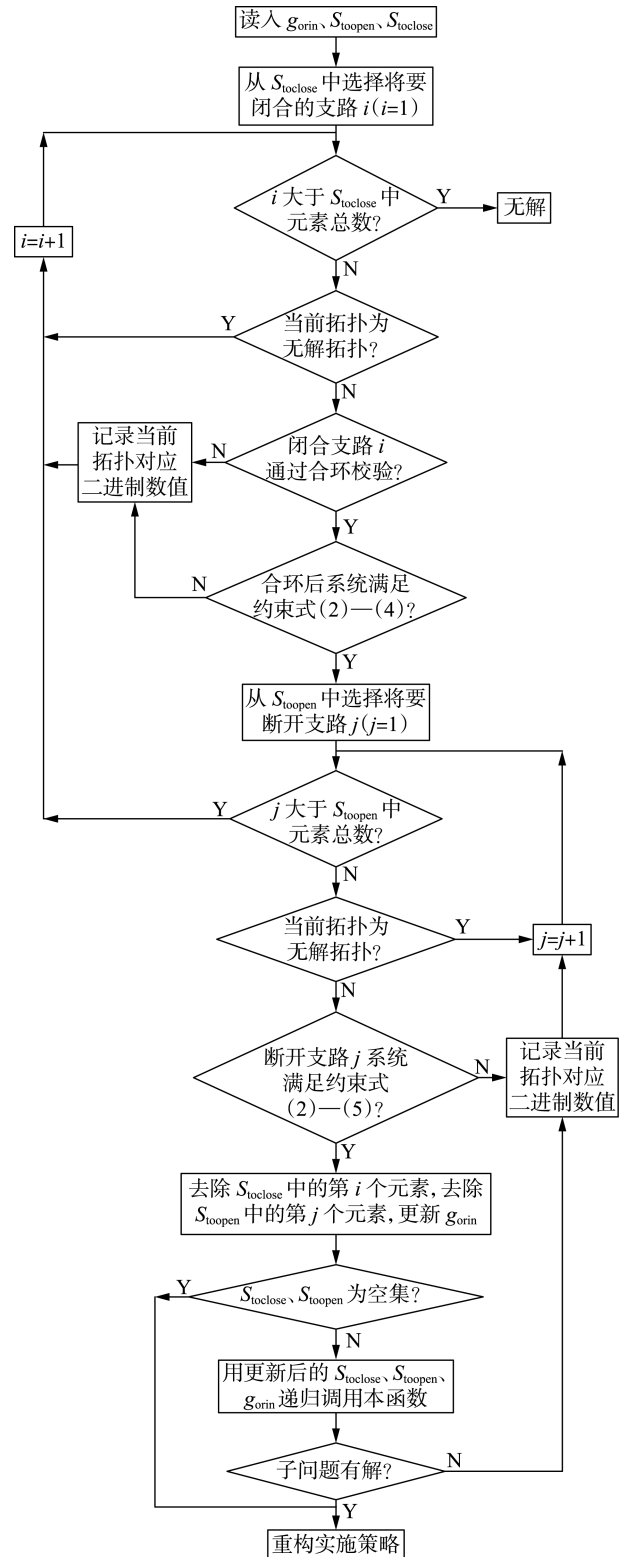


图 3 递归函数运算流程

Fig.3 Flowchart of recursive function calculation

后,2 个集合分别为  $S_{\text{toclose}} = \{2-5\}$ 、 $S_{\text{toopen}} = \{3-5\}$ 。第二次递归运算,选取支路 2-5、3-5 为闭合、断开支路组合,该组合能满足所有约束,则网络重构结果如图 4(c) 所示,集合  $S_{\text{toclose}}$ 、 $S_{\text{toopen}}$  均变为空集,即程序搜索到了可行的重构实施策略,即闭合支路 4-6,断开支路 3-4,闭合支路 2-5,断开支路 3-5。

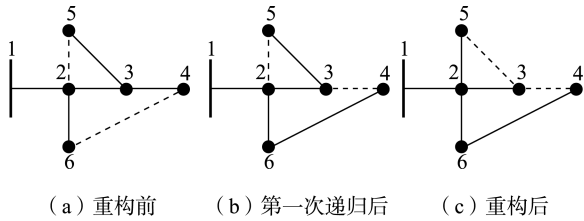


图 4 简单配电网系统

Fig.4 Simple distribution network

### 4 算例分析

本文采用 2 个算例进行测试。算例 1 为图 5 所示 IEEE 33 节点系统,该系统包含 37 条支路,其中分段支路(实线)为 32 条,联络支路(虚线)为 5 条。系统额定电压为 12.66 kV,负荷总有功功率为 3 715 kW,总无功功率为 2 300 kvar。

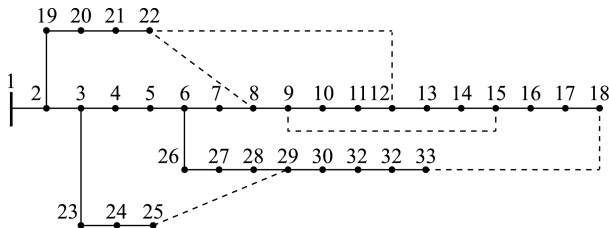


图 5 IEEE 33 节点系统

Fig.5 IEEE 33-bus system

在二进制粒子群算法迭代过程中,算例 1 共更新了 7 次全局最优解的取值。相较于重构前,各重构解均在降损和抬高最低电压上有了可观的改善。7 个全局最优解可以按照搜索次序进行优选排序。配电网重构解集合如表 1 所示(表中最低节点电压为标么值)。其中,最优解与文献[3]算例结果一致,但文献[3]并没有论证该重构解的可行性。

表 1 配电网重构解集合

Table 1 Solution set of distribution network reconfiguration

情形	断开支路集合	网损/kW	最低节点电压
最优解	{7-8,9-10,14-15,25-29,32-33}	136.90	0.938 4
次优解	{7-8,10-11,14-15,25-29,32-33}	137.33	0.938 4
第 3 优解	{7-8,11-12,14-15,28-29,32-33}	138.78	0.941 5
第 4 优解	{7-8,9-10,14-15,27-28,32-33}	140.90	0.940 0
第 5 优解	{7-8,9-10,14-15,18-33,27-28}	143.28	0.936 6
第 6 优解	{7-8,11-12,12-13,18-33,28-29}	147.35	0.938 0
第 7 优解	{7-8,9-10,12-13,16-17,28-29}	150.84	0.929 4
重构前	{8-21,9-15,12-22,18-33,25-29}	197.23	0.915 8

设定系统保护装置的电流整定值,即合环冲击电流上限为 58 A。首先对最优解进行递归求解。

通过对比重构前和重构后的网络,得到  $S_{\text{toopen}} = \{7-8,9-10,32-33,14-15\}$ ,  $S_{\text{toclose}} = \{8-21,12-22,9-15,18-33\}$ ,支路 8-21、12-22、9-15、18-33、7-8、9-10、32-33、14-15 依次对应二进制位  $a_1-a_8$ 。选取  $S_{\text{toclose}}$  中第 1 条支路 8-21 进行试合闸,计算得到合环冲击电流为 75.30 A,大于设定上限,未通过校验,记录无解拓扑对应二进制数  $(00000001)_2$ ;选取  $S_{\text{toclose}}$  中第 2 条支路 12-22,计算得到合环冲击电流为 64.96 A,同理未通过校验,记录无解拓扑对应二进制数  $(00000010)_2$ ;选取  $S_{\text{toclose}}$  中第 3 条支路 9-15,计算得到合环冲击电流为 30.72 A,通过校验。接下来进行解环操作,搜索得断开支路 9-10 满足约束式(2)~(5),然后递归求解参量为  $S_{\text{toopen}} = \{7-8,32-33,14-15\}$ ,  $S_{\text{toclose}} = \{8-21,12-22,18-33\}$  以及更新后的  $g_{\text{min}}$  子问题。第 1 优解的求解全过程如附录中图 A1 所示,重复出现的拓扑在图中用无解标注,程序不能找到可行的配电网重构实施策略。最优解求解过程重复出现的无解开关操作方案如表 2 所示。对解集的次优解进行递归求解,如附录中图 A2 所示。程序找到可行的重构实施策略,即闭合支路 9-15,断开支路 10-11,闭合支路 12-22,断开支路 7-8,闭合支路 8-21,断开支路 14-15,闭合支路 18-33,断开支路 32-33。

表 2 最优解求解过程中重复出现的无解开关操作方案

Table 2 Repeated invalid switch operation schemes in solving process of best solution

无解开关操作方案	对应二进制数
闭合支路 18-33,断开支路 7-8,闭合支路 9-15,断开支路 9-10	$(00111100)_2$
闭合支路 18-33,断开支路 7-8,闭合支路 9-15,断开支路 14-15	$(10011100)_2$
闭合支路 18-33,断开支路 9-10,闭合支路 9-15	$(01001100)_2$
闭合支路 18-33,断开支路 32-33,闭合支路 9-15,断开支路 9-10	$(01101100)_2$
闭合支路 18-33,断开支路 32-33,闭合支路 9-15,断开支路 14-15	$(11001100)_2$
闭合支路 18-33,断开支路 14-15,闭合支路 9-15	$(10001100)_2$

目前,国内配电网自动化尚未全面展开,一些开关需要运检人员进行现场操作,因此不同的开关顺序会影响运检人员的行动总路程。本文所提方法可以通过改变  $S_{\text{toopen}}$ 、 $S_{\text{toclose}}$  的开关搜索顺序获取不同的重构实施策略,运检人员则可以根据人员数量、自身位置等实际情况从中选择,以简化行程。改变开关搜索顺序后,次优解还可以得到如下实施策略:①闭合支路 9-15,断开支路 10-11,闭合支路 12-22,断开支路 7-8,闭合支路 18-33,断开支路 32-33,闭合支路 8-21,断开支路 14-15;②闭合支路 9-15,断开支路 10-11,闭合支路 12-22,断开支路 14-15,闭合支

路8-21,断开支路7-8,闭合支路18-33,断开支路32-33;③闭合支路9-15,断开支路10-11,闭合支路12-22,断开支路14-15,闭合支路18-33,断开支路32-33,闭合支路8-21,断开支路7-8。

根据算例结果可知,同一断开支路在不同的网络结构下闭合所产生的合环冲击电流值有很大差异。以次优解求解过程中的支路8-21为例,初始网络结构下支路8-21闭合产生的合环冲击电流为75.30 A,在经过闭合支路9-15、断开支路10-11、闭合支路12-22、断开支路7-8操作后,其闭合产生的合环冲击电流为49.03 A,后者仅为前者的65.1%。合理地规划开关操作顺序,可以有效规避重构实施过程的风险,提高系统运行可靠性。

算例2是美国PG&E 69节点配电网络,该系统包含73条支路,其中5条是联络支路。系统额定电压为12.66 kV,负荷总有功功率为3 802.19 kW,总无功功率为2 694.60 kvar。依然设定合环冲击电流上限值为58 A。在二进制粒子群算法迭代过程中,共更新了9次全局最优解的取值。在重构实施策略求解过程中,发现合环冲击电流的幅值普遍较大,大多超过了100 A,但程序依然在对第7优解的递归求解中搜索出了可行的重构实施策略,即闭合支路13-20,断开支路14-15,闭合支路15-69,断开支路9-10,闭合支路11-66,断开支路16-17,闭合支路27-54,断开支路50-51。系统重构后的网络损耗为152.03 kW,相较于重构前的225.00 kW损耗,在确保重构过程安全的前提下有32.4%的降幅。

## 5 结论

本文针对计及过程安全性的配电网重构开关顺序优化问题,提出一种求解方法。

**a.** 根据过程安全性,提出配电网重构实施过程中合环、解环应满足的约束条件。对于开关闭合过程中产生的冲击电流,应用相应的戴维南等效模型和计算方法。在此基础上,提出配电网重构实施策略的递归求解算法,该算法能快速、有效、可靠地获取重构实施策略,并保证在确认无解前遍历全部可能情况。提出一种二进制编码方式记录递归过程的无效中间解,提升算法运行效率。

**b.** 采用能够保留备选解的改进粒子群算法求解配电网重构解集,在最优解无可行的重构实施策略时,可选用次优解的重构实施策略,从而最大化提升配电网运行效率。在迭代过程中,对无效粒子进行随机性的坐标修正,提升了搜索效率。

**c.** 通过算法搜索顺序的调整,可以输出不同的重构实施策略,形成备选集合,方便运检人员根据实际情况进行选择。

配电网重构对提升系统运行效率有很大的作

用,如何安全、可靠地实现配电网重构具有重要的现实意义。本文所提考虑合环冲击电流的配电网重构方法,能够求解配电网重构优化解集,并稳定地获取满足合环约束、解环约束、配电网稳定运行约束的开关操作顺序,提升了配电网从初始状态过渡至优化运行状态的过程安全性及配电系统运行操作的可靠性水平。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 1401-1407.
- [2] SARMA N D R, PRAKASA R K S. A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 1995, 33(2): 125-131.
- [3] 刘柏私, 谢开贵, 周家启. 配电网重构的动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 29-34.  
LIU Bosi, XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi. Electrical distribution networks reconfiguration using dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 29-34.
- [4] SHIRMOHAMMADI D, HONG H W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492-1498.
- [5] 邓佑满, 张伯明, 相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术, 1995, 19(7): 47-50.  
DENG Youman, ZHANG Boming, XIANG Niande. An improved optimal flow pattern algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 1995, 19(7): 47-50.
- [6] 刘蔚, 韩祯祥. 基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 29-33.  
LIU Wei, HAN Zhenxiang. Distribution network reconfiguration based on optimal flow pattern algorithm and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 29-33.
- [7] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.  
BI Pengxiang, LIU Jian, ZHANG Wenyuan. A refined branch exchange algorithm for distribution networks reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [8] 张剑, 何怡刚. 基于无向图所有生成树的网络重构遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 136-141.  
ZHANG Jian, HE Yigang. Genetic algorithm based on all spanning trees of undirected graph for distribution network reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 136-141.
- [9] 麻秀范, 张粒子. 基于十进制编码的配网重构遗传算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 65-69.  
MA Xiufan, ZHANG Lizi. Distribution network reconfiguration based on genetic algorithm using decimal encoding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 65-69.
- [10] 余贻鑫, 段刚. 基于最短路径算法和遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 44-49.  
YU Yixin, DUAN Gang. Shortest path algorithm and genetic algorithm based distribution system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 44-49.



- [11] DE BRAZ H D M, DE BENEMAR A S. Distribution network reconfiguration using genetic algorithms with sequential encoding; subtractive and additive approaches[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 582-593.
- [12] 蒙文川, 邱家驹. 基于免疫算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 25-29.  
MENG Wenchuan, QIU Jiaju. An artificial immune algorithm to distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 25-29.
- [13] 林济铿, 王旭东, 陈云山, 等. 基于可行解搜索和自适应免疫算法的配网重构[J]. 天津大学学报, 2008, 41(12): 1505-1511.  
LIN Jikeng, WANG Xudong, CHEN Yunshan, et al. Distribution network reconfiguration based on feasible solution search and adaptive immune algorithm[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(12): 1505-1511.
- [14] 余建明, 张凡. 基于改进免疫遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 100-105.  
YU Jianming, ZHANG Fan. Distribution network reconfiguration based on improved immune genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 100-105.
- [15] 李樊, 刘天琪, 江东林. 采用改进免疫算法的多目标配电网重构[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 134-138.  
LI Fan, LIU Tianqi, JIANG Donglin. Distribution network reconfiguration with multi-objective based on improved immune algorithm[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 134-138.
- [16] 许立雄, 吕林, 刘俊勇. 基于改进粒子群优化算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 27-30.  
XU Lixiong, LÜ Lin, LIU Junyong. Modified particle swarm optimization for reconfiguration of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 27-30.
- [17] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.  
LI Zhenkun, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41.
- [18] WU W C, TSAI M S. Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1591-1599.
- [19] 刘健, 石晓军, 程红丽, 等. 配电网大面积断电供电恢复及开关操作顺序生成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 76-79, 83.  
LIU Jian, SHI Xiaojun, CHENG Hongli, et al. Restoration for large area blackout of distribution network and switching operation sequence management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 76-79, 83.
- [20] 马静, 许东, 王增平. 基于加权理想点法的配网故障供电恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 61-67.  
MA Jing, XU Dong, WANG Zengping. Power restoration strategy based on weighted ideal point method for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 61-67.
- [21] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.  
XU Yuqin, ZHANG Li, WANG Zengping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.
- [22] 朱海南, 刘玉田. 考虑线路投入顺序的网架重构机组恢复多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 53-59.  
ZHU Hainan, LIU Yutian. Multi-objective optimization of unit restoration during network reconstruction considering line restoration sequence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 53-59.
- [23] 张璨, 林振智, 文福拴, 等. 基于后悔思想的网络重构两步策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 46-52, 75.  
ZHANG Can, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. A two-stage strategy for network reconfiguration based on concept of regret[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 46-52, 75.
- [24] 秦福欣, 王建学, 王秀丽. 考虑输电元件损坏概率的电力网架时序恢复策略优化[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 137-145.  
QIN Fuxin, WANG Jianxue, WANG Xiuli. Time sequence restoration optimization strategy of network considering power components' damage probability[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 137-145.
- [25] 甘国晓, 王主丁, 李瑞, 等. 配电网合环冲击电流计算方法及其简化计算公式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 115-120.  
GAN Guoxiao, WANG Zhuding, LI Rui, et al. Methods and simplified formulas for calculating surge currents from loop closing in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 115-120.
- [26] 葛少云, 李晓明. 基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 124-127.  
GE Shaoyun, LI Xiaoming. Study on surge current due to closing loop in distribution network based on Thevenin's equivalent[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(6): 124-127.
- [27] 刘健, 孙泉, 张小庆, 等. 配电网合环分析与合环条件判断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 130-135.  
LIU Jian, SUN Quan, ZHANG Xiaoqing, et al. Analysis on and criteria for loop closing operation for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 130-135.
- [28] LEE R C T, TSENG S S, CHANG R C, 等. 算法设计与分析导论[M]. 王卫东, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008: 40-41.
- [29] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//IEEE Conference on Neural Networks. Perth, Australia: [s.n.], 1995: 1942-1948.
- [30] KENNEDY J, EBERHART R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]//International Conference on System, Man and Cybernetics. Orlando, USA: [s.n.], 1997: 4104-4108.
- [31] 张伯明. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 35-36.
- [32] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 15-16.

## 作者简介:



朱嘉麒

朱嘉麒(1994—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为电网优化运行(E-mail: 21710089@zju.edu.cn);

朱炳铨(1967—),男,浙江绍兴人,教授级高级工程师,主要研究方向为电网调度运行管理(E-mail: hzzbq@sina.com);

徐玮韡(1983—),女,浙江杭州人,工程师,主要研究方向为基于信息物理系统的配网规划和运行优化(E-mail: vvvvei@126.com);

董树锋(1982—),男,浙江宁波人,副教授,博士,研究方向为状态估计和有源配电网分析等(E-mail: dongshufeng@

zju.edu.cn);

徐立中(1983—),男,浙江杭州人,博士,主要研究方向  
为电网调度运行(E-mail:150067105@qq.com);

倪秋龙(1976—),男,浙江杭州人,高级工程师,主要

研究方向为电网安全稳定分析、调度运行管理(E-mail:  
10131415@qq.com)。

### Switch sequence optimization of distribution network reconfiguration considering process security

ZHU Jiaqi<sup>1</sup>, ZHU Bingquan<sup>2</sup>, XU Weiwei<sup>3</sup>, DONG Shufeng<sup>1</sup>, XU Lizhong<sup>2</sup>, NI Qiulong<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Rational and reliable switch operation sequence should be adopted in the process of distribution network reconfiguration to avoid impact on the stable operation of distribution network. An improved binary particle swarm optimization algorithm is used to obtain the solution set of distribution network reconfiguration, and the coordinates of invalid particles in the iterative process are modified randomly to improve the search efficiency. The safety constraints should be satisfied during loop closing and unwinding in distribution network reconfiguration are proposed, and Thevenin equivalent model is applied to calculate the surge current due to closing loop. A recursive algorithm is proposed for solving the switch sequence of distribution network reconfiguration with the consideration of process safety, and the greedy strategy is followed in the search process. The invalid intermediate solutions in the recursive process are recorded with binary coding to avoid repeated calculation. Case results of IEEE 33-bus and PG&E 69-bus systems verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** switch sequence of distribution network reconfiguration; process safety; binary particle swarm optimization algorithm; surge current due to closing loop; recursive algorithm

(上接第 36 页 continued from page 36)

### Full-cable medium voltage distribution network planning based on incremental shortest path method

GU Danzhen, DAI Haifeng, ZENG Jian

(Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Cabling reconstruction has become the development trend for urban medium voltage distribution network power supply. A practical planning method for the backbone network of full-cable medium voltage distribution network is proposed based on the incremental shortest path method considering the cable channel constraints and urban planning constraints. The overall optimization of the whole network is divided into two parts: the cable line planning of power supply zones and the line connection planning among power supply zones, and the two parts are completed by the incremental shortest path method and the best matching algorithm respectively. An actual example shows that the proposed method can be applied to the network construction and expansion planning of the full-cable medium voltage distribution network.

**Key words:** full-cable medium voltage distribution network; incremental shortest path method; cable channel constraints; urban planning; network planning



附录：

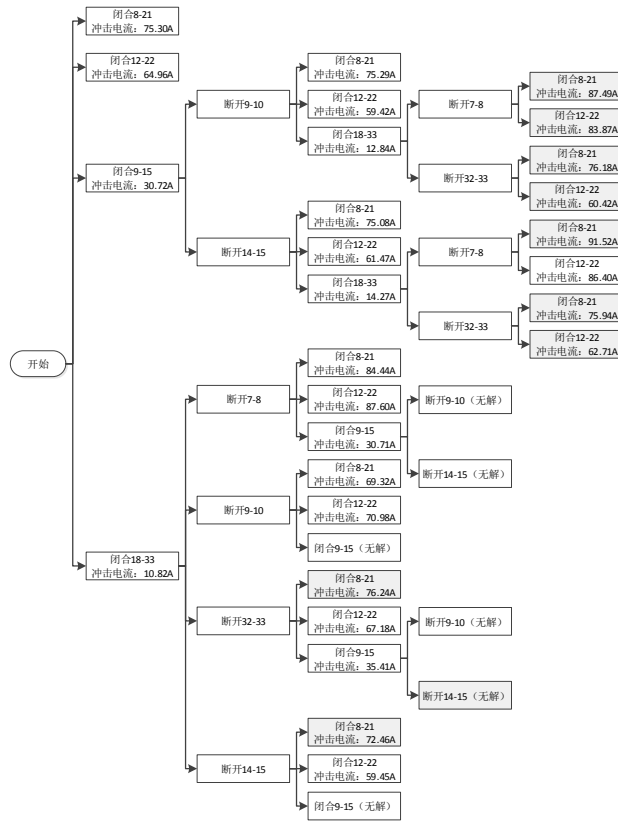


图 A1 第 1 优解下的实施策略求解过程

Fig.A1 Solving process of implementation strategy for best solution

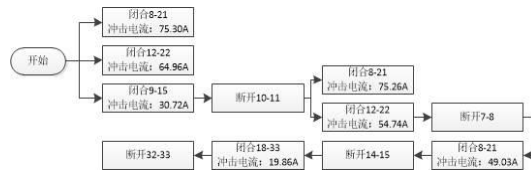


图 A2 第 2 优解下的实施策略求解过程

Fig.A2 Solving process of implementation strategy for second best solution