

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181156

考虑合环调电约束的配电网快速重构方法

李文云¹, 曹敏¹, 李坤², 王丰³, 凌万水³, 钱祥华², 王金芹², 刘红文¹

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 云南电网有限责任公司瑞丽供电局, 云南 瑞丽 678600; 3. 上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233)

摘要: 为解决 10 kV 配电网合环调电过程针对合解环开关最优选择问题, 提出了以网络损耗为目标, 以合解环网络的线路功率限值、电压限值和保护限值为约束条件进行网络重构的方法。该方法采用快速改进遗传算法按开关状态进行二进制染色体编码, 利用合环后网络的计算结果, 构建针对基因染色体品质编码库, 以校核下一代基因染色体编码, 加速了算法过程。同时利用分布系数法计算解环后网络的潮流状态, 避免了再次潮流计算。测试算例验证了算法的有效性, 为合环调电安全实施提供了保证。

关键词: 配电网; 合环调电; 网络重构; 遗传算法

A fast feeder reconfiguration method with loop closing network constraints considered

LI Wenyun¹, CAO Min¹, LI Kun², WANG Feng³, LING Wanshui³, QIAN Xianghua², WANG Jinqin², LIU Hongwen¹

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;
2. Ruili Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Ruili 678600, China;
3. Shanghai Wiscom Sunest Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: A feeder reconfiguration method is presented with the aim of decreasing network losses subject to branch flow limits, voltage limits and protection triggering limits to optimize the selection of breakers for loop closing and opening operation at the 10 kV distribution network. An improved genetic algorithm with binary chromosome encoding for breaker status is used. A chromosome library with feature encoding is created according to the calculation results for closed loop network to accelerate the algorithm process. A distribution coefficient method is used to calculate the power flow for open loop network based on the closed loop network to avoid extra power flow calculation. A study case demonstrates the effectiveness and correctness of the method which secures the loop closing operation for distribution network.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900200).

Key words: distribution network; loop closing operation; feeder reconfiguration; genetic algorithm

0 引言

随着城网改造的逐渐深入, 配电的发展和社会对供电可靠性的要求越来越高。10 kV 配电网一般采用“闭环设计, 开环运行”的供电方式, 在配电网双电源供电和多电源供电情况增多的情况下, 为了设备检修或倒负荷, 选择适当的供电路径进行合环操作, 可以提高供电的可靠性, 减少对用户的影响, 提高用户满意度。配电网合环运行方式得到关注, 越来越多的电力公司采用合解环调电的方式

运行^[1-4]。

合解环操作即先合上某个联络开关形成环网, 再拉开环网上的某个分段开关恢复辐射状供电的状态, 以实现“热倒”负荷^[5-10]。大规模复杂配电网存在多个可能联络点和解环点的情况, 针对合解环点的选择, 实际上体现为网络重构问题。传统的网络重构方法^[11-16]主要针对重构前和重构后配电网的负荷状况、系统运行的经济性进行校验, 来达到配电网优化运行的目标。而针对合解环调电的网络重构是由合环和解环的动作组实现。在合环过程中, 由于电磁环网的环流过大有可能造成设备过载, 导致保护动作, 必须在合环前进行校核计算^[17]。同时,

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900200)

解环后网络负荷也不应该超过线路的最大载流量。网络重构必须考虑合解环过程的安全运行约束下, 兼满足解环后网络运行经济性的要求。

现有网络重构相关文章, 针对合环运行约束的讨论较少。文献[18]考虑了合环约束的配电网重构方法, 但没有考虑合环时对继电保护的影响因素。合环调电相关文章涉及的问题基本上是在已经确定的合解环点的情况下, 校核系统运行安全, 对合解环点选择方面考虑较少。本文针对合环调电下造成网络重构后涉及的线路功率限值、电压限值和保护限值约束进行考虑, 利用考虑合环染色体基因库的改进遗传算法, 提高算法的计算速度。在利用潮流算法计算出合环稳态电流值的基础上, 利用经验系数评估冲击电流的影响。采用分布系数法对解环后的网络进行计算, 避免了再次的潮流计算, 提高了计算速度。最后, 利用算例, 针对本文所提方法的正确性进行验证。

1 合解环调电安全性的要求

配电网合环以后, 由于网络结构和运行状态的变化, 电流分布会有较大的变化。配电网合环瞬间, 因为开关两侧电压差的存在, 系统将产生较大的冲击电流, 逐渐衰减至稳定后, 环网中还存在稳态环流, 这将可能造成某些电气设备或线路过载, 甚至造成继电保护装置动作跳闸, 从而对整个电网的安全运行造成严重的影响。

由叠加定理可知合环后的稳态电流由合环前的馈线电流和合环环流叠加而成。考虑合环暂态冲击过程, 合环环流的最大冲击电流为合环环流稳态电流的 1.62 倍^[3]。如合环后包含冲击电流的变电站出口电流值小于继电保护整定值, 且合环后馈线首端稳态电流值小于馈线最大载流量, 则能实现安全合环。一般情况下, 合环暂态过程衰减时间都会小于电流保护 II 段延时时间整定值, 合环暂态过程只对瞬时速断保护有影响。

校核合环电流对保护的影响包括以下几个方面: 合环冲击电流对保护的影响, 合环稳态电流对设备和保护的影响。为了保证合环调电的安全性, 合环后会采取解环操作, 以保持配电网供电的辐射状特点。针对解环操作也要满足系统安全的要求, 解环后的网络不应该导致系统过载, 不应该导致电压越限。合环调电涉及的两个过程——合环操作和解环操作都不能危害系统的安全运行。

2 基于合解环约束考虑的网络重构数学模型

配电网存在多个合解环点的情况下, 在满足前

面提到的合解环运行约束的情况下, 选择使解环后网络运行经济性最佳的方案。网络重构模型必须增加每个开关操作后的网络安全性约束。考虑到配电网操作的实际工作流程, 同一时间仅允许进行一个合解环操作, 此时建立配电网重构最优化问题的基本模型如下。

目标函数:

$$\min f(K, X) \quad (1)$$

s.t.

$$h(K, X) = 0 \quad (2)$$

$$g(K, X) \leq 0 \quad (3)$$

$$K \in S \quad (4)$$

式中: C 为控制变量, 包括合解环操作可能涉及的所有开关矢量; X 为状态变量的矢量, 包括有功、无功、电压、电流等; S 为所有开关状态矢量集合; h 和 g 分别表示等式约束和不等式约束。

以最小网损为目标, 函数表达式为

$$\min f = \sum_{i=1}^{N_b} r_i k_i |I_i|^2 \quad (5)$$

式中: N_b 为配电网支路数; r_i 为线路 i 的电阻; I_i 为流过第 i 条线路的电流; k_i 为线路 i 对应开关的状态, 0 表示开关打开, 1 表示开关闭合。

设变量 $t=1, \dots, N$ 表示系统在寻优过程中每一对合解环操作的状态序列。针对合环状态的不等约束表示为上标为 $2t-1$ 的变量, 包括电压约束、支路过载约束以及针对合环电流(稳态、暂态)继电保护的校核约束, 即

$$\begin{cases} s_{ij} \leq s_{ij, \max} \\ v_{i, \min} \leq v_i^{(2t-1)} \leq v_{i, \max} \\ 1.62 \times i_1^{(2t-1)} < I_{1, \text{set}, I} \\ i_1^{(2t-1)} < I_{1, \text{set}, III} \\ 1.62 \times i_2^{(2t-1)} < I_{2, \text{set}, I} \\ i_2^{(2t-1)} < I_{2, \text{set}, III} \end{cases} \quad (6)$$

式中: s_{ij} 为线路 ij 的视在功率; $s_{ij, \max}$ 为线路 ij 的最大视在功率; v_i 为节点 i 的电压; $v_{i, \max}$ 和 $v_{i, \min}$ 分别为节点 i 的电压上限和下限值; t 表示第 t 个合解环操作步骤; $i_1^{(2t-1)}$ 表示在合环回路中, 其中一条馈线 1 出口的稳态电流有效值; $I_{1, \text{set}, I}$ 表示馈线 1 出口断路器速断保护整定值(一次侧); $I_{1, \text{set}, III}$ 表示馈线 1 出口断路器过流保护整定值(一次侧); $i_2^{(2t-1)}$ 表示在合环回路中, 另一条馈线 2 出口的稳态电流有效值; $I_{2, \text{set}, I}$ 表示在合环回路中, 另一条馈线 2 出口断路器速断保护整定值(一次侧); $I_{2, \text{set}, III}$ 表示在合环回路中, 其中另一条馈线 2 出口断路器过流保护整定值

(一次侧)。

针对解环状态的不等约束表示为上标为 $2t$ 的变量, 包括电压约束、支路过载约束, 即

$$\begin{cases} s_{ij}^{(2t)} \leq s_{ij\max} \\ v_{i,\min} \leq v_i^{(2t)} \leq v_{i,\max} \end{cases} \quad (7)$$

3 遗传算法的应用

3.1 基因染色体的编码

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)在各种配电网重构算法中, 具有全局搜索和不依赖梯度信息、可得到全局最优解的特点。遗传算法的特点, 使针对开关的开合进行二进制编码具有天然的优势, 将网络中的开关状态用 0 和 1 表示, 每个开关占据染色体的一位, 利用文献[12]中的方法, 将构成同一环路的开关放在同一基因块内, 相邻开关在染色体中相邻的染色体编码策略, 加快了算法的执行。

图 1 的网络中每个基因块(环路)合环开关是确定的(图中 4-15, 11-16, 5-10)。各个环路开关的染色体二进制编码如表 1 所示。

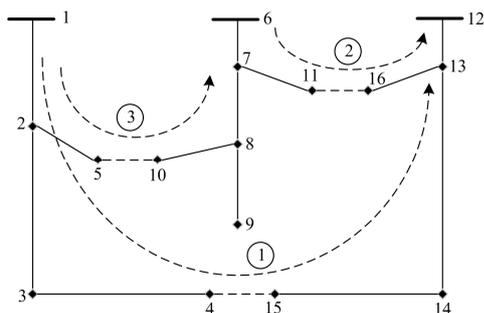


图 1 IEEE 典型 3 馈线系统

Fig. 1 Standard IEEE 3-feeder system

表 1 染色体编码

Table 1 Chromosome encoding

环路	染色体编码	开关
1	11011	2-3,3-4,4-15,15-14,14-13
2	101	7-11,11-16,16-13
3	1101	2-5,5-10,10-8,8-7

由于合环开关已经确定, 针对合环电流的校验只针对以上三个环路合环开关闭合的情况进行校验。针对配电网合环电流的计算有多种方法^[19-23], 本文采用统一考虑输配电网络的牛顿法进行合环后网络的潮流计算。

3.2 适应度的选择

适应度指导了遗传算法的搜索方向, 应保证其不为负, 本文网络重构的目的是网损最小, 采用网

损的倒数作为适应值, 针对越限值采取增加惩罚的方法, 令适应值最小。

$$F = \begin{cases} \frac{1}{f}, & \text{无越限} \\ 0, & \text{有越限} \end{cases} \quad (8)$$

式中: f 为网损; F 为适应度函数。

3.3 基因的操作

遗传算法包括复制、交叉和变异操作。针对合解环为一个过程的情况, 同传统的网络重构相比, 针对最终适应度的计算必须经历合解环的过程。在进行 GA 算法实现时, 交叉操作把 2 个父辈染色体中的部分结构交换重组而生成新个体的操作如表 2 和表 3 所示, 考虑合环情况。交叉操作的子染色体的编码只是对父染色体编码的交换, 适应度函数不需要重新计算了。针对合环变异操作采用随机选定一位基因进行变位的操作。为了保证可行解, 可以采用将相邻位也变反的方法。

表 2 父染色体编码

Table 2 Parents chromosome encoding

代数	父染色体 1	父染色体 2
i	1101	1110

表 3 子染色体编码

Table 3 Children chromosome encoding

代数	子染色体 1	子染色体 2
$i+1$	1110	1101

针对交叉和变异操作, 其合环过程即为环路开关闭合的情况, 此时校验的案例数由其他环路的开关变化组合数决定。由图 1 的情况, 环路 1 闭合, 环路 2 和环路 3 开环时, 其开关组合数为 $3 \times 4 = 12$ 个。则需要校验的合环案例总个数如表 4 所示。

表 4 合环校验案例统计

Table 4 Summation of loop closing cases

闭合环路	其他环路开环时开关组合数
1	$3 \times 4 = 12$
2	$5 \times 4 = 20$
3	$3 \times 5 = 15$
总数	47

针对合环网络的校验必然落入这 47 种情况内。在算法过程中, 可以根据式(6)对合环网络进行校验, 并依据结果对此时的基因染色体的品质进行标示, 如越限则标识为“越限”基因, 在后续的 GA 算法中, 遇到此基因, 则将适应度值直接置零, 简化了计算过程。

3.4 分布系数法的应用

整个合环调电的过程中, 解环状态是在合环状

态基础上, 将一个环路开关打开的状态。采用分布系数法^[24], 由合环状态可以计算出解环状态下的系统数据。

设系统在支路 km 开断的情况下, 其他支路(ij)中的电流变化为

$$\Delta I_{ij} = \frac{z_{km}(Z_{ik} - Z_{im} - Z_{jk} + Z_{jm})}{z_{ij}(z_{km} - Z_{kk} - Z_{mm} + 2Z_{km})} I_{km} \quad (9)$$

式中: I_{km} 为支路 km 未开断情况下的电流; ΔI_{ij} 为支路 km 开断的情况下, 其他支路 ij 中的电流变化; z_{ij} 为支路 ij 的阻抗值; z_{km} 为支路 km 的阻抗值; Z_{ik} 、 Z_{im} 、 Z_{jk} 、 Z_{jm} 、 Z_{km} 为系统节点阻抗阵中对应两端节点的互阻抗; Z_{kk} 、 Z_{mm} 为系统节点阻抗阵中对应节点 k 和 m 的自阻抗。

式(10)给出了支路开断分布系数的定义。

$$L_{ij-km} = \frac{\Delta I_{ij}}{I_{km}} = \frac{z_{km}(Z_{ik} - Z_{im} - Z_{jk} + Z_{jm})}{z_{ij}(z_{km} - Z_{kk} - Z_{mm} + 2Z_{km})} \quad (10)$$

利用此系数可以计算得到支路 km 开断后, 系统中各支路的电流和各个节点的电压增量值, 校核系统的安全运行约束。

用支路 km 在未开断情况下的电流乘以相应的支路开断分布系数 L_{ij-km} , 加上该支路未开断情况下的支路电流 I_{ij} , 得到开断后的各个支路的电流, 即可判断是否过负荷。利用支路的电流计算此时的网损值, 并以此确定遗传算法适应度。此方法不需要针对解环点计算潮流, 提高了计算速度, 并保证了计算结果的准确性。

4 算法实现

根据以上的描述, 图 2 给出了改进快速遗传算法流程图。该算法利用现有配电网结构决定染色体, 并以此为基础随机选择一位进行逆反操作, 得到初始种群。在进行复制操作时, 采用随机遍及采样的方法利用最优保留策略, 保证最优的个体直接进入下一代。

5 算例分析

5.1 配电网测试算例

以国内某地区实际电网为例, 合环网络存在于两个 110 kV 变电站之间, 电磁环网合环路径有 4 条(一回线、二回线、三回线、四回线), 10 kV 合环馈线干线参数如表 5 所示。

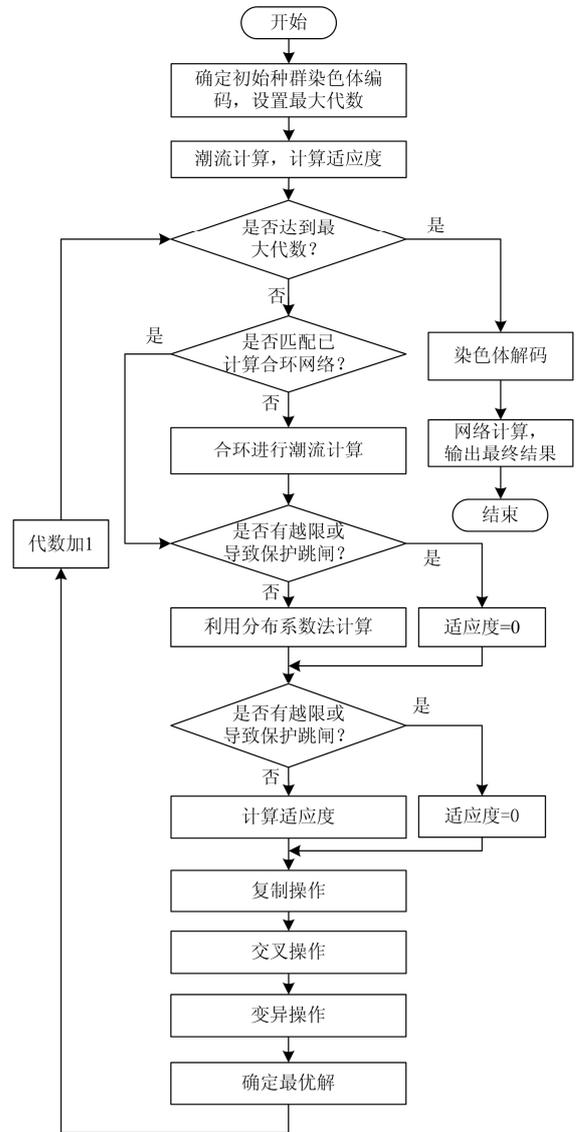


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of feeder reconfiguration calculation

表 5 10 kV 线路参数表
Table 5 10 kV line parameters

线路名称	长度/km (电缆/架空)	线型 (电缆/架空)	馈线最大负荷/MW
一回线	6.21	YJV22-3*150	6.49
二回线	7.36	YJV22-3*150	5.49
三回线	5.71	YJV22-3*150	4.67
四回线	10.37/4.2	YJV22-3*150 /LGJ-120	6.93

配电网合环网络中(如图 3 所示), 各个负荷 S1—S8 的负荷对应的功率如表 6 所示。变电站 10 kV 线路出口开关配置过流保护, 表 7 给出了出口开关保护整定值。

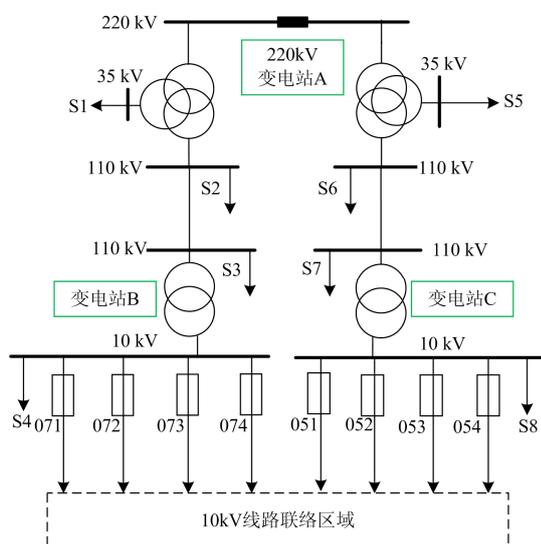


图 3 配电合环网络

Fig. 3 Network for closing loop operation

图 4 中标识的各个开关, 都可以进行合解环的操作, 其中开关 051-071、052-072、053-073 和 054-074 为常开联络开关。图中的各个开关的状态即为优化算法的初始状态。

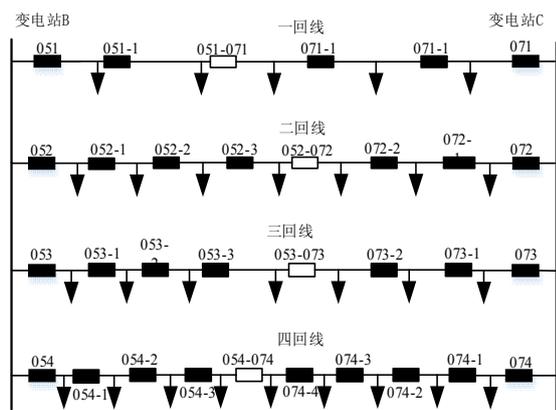


图 4 10 kV 合环馈线网络

Fig. 4 10 kV feeders for closing loop operation

5.2 算法验证

利用上述快速配电网重构方法, 并考虑合解环约束的情况, 按文中的方法确定染色体长度为 24, 取种群数为 50, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.02。表 8 给出了计算结果。图 5 给出了算法最大适应度变化曲线。

当不考虑针对合解环过程的约束时, 利用算法的计算结果如表 9 所示。比较表 8 的结果, 看到多加入了一个开关的变化(071-2), 并且网损由 0.528 MW 变为 0.428 MW。经过分析, 可以看到当 051-071

合环时, 051 开关相邻线路过载。算法程序将此情况的适应度设为 0, 导致其染色体没有被继承。而其他联络开关(053-073, 054-074)没有由于合环导致超限的情况。

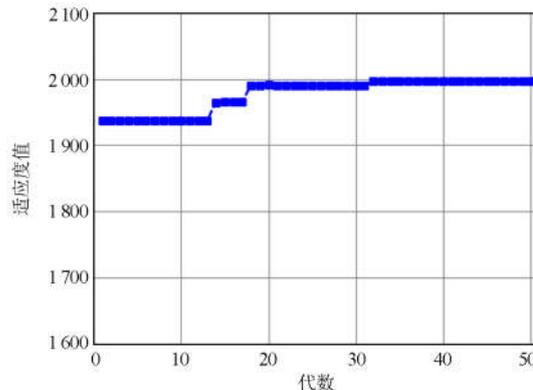


图 5 算法最大适应度变化

Fig. 5 Optimal fitness value changing profile

表 6 系统负荷功率值

Table 6 Apparent power of loads

名称	$P+jQ/(MW, Mvar)$	名称	$P+jQ/(MW, Mvar)$
S1	19.75+j6.42	S5	14.43+j4.76
S2	31.43+j6.16	S6	36.43+j8.34
S3	16.43+j1.62	S7	9.43+j1.35
S4	5.77+j0.82	S8	5.43+j0.32

表 7 变电站 10 kV 侧出口电流保护整定值

Table 7 Over-current protection settings for 10 kV substation outline breakers

名称	电流保护值/A		CT 变比
	速断保护	过流 III 段	
变电站 D 051 开关	18.6	6.86	500/5
变电站 D 052 开关	21	6.86	500/5
变电站 D 053 开关	14.5	5.8	500/5
变电站 D 054 开关	14.5	5.8	500/5
变电站 E 071 开关	25	8.8	400/5
变电站 E 072 开关	18.3	6.2	600/5
变电站 E 073 开关	19.9	7.6	500/5
变电站 E 074 开关	23	8.8	400/5

表 8 考虑合解环重构结果

Table 8 Results of feeder reconfiguration with open-closing loop constraints

	重构前	重构后
打开的开关	051-071	051-071
	052-072	052-072
	053-073	053-3
	054-074	054-3
10 kV 网络网损	0.528 MW	0.501 MW

表9 不考虑解合环重构结果
Table 9 Results of feeder reconfiguration without open-closing loop constraints

	重构前	重构后
打开的开关	051-071	071-2
	052-072	052-072
	053-073	053-3
	054-074	054-3
10 kV 网络网损	0.528 MW	0.428 MW

算例表明当联络开关两侧的负荷处于相对均衡的状态时,以减少网络损耗为目的的网络重构,会使重构后联络开关两侧负荷更加均衡,这种情况一般不会在合环过程中导致网络过载影响运行安全。如果重构前联络开关两侧负荷已经非常不均衡了,在合环时,就有可能导致合环电流过大而越限,这种情况应该在合解环操作中避免。

6 结论

本文根据配电网合环调电中针对合解环过程中的运行约束要求,构建了数学模型,提出了一种利用改进快速遗传算法进行网络重构的方法。根据合解环网络操作顺序的特点,利用合环网络的计算结果,构建基因染色体品质编码库,对下一代的染色体进行过滤,提高了计算速度。利用分布系数法快速计算解环后的网络潮流状态,避免了再次的潮流计算,简化了计算流程,提高了速度。该算法以某市合环调电网络为基础进行计算,结果表明,算法能够满足网络解合环流程中对网络运行安全校核的要求,为达到合环调电工程实际中合解环点的优化选择提供了保障。

参考文献

- [1] 叶清华,唐国庆,王磊. 配电网合环操作环流分析系统的开发和应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 66-69.
YE Qinghua, TANG Guoqing, WANG Lei. Development and application of the analysis system for closed loop operation of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 66-69.
- [2] 肖白,赵龙安,张宇,等. 城市中压配电网合环操作分析与决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 133-138.
XIAO Bai, ZHAO Long'an, ZHANG Yu, et al. Analysis and decision of loop closing operation in urban mid-voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 133-138.
- [3] 杨志栋,刘一,张建华,等. 北京 10 kV 配网合环试验与分析[J]. 中国电力, 2006, 39(3): 66-69.
YANG Zhidong, LIU Yi, ZHANG Jianhua, et al. Loop closing examination and analysis on Beijing 10 kV distribution network[J]. Electric Power, 2006, 39(3): 66-69.
- [4] 于建辉,周浩,陆华. 杭州 10 kV 配电网合环问题的研究[J]. 机电工程, 2007, 24(10): 54-57.
YU Jianhui, ZHOU Hao, LU Hua. Research on Hangzhou 10 kV distribution network closing loop operation[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(10): 54-57.
- [5] 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 operation for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 130-135.
- [6] 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.
- [7] 汲亚飞,赵江河. 辐射型配电网合环稳态电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 15-19.
JI Yafei, ZHAO Jianghe. Calculation of the loop closing steady state current in radial power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 15-19.
- [8] 付轲,蔡泽祥,邱建,等. 10 kV 电网电磁合环操作安全性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(4): 71-76.
FU Ke, CAI Zexiang, QIU Jian, et al. Safety assessment methods of loop closing operation in 10 kV distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(4): 71-76.
- [9] 宣科,张富刚,李传虎,等. 配电网合环操作决策支持系统的开发与研究[J]. 供用电, 2010, 27(1): 30-32, 48.
XUAN Ke, ZHANG Fugang, LI Chuanhu, et al. Development and research of the decision-making supporting system for closing loop operation in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2010, 27(1): 30-32, 48.
- [10] 李晓明,黄彦浩,尹项根. 基于改良策略的配电网重构遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 49-54.
LI Xiaoming, HUANG Yanhao, YIN Xianggen. A genetic algorithm based on improvement strategy for power distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 49-54.
- [11] 毕鹏翔,刘健,刘春新,等. 配电网网络重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.
BI Pengxiang, LIU Jian, LIU Chunxin, et al. A refined genetic algorithm for power distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.

- [12] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
LIU Li, CHEN Xueyun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.
- [13] 徐敏, 戴薇. 基于渔夫捕鱼优化算法的配电网重构[J]. 电测与仪表, 2015, 52(13): 43-47.
XU Min, DAI Wei. Reconfiguration of the distribution network based on the optimization algorithm on simulating the fisher fishing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(13): 43-47.
- [14] LIN C H, CHEN C S, WU C J, et al. Application of immune algorithm to optimal switching operation for distribution loss minimisation and loading balance[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(2):183-189.
- [15] 郭腾云, 刘艳. 基于博弈方法的含分布式电源配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 28-34.
GUO Tengyun, LIU Yan. Game theory based reconfiguration optimization for distribution network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 28-34.
- [16] 姜惠兰, 钱广超, 范中林, 等. 考虑负荷控制的有源配电网故障恢复策略[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 101-106.
JIANG Huilan, QIAN Guangchao, FAN Zhonglin, et al. A service restoration strategy considering influence of load management for distribution system with DG[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 101-106.
- [17] 夏翔, 熊军, 胡列翔. 地区电网的合环潮流分析与控制[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 76-80.
XIA Xiang, XIONG Jun, HU Liexiang. Analysis and control of loop power flow in regional power network[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 76-80.
- [18] 武鹏, 程浩忠, 刘育权, 等. 考虑合环约束的配电网重构方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 163-168.
WU Peng, CHENG Haozhong, LIU Yuquan, et al. Distribution network reconfiguration method considering loop closing constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 163-168.
- [19] 高元海, 王淳. 基于八种智能算法的配电网重构计算平台及其性能[J]. 中国电力, 2015, 48(8): 53-60.
GAO Yuanhai, WANG Chun. A computing platform for distribution network reconfiguration based on 8 intelligent algorithms and its performance[J]. Electric Power, 2015, 48(8): 53-60.
- [20] 曹亮, 孔峰, 陈昆薇. 一种配电网的实用潮流算法[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 58-60.
CAO Liang, KONG Feng, CHEN Kunwei. A practical algorithm of load flow calculation for distribution power system[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 58-60.
- [21] 余娟, 颜伟. 配电网合环网络模型及其馈线电流的计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 76-81.
YU Juan, YAN Wei. The model of the closed loop distribution network and the current calculation of its feeders[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 76-81.
- [22] 蔡万通, 刘文颖, 张宁, 等. 基于惩罚性变权最优综合评价模型的电磁环网解合环方案分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2316-2323.
CAI Wantong, LIU Wenyong, ZHANG Ning, et al. Analysis of electromagnetic loop network on loop closing or opening based on model of optimal comprehensive evaluation with punitive variable weight[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2316-2323.
- [23] 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.
- [24] 王星华, 许炫壕, 甘德树, 等. 基于移动互联网的配电网在线合环计算软件设计方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 128-133.
WANG Xinghua, XU Xuanhao, GAN Deshu, et al. Software design of online loop closing and calculation of distribution network based on the mobile internet[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 128-133.
- [25] 潘龙, 裴付中, 杨历伟, 等. 配电网合环信号相角差的评估方法研究与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(9): 14-18.
PAN Long, PEI Fuzhong, YANG Liwei, et al. Research and simulation of the evaluation method for the phase angle difference of distribution network closed loop signals[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(9): 14-18.
- [26] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等. 基于最小基本回路集合的潮流转移快速搜索[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 21-26.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast search of power flow transfers based on minimal basic circuit set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 21-26.

收稿日期: 2018-09-07; 修回日期: 2018-11-04

作者简介:

李文云(1965—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事电网运行管理及电力系统稳定分析研究; E-mail: liwenyun100@im.yn.csg

曹敏(1961—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事智能电网和状态监测研究; E-mail: caomin@im.yn.csg

李坤(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要从事调度自动化和配电自动化研究。E-mail: 20443184@qq.com

(编辑 张爱琴)