

改进二进制粒子群优化算法在配电网重构中的应用

卢志刚, 杨国良, 张晓辉, 文莹

(燕山大学电力电子节能及传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 配电网重构是一个非常复杂的大规模组合优化问题。网络重构中, 能否得到有效解, 即保证辐射状网络, 是一个很关键的问题。对电网拓扑进行简化, 配合破圈法更新粒子, 得到100%的有效解, 大大提高了计算速度。提出一种应用于配电网重构的改进二进制粒子群优化算法, 并结合禁忌搜索算法, 使PSO算法跳出局部最优优化陷阱, 改善了算法的搜索效果, 加快了寻优速度。最后对IEEE 69节点系统进行计算, 并与相关文献结果进行对比, 表明本文改进算法具有快速、高效的全局寻优能力。

关键词: 配电网; 破圈法; 网络重构; 禁忌搜索算法; 图论; 二进制粒子群优化算法

Reconfiguration of distribution network based on improved particle swarm optimization

LU Zhi-gang, YANG Guo-liang, ZHANG Xiao-hui, WEN Ying

(Yanshan University, Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Distribution network reconfiguration for loss minimization is a complex, large-scale combinatorial optimization problem. In this problem, ensuring a radiant network is the key. In the paper, the configuration of distribution network is predigested, working with breaking-cycle-basis method to update the particles can gain 100% effective keys and greatly improve the speed of calculation. An improved binary particle swarm optimization applied to solve the distribution network reconfiguration problem is presented. Working with tabu search algorithm, this method can escape partial best key, improve the searching effect of basic PSO and accelerate the speed of searching the best keys. The optimization calculations of sixty-nine-node IEEE testing system by the presented method are conducted and the calculation results are compared with interrelated articles. Its compared results can show that the presented method has fast and high efficient ability to find the best key.

Key words: distribution network; breaking-cycle; distribution reconfiguration; tabu search algorithm; graph; binary particle swarm optimization

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)07-0030-05

0 引言

配网重构是配电网研究的重要领域。为提高供电可靠性和电网运行灵活性, 配电网中设有大量分段开关和一些联络开关。在电网运行过程中, 随着负荷变化, 及时调整网络中联络开关和分段开关的状态, 改变网络的运行结构, 可以达到平衡负荷、消除过载、提高电压质量和降低网络损耗的目的^[1]。在配电网重构中通常以降低网损为目标函数。

目前文献的求解方法有:(1)传统的数学方法^[2], 其优点是可以得到不依赖于初始网络结构的全局最优解, 但存在严重的“维数灾”; (2)启发式方法, 如支路交换法^[3]和最优流算法^[4], 其优点是计算速度快, 物理概念清晰, 但缺乏数学意义上的全局最优; (3)人工智能方法, 如模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索算法^[5]等, 但也存在缺点。如模拟退火算

法^[6], 计算量大; 遗传算法^[7,8], 计算速度慢, 局部搜索能力差等。(4)多种算法结合的混合算法^[9,10], 可以使各个算法取长补短, 在配电网重构中取得了很好的效果。

本文采用改进的二进制粒子群算法应用于配电网重构, 利用避圈法更新粒子, 并结合禁忌搜索算法改善算法的搜索效率, 算例表明, 本文算法具有快速、高效的全局寻优能力。

1 配电网重构的数学模型

以网损最小为优化目标的数学模型:

$$\min F = \sum_{b \in N} P_{k, \text{loss}} = \sum_{b=1}^N k_b |I_b|^2 r_b \quad (1)$$

式中: F 为重构优化目标函数; N 为配电网支路的集合; k_b 为对应的支路 b 的开合状态, k_b 为 1 表示该支路是闭合的, k_b 为 0 时表示该支路是打开的;

r_b 为对应支路 b 的电阻, I_b 为流经支路 b 的电流; 该目标函数需要满足下列网络约束条件:

1) 辐射状网络结构, 即网络不存在环路和孤立节点。

2) 支路容量约束: $|I_b| < |I_b|_{\max}$, $|I_b|_{\max}$ 为对应支路允许流经电流幅值的最大值。

3) 变电所容量或变压器容量约束: $S_i < S_{i,\max}$, S_i 为给对应区域供电的变电所或变压器的负载, $S_{i,\max}$ 为对应的变电所或变压器的最大负载。

4) 配电网节点电压约束: $V_{i,\min} < V_i < V_{i,\max}$, V_i 、 $V_{i,\min}$ 、 $V_{i,\max}$ 分别为节点 i 的电压及其上、下限。

2 PSO 算法及其改进

2.1 基本 PSO 算法

PSO 是一种全新的智能优化算法^[11], 假设在一个 D 维的搜索空间中, 第 i 个粒子的位置 X_i , 飞行速度 V_i , 表示每个粒子经过的最好位置记为 P_{best} , 群体中所有粒子经过的最好位置记为 G_{best} 。对于每一代, 粒子根据以下公式更新自己的位置和速度:

$$V_{i,d}^{n+1} = \omega V_{i,d}^n + c_1 r_1^n (P_{\text{best}} - x_{i,d}^n) + c_2 r_2^n (G_{\text{best}} - x_{i,d}^n) \quad (2)$$

$$x_{i,d}^{n+1} = x_{i,d}^n + V_{i,d}^{n+1} \quad (3)$$

式中: ω 是惯性因子, 一般取 $0.4 \sim 1.2$; c_1 和 c_2 是学习因子, 一般取 $1.5 \sim 2.0$; r_1 和 r_2 是区间 $[0,1]$ 上的随机数; 粒子群规模一般取 $30 \sim 50$ 。

v_{\max} , v_{\min} 是速度限值, 迭代中, 如果 $V_{i,d}^{k+1} > v_{\max}$, 则 $V_{i,d}^{k+1} = v_{\max}$; 如果 $V_{i,d}^{k+1} < v_{\min}$, 则 $V_{i,d}^{k+1} = v_{\min}$ 。

2.2 二进制 PSO 算法

二进制 PSO 算法 (DPSO) 中, 状态空间中每个粒子的每一位 $x_{i,d}$ 的取值为 0 或 1, $v_{i,d}$ 为 $x_{i,d}$ 取 1 的概率。把式(3)中的 $x_{i,d}$ 用以下公式计算:

$$\begin{cases} x_{i,d} = 1 & r < S(v_{i,d}) \\ x_{i,d} = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$S(v_{i,d}) = 1 / (1 + e^{-v_{i,d}}) \quad (5)$$

式中: r 为 $[0,1]$ 上的随机数。二进制 PSO 算法的其他部分同基本 PSO 算法。为了防止饱和, 速度被限制在 $[-4, 4]$ 区间内。

2.3 改进 DPSO

高斯分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 其 $P(-\sigma < x - \mu < \sigma) \approx 0.683$ 。根据粒子群适应值分布类似于高斯分布的特征, 在每一次进化中, 约为 $1/3$ 的粒子位于粒子群中心点过远或过近的范围。假设粒子群进化到某一代时适应值的平均值是 μ , 均方差是 σ , 按适应值的大小对标准 PSO 算法的进化方程(2)作如下调整 (F_i 表示粒子 i 的适应值):

(1) 如果 $F_i - \mu < -\sigma$, 此时粒子适应值较小, 离目标比较近, 粒子在进化中表现比较好。对于这种粒子, 进化策略采用认知模型。认知模型的一个显著的特点是粒子群收敛速度的减慢, 能有效地避免粒子群多样性的丧失。

(2) 如果 $F_i - \mu > \sigma$, 此时粒子适应值较大, 离目标比较远, 粒子在进化中表现比较差。该类粒子的进化策略采用社会模型。这样做的目的是使这些表现差的粒子加快收敛速度。

(3) 如果 $-\sigma \leq F_i - \mu \leq \sigma$, 此时粒子的适应值适中, 仍然保持标准 PSO 算法的进化策略, 即采用完全模型。

取定 c_1 和 c_2 之后, 把进化方程中的速度修正公式(2)更改为

$$V_{i,d}^{n+1} = \begin{cases} \omega V_{i,d}^n + 2c_1 r_1^n (P_{\text{best}} - x_{i,d}^n), & F_i - \mu < -\sigma \\ \omega V_{i,d}^n + c_1 r_1^n (P_{\text{best}} - x_{i,d}^n) + c_2 r_2^n (G_{\text{best}} - x_{i,d}^n), & -\sigma \leq F_i - \mu \leq \sigma \\ \omega V_{i,d}^n + 2c_2 r_2^n (G_{\text{best}} - x_{i,d}^n), & F_i - \mu > \sigma \end{cases} \quad (6)$$

同时对 ω 做适当调整

$$\omega = \begin{cases} 0.4 + 0.2r, & F_i - \mu < -\sigma \\ 0.6 + 0.3r, & -\sigma \leq F_i - \mu \leq \sigma \\ 0.9 + 0.3r, & F_i - \mu > \sigma \end{cases} \quad (7)$$

式中: r_1 、 r_2 、 r 均为 $[0, 1]$ 中的随机数。

2.4 更新规则改进

为配合破圈法来保证网络的辐射状结构并大大减少搜索次数, 本文对基本二进制 PSO 算法的位置更新规则进行如下改进:

规则 1:

$$r_{i,d} = S(v_{i,d}) - r \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_{i,d} = 0, & r_{i,d} = \min\{r_{i,j}\}, j \in M \\ x_{i,d} = 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

规则 2:

$$\begin{cases} x_{i,d} = 0, & S(v_{i,d}) = \min\{S(v_{i,j})\}, j \in M \\ x_{i,d} = 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

式中: M 是与开关 d 属于同一个环路的所有开关的集合。

少数粒子按规则 1 更新粒子, 保证粒子的多样性, 以跳出局部最优; 多数粒子按规则 2 更新粒子, 保证粒子快速收敛。把所有粒子经过的最好位置记为 G_{best} , 每个粒子经过的最好位置记为 $P_{i,\text{best}}$ 。

3 改进二进制粒子群算法的配电网重构

3.1 配电网结构简化

(1) 确定基本环路, 如图 1(a), 划分出 5 个基本环路。

(2) 简化原则: a. 为保证负荷点的供电, 不在任何环路内的支路上的开关必须闭合; b. 为提高搜索效率避免不必要的搜索, 与电源点相连的开关一般也必须闭合。根据简化原则可以得到图 1(b)。

(3) 找出 T 节点, 如图 1(b) 的节点 4、9、11、13、15、20、48、66, 共八个 T 节点。

(4) 把两个 T 节点之间的相连支路合成一条支路, 如图 1(b) 中的节点 4、9 间的支路 S_{4-5} 、 S_{5-6} 、 S_{6-7} 、 S_{7-8} 、 S_{8-9} 合成图 1(c) 中节点 4、9 间的 b_1 支路。

这样, 把一个复杂的 69 节点、74 条支路的系统图简化成仅有 8 节点、12 条支路的图 1(c)。

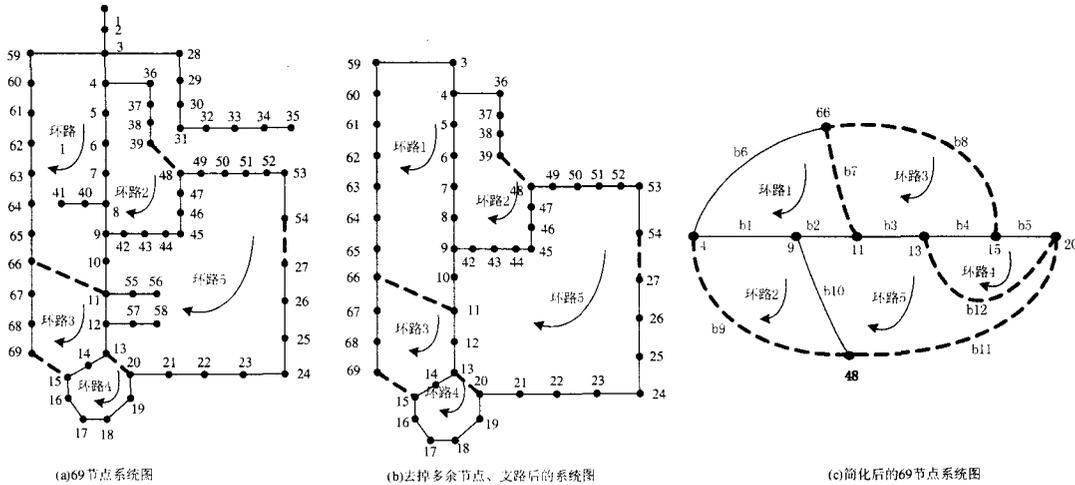


图 1 配电网络结构简化图解

Fig.1 Illustration of predigesting the configuration of distribution network

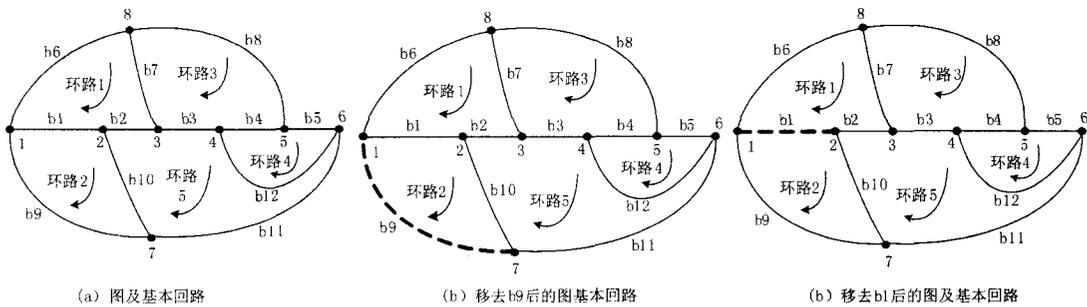


图 2 破圈法图解

Fig.2 Illustration of the breaking-cycle method

3.2 基于图论的配电网络拓扑分析

根据图论中关于树的定义: 若 G 无回路, 则 G 本身为一树。若 G 有回路, 则删去回路上任一边 e , $G-e$ 仍连通, 对 $G-e$ 重复上述操作, 直至得到 G 的无回路连通子图——生成树。由此可知, 对于连通图 G 可以通过依次从回路中删边的方法得到其生成树, 此方法称为破圈法。

破圈法要点是确定基本回路, 上节中配电网络结构简化后, 就已得到基本回路。如图 2(a) 中的 $C_1(b_1-b_6-b_7-b_2)$ 、 $C_2(b_1-b_{10}-b_9)$ 、 $C_3(b_3-b_7-b_8-b_4)$ 、 $C_4(b_3-b_5-b_{12})$ 、 $C_5(b_2-b_3-b_{12}-b_{11}-b_{10})$, 就组成 G 的一个基本回路组。从 G 中删除 $C_1 \sim C_5$ 中任选一个基本回路中的任意支路生成图 G_1 :

(1) 若删除回路 C_2 的支路 b_9 , 则如图 2(b) 所示, 支路 b_9 的删除仅仅破坏了回路 C_2 , 而回路 C_1 、 C_3 、 C_4 、 C_5 则不受影响, 仍然是 G_1 的回路。

(2) 若删除回路 C_1 的 b_1 支路, 如图 2(c) 所示, 由于 b_1 同属于回路 C_1 、 C_2 , 则 b_1 的删除同时破坏了回路 C_1 和 C_2 , 但却生成了新的回路 $C'_1(b_2-b_{10}-b_9-b_6-b_7)$ 。而回路 C_3 、 C_4 和 C_5 则不受影响, 仍然是 G_1 的回路。

删除过程可归结为: 先确定待选支路 b 及所属基本回路 C , 若 b 不属于余下的基本回路, 则这些回路维持不变; 若 b 同时属于其他基本回路, 则将 C 与这些基本回路进行环后生成新的基本回路。重复上述操作, 直至没有回路为止。利用图论的知识

可以证明, 破圈法是一种高效、准确地求解图的生成树方法, 可以百分之百得到辐射状网络。

3.3 生成辐射状网络的步骤

配电网重构的重要约束条件是配电网为辐射状。由图论可知, X 分维中 0 的个数必定等于配电网的环路数。生成辐射状网络的步骤如下:

(1) 配电网结构简化成图 1(a), 根据公式(5)和(8)得到集合 $\{r\}$ 和 $\{S\}$;

(2) 找出 $\min\{r\}$ 或 $\min\{S\}$ 对应的开关, 把开关对应的 X 分维置 0, 在图 2(a) 中找出包含此开关的支路, 把此支路中其他开关对应的 X 分维置 1, 并删除此支路, 此时图 2(a) 减少一个环路;

(3) 为了减少搜索, 删除不在任何环路上的支路, 并把此支路上所有开关对应的 X 分为置 1;

(4) 把上两步删除的支路中包含的所有开关对应的 r 或 S 从集合 $\{r\}$ 或 $\{S\}$ 中删除;

(5) 重复步骤(2)、(3)、(4), 直到图 2(a) 中没有环路;

(6) 这样得到的 X 能够百分之百的保证配电网为辐射状。

3.4 禁忌算法在二进制粒子群算法中的应用

禁忌算法通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索。记录粒子群算法搜索到的当前最优位置作为禁忌对象, 在下次迭代过程中, 判断群体中的各个粒子更新的位置适应值是否由于被禁对象, 若是, 则更新禁忌对象, 否则判断更新过的位置是否被禁忌, 若是则重新更新粒子速度和位置, 否则不做处理, 保留粒子更新过的位置和速度。

3.5 算法流程

(1) 初始化。输入网络信息, 如支路阻抗矩阵, 节点功率矩阵, 节点一支路关联矩阵等; 初始化粒子, 如确定优化变量的维数, 设置粒子群规模 M 和算法参数, 即学习因子、速度限值等; 设置最大迭代次数 I_{max} ;

(2) 迭代次数 $I_{iter}=1$ 时, 在控制变量变化范围内随机生成 M 个解, 即每个解都能保证网络为辐射状; 用广度搜索法对每个解对应的网络进行分层, 用前推回代算法计算每个粒子的目标函数;

(3) 判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数 I_{max} 或 M 个粒子都为最优解, 如果是, 终止程序, 否则 $I_{iter}=I_{iter}+1$ 。 $I_{iter}=1$ 时, 记录群体当前最好位置 G_{best} 和每个粒子的位置作为粒子的最优位置 P_{best} ;

(4) $N>1$ 时, 用改进二进制粒子群优化算法更新每个粒子的速度和位置, 然后用破圈法修正粒子位置, 保证每个粒子都能生成辐射状网络;

(5) 查看粒子位置是否被禁, 若是, 重新更新粒子速度、位置、用破圈法修正粒子位置; 若不是, 继续以下步骤;

(6) 用广度搜索法对每个粒子对应的网络进行分层, 用前推回代算法计算每个粒子的目标函数值;

(7) 比较粒子的目标函数值与个体当前最优解 P_i 对应的目标值 f_{ibest} , 若目标值小于 f_{ibest} , 则将当前位置作为粒子自身当前最优解 P_i 。选取 f_{ibest} 中最小值作为当前迭代过程的全局最优解对应的目标函数值 f_{gbest} , 并与粒子群当前群体最优解 f_{gbest} 进行比较, 若小于, 更新当前最优解 G_{best} , 相应的更新禁忌对象, 转到步骤 3。

4 算例

本文采用 MATLAB 6.5 编程, 计算机配置为赛扬, CPU 为 2.40 GHz, 512 MB 内存。算例取自文献[12], 是美国 PG&E 的 69 节点配电网系统, 有 74 条支路, 5 个联络开关, 如图 1(a) 所示。该系统的额定电压为 12.66 kV, 总负荷为 3 802.2 kW + j2694.6 kvar。

设定粒子群规模为 50, 学习因子 c_1 和 c_2 均为 2, 速度限定 v_{max} 和 v_{min} 分别为 4 和 -4, 最大迭代次数为 100。

表 1 为本文算法的计算结果和其他文献的计算结果。本文算法和其他文献算法形成的开关集合相同, 网损和文献[13]的结果相同, 比文献[8,13]的结果稍小。

表 1 配电网重构前后的比较

Tab.1 Comparison of the distribution reconfiguration

比较项目	重构前	文献[8]	文献[12]	文献[13]	本文
打开开关集合	11-66	11-66	11-66	11-66	11-66
	13-20	13-20	13-20	13-20	13-20
	15-69	14-15	14-15	14-15	14-15
	27-54	47-48	44-45	44-45	44-45
	39-48	50-51	50-51	50-51	50-51
网损/kW	226.48	102.6	103.86	101.01	101.01
最低节点电压/pu	0.905 3	0.926 3	0.933 0	—	0.942 4

表 2 不同算法迭代次数比较

Tab.2 Comparison of iteration times of different algorithms

比较项目	本文	文献[10]	文献[13]
最快达最优解的迭代次数	4	>20	—
平均迭代次数	10.26	21.14	—
潮流计算次数	200-1000	—	>800

表 2 为不同算法迭代次数比较结果, 用本文算法连续运行 100 次, 记录每次达到最优解的次数,

最快为 4 次, 其平均迭代次数为 10.26 次, 优于文献[10, 13]的结果。从表 1 和表 2 的结果分析, 可以看出本文算法的高效率的搜索能力和优越性。

5 结语

本文改进了离散粒子群算法, 简化了系统网络图, 改进了粒子位置更新规则, 应用了图论中的破圈法得到 100% 的有效解, 提高了计算效率, 并结合禁忌搜索算法, 克服了 PSO 算法的早熟问题, 对 IEEE 69 节点典型测试系统进行计算, 并与其他算法结果对比, 表明本文算法高效的搜索能力和优越性。

参考文献

- [1] Brown R E. Network Reconfiguration for Improving Reliability in Distribution Systems[A]. In: Power Engineering Society General Meeting of IEEE[C]. Toronto(Canada):2003.2419-2424.
- [2] 王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 50-55.
WANG Chun, CHENG Hao-zhong. Reconfiguration of Distribution Network Based on Plant Growth Simulation Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 50-55.
- [3] 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 Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. A Refined Branch-exchange Algorithm for Distribution Networks Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [4] 吴本悦, 赵登福, 刘云, 等. 一种新的配电网重构最优流模式算法[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 22-24.
WU Ben-yue, ZHAO Deng-fu, LIU Yun, et al. A Improved Optimal Flow Pattern Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4):22-24.
- [5] 李海峰, 张尧, 钱国基, 等. 配电网故障恢复重构算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34-37.
LI Hai-feng, ZHANG Yao, QIAN Guo-ji, et al. Study on the Algorithm for Service Restoration Reconfiguration in Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 34-37.
- [6] Jeon Y J, Kim J C, Kim J O, et al. An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-scale Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(4): 1070-1078.
- [7] 卢耀川, 廖迎晨, 陈星莺, 等. 基于遗传退火法配电网重构技术[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 28-31.
LU Yao-chuan, LIAO Ying-chen, CHEN Xing-ying, et al. Distribution Reconfiguration Technology Based on GA and SA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 28-31.
- [8] 王毅. 基于改进自动化遗传算法的配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 45-48.
WANG Yi. Refind Adaptive Genetic Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 45-48.
- [9] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 73-78.
LIU Zi-fa, GE Shao-yun, YU Yi-xin. A Hybrid Intelligent Algorithm for Loss Minimum Reconfiguration in Distribution Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 73-78.
- [10] 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 Zhen-xiang. Distribution Network Reconfiguration Based on Optimal Flow Pattern Algorithm and Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 29-33.
- [11] 卢志刚, 董玉香. 基于改进二进制粒子群优化算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 39-43.
LU Zhi-gang, DONG Yu-xiang. Distribution System Restoration Based on Improved Binary Particle Swarm Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 39-43.
- [12] 葛少云, 刘自发, 余贻鑫. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 22-26.
GE Shao-yun, LIU Zi-fa, YU Yi-xin. A Hybrid Intelligent Algorithm for Loss Minimum Reconfiguration in Distribution Networks[J]. Power System Technology, 28(23): 22-26.
- [13] 黄健, 张尧, 李绮雯. 蚁群算法在配电网重构的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(4): 559-64.
HUANG Jian, ZHANG Yao, LI Qi-wen. Application of Ant Colony System in Distribution Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2007, 19(4): 559-64.

收稿日期: 2008-05-15; 修回日期: 2008-06-13

作者简介:

卢志刚(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统运行及分析研究; E-mail: xiansun@ysu.edu.cn

杨国良(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网自动化, 配电网经济运行等;

张晓辉(1973-), 女, 副教授, 主要从事电力系统控制方面研究。