

基于改进粒子群动态搜索算法的配电网重构研究

王秀云, 熊谦敏, 杨劲松

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 提出一种基于改进粒子群动态搜索算法的网络重构方法, 算法把初始粒子群按照适应度的大小分为两个互不交叉, 且具有不同分工的子群, 并进行动态搜索。通过引入了交叉和禁忌思想, 减少了解陷入局部最优的可能性。与遗传、禁忌搜索算法重构的结果进行比较, 表明本文算法具有更高的搜索效率, 更容易找到全局最优解。

关键词: 配电网; 粒子群优化算法; 动态搜索; 网络重构

Study of distribution network reconfiguration based on improved particle swarm optimization dynamic search algorithm

WANG Xiu-yun, XIONG Qian-min, YANG Jin-song

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: An improved method based on improved particle swarm optimization dynamic search algorithm network reconfiguration is presented in this paper. The initial particle swarm is divided into two different subgroups according to the size of fitness, with a division of labour between the different subgroups of dynamic search. Cross thinking and ideological tabu are led into this algorithm to reduce the possibility of local optimum. Compared with genetic and tabu search algorithm, the results show that the proposed method possesses a higher search efficiency and is easier to find the global optimum solutions.

Key words: distribution network; particle swarm optimization; dynamic search; network reconfiguration

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0043-05

0 引言

在电力供需平衡并满足容量和电压等约束的前提下, 配电网重构是通过改变系统中的开关状态来改变电网的运行方式, 从而减少网络的运行损耗^[1]。目前, 重构算法研究主要有: ①支路交换法^[2,3], 此法分析直观, 运算速度快, 但往往只能找到局部最优解; ②神经网络法^[4], 方法具有快速决策的能力和很好的鲁棒性, 但其解却易陷入局部最优解, 并且学习非常耗时; ③模拟退火法^[5,6], 它是一种以概率1收敛于全局最优解的全局寻优算法, 但寻优过程较难控制, 直接影响了模拟退火法的寻优能力; ④遗传算法^[7-9], 方法过程简单, 兼容性好, 还具有较好的全局寻优能力, 但其计算速度慢, 需要结合具体问题或辅以其他算法来提高计算速度; ⑤分步最优法^[10], 算法以网损估计方法为基础, 分步优化, 每一步将一个开环点移至相邻支路使网损降最大, 最终达到重构后网损最小。

根据粒子群优化算法^[11-13], 提出一种改进粒子群动态搜索的算法, 算法不仅能提高计算速度, 还

克服了粒子群优化算法中的早熟问题。基于该算法的配电网重构方法, 研究了2个不同规模标准试验网络, 取得了令人满意的结果。

1 配电网网络重构的数学模型及约束条件

配电网优化重构是在配电网正常运行情况下, 通过调整联络开关与分段开关闭合组合状态, 在满足系统和网络运行约束条件下, 实现降低网损的目的。

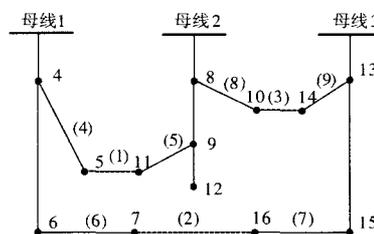


图1 典型配电网

Fig.1 Classic distribution network

当运行条件改变时, 通过调整联络开关与分段

开关闭合的组合实现网络重构。例如在图 1 中,当母线 2 上的负荷在正常运行条件下变为重负荷时,联络开关(1)被合上将节点 11 上的负荷从母线 2 转移到母线 1。同时,节点 9 和 11 之间的分段开关(5)被打开以维持配电网络的辐射状网络结构。

重构的问题就是确定网络中哪些联络开关需要闭合、哪些分段开关需要打开,使重构后的网络具有最小的有功功率损失,重构的目标函数如下:

$$\text{Minimize: } f(x) = P_{\text{loss}} = \sum_{i \in F_c} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i} \quad (1)$$

式中: r_i 为馈线 i 上的阻抗; P_i 为馈线 i 的有功功率; Q_i 为馈线 i 的无功功率; V_i 为馈线 i 电压; F_c 为网络中所有闭合馈线的集合。考虑电力系统正常运行的约束条件,式(1)需服从如下约束:

(1) 潮流约束:

$$\mathbf{AP} = \mathbf{D} \quad (2)$$

式中: \mathbf{A} 为节点与支路关系的关联矩阵; \mathbf{P} 为馈线潮流矢量; \mathbf{D} 为负荷需求矢量。

(2) 容量约束:

$$P_i \leq P_i^{\text{max}} \quad (3)$$

式中: $i \in T \cup F_c$; T 为配电变压器集合。

(3) 电压降落约束:

$$V_{\text{max}} \geq V_i \geq V_{\text{min}} \quad (4)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$, N 为节点数。

(4) 辐射状网络结构约束。

(5) 不能出现孤岛。

可见,配电网络重构是一个非线性的混合整数规划问题。

2 配电网的潮流计算

对于标准的树状网络的潮流计算,前推回推法是一种较好的方法,前推回推法思路简洁,容易实现,而且收敛性好,计算速度快。由于配电网络会出现暂时的弱环网运行状态,本文采用带有补偿电流法的前推回代法进行配网的潮流计算。

补偿电流法的基本思想是在环网中选择一点将环打开,在开环点用开环之前的电流或功率模拟开环前的状态,然后再用前推回推法求取此时已成树状的配网的潮流。

3 基于改进粒子群动态搜索算法的配电网网络重构

3.1 基本的粒子群算法

粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization)^[14]是应用速度与位置搜索模型,解决

优化问题的。每个粒子代表解空间的一个候选解,解的优劣程度由适应函数决定。速度 $V_i=(V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{id})$ 决定粒子在搜索空间单位迭代次数的位移,其中,适应函数根据优化目标定义。PSO 随机初始化为一群粒子,其中第 i 个粒子在 d 维解空间的位置表示为 $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{id})$ 。每一次迭代,粒子通过动态跟踪两个极值来更新其速度和位置。第一个是粒子从初始到当前迭代次数搜索产生的最优解:个体极值 $P_i=(P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, \dots, P_{id})$ 。第二个是粒子种群目前的最优解:全局极值 $g_i=(g_{i1}, g_{i2}, g_{i3}, \dots, g_{id})$ 。粒子根据以公式(5)、(6)来更新其速度和位置:

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_i - x_i) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (g - x_i) \quad (5)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (6)$$

其中: $\text{rand}()$ 是均匀分布在(0,1)区间的随机数。一般取学习因子 $C_1=C_2=2$ 。粒子在解空间内不断跟踪个体极值与全局极值进行搜索,直到达到规定的迭代次数或满足规定的误差标准为止。

从上式可看出当粒子群历史最优位置在长时间内不发生变化时,在粒子群体很接近 P_i 时,其速度更新将主要由历史速度决定,于是速度将越来越小,粒子群呈现出强烈的“趋同性”,表现在式(5)中的第二项和第三项接近于 0。这种“趋同性”加快了算法的搜索速度,但是却减弱了群体开拓新的搜索空间的能力。如果该最优位置为一局部最优点,则算法很容易陷入局部最优,发生早熟现象。通过粒子群优化算法的搜索机理分析发现,无论是早熟收敛还是全局收敛,粒子群中的粒子都会出现“聚集”现象。

3.2 改进的粒子群动态搜索算法

改进的粒子群动态搜索算法是先随机产生一定规模的粒子(初始解),然后计算各粒子适应度的大小,并以平均适应度为准,把粒子分成两个互不交叉并具有不同分工的子群 P_1 和 P_2 ,让它们按照不同的搜索方式进行搜索。这里 P_1 与 P_2 不是单纯地分为两部分,搜索过程中,当 P_1 中的粒子适应度低于平均适应度时就会被分到 P_2 中去,两部分之间的粒子是变化的,而不是固定的,因此搜索过程是动态的,保证了算法在搜索时的广度和深度。

P_1 与 P_2 子群的生产方法是:

1) 子群 P_1 : 将粒子群中各粒子适应度进行排序,按高于平均适应度的 n 个粒子作为该子群成员。同时取最优粒子的适应度作为该子群的最优。在迭代过程中采用在粒子群中嵌入局部搜索的改进算法,在粒子群最优附近寻搜索新的群体最优值,就

概率而言这是最有可能寻找到全局最优的区域,保证了最优粒子群的搜索。

2) 子群 P_2 : 将粒子群中低于平均适应度的 m 个粒子作为该子群成员,同时取其最优粒子的适应度作为该子群的最优。在迭代过程中采用标准粒子群算法,并引入禁忌搜索算法的思想,算法可开拓新的搜索空间,粒子的不断演化保证了粒子群的多样性,提高了粒子群的全局探测能力。

3.3 改进粒子群动态搜索算法与配电网重构的结合

本文选用基于环路的编码方法对配电网中的开关进行编码,如图 1 所示,网络中有 3 个环网,因此粒子的维数为 3,每一维的变化范围是该环网内所包括的开关,根据规则可选择其中一个粒子的初始状态为(5,9,6),表示此时打开的开关分别为(5)、(9)、(6),其他没有选中的开关处于闭合状态。这样可以选择不同的开关组合状态,从而计算出每种组合状态下的网络损耗,最后计算出每个粒子的适应值。根据配电网规模确定粒子群的规模,每一个粒子表示一种开关组合状态。因计算速度的公式中计算出来的数据通常会带有小数,而开关是用整数来表示的,所以要对其进行离散化处理,把计算出来的数据采用取整的方法,即采用四舍五入的方法,这样就可以得到相对应的开关。

由于配电网具有闭环设计开环运行的特点,所以重构后的网络必须满足放射状结构并且不能出现孤岛,否则视为不可行解。当出现不可行解时,对粒子进行修复,即在允许的范围内随机改变粒子的某一维的值,保证选择的开关组合满足配电网的各种约束条件和运行方式。

本文主要研究正常情况下的配电网优化重构,但为了在发生故障时能尽快恢复故障,减小停电范围和停电损失,应按照实际的网络接线、配电系统的运行方式和故障恢复时间的要求对重构得出的结果进行验证,进而选择较优的适合配电网运行的结构。

处理子群 P_1 时,引入遗传算法中交叉的思想,设交叉的概率为 0.9。选择该子群中两个适应度相近的粒子进行交叉,交叉后所得的两个子代粒子替换原来的两个父代粒子,这样得到了两个新的粒子,再比较该子群中所有粒子适应度的大小,适应度最大的粒子位置作为该子群中的全局最优位置。处理子群 P_2 时,设禁忌长度 L ,把每次迭代所得的适应度的值依次存入禁忌表里,对之后每次迭代的适应度的值,若与禁忌表里相同时则该粒子保留为原来

的位置,待该子群中的全局最优值更新后粒子再以式(5)计算出来的新速度进行飞行,飞行到新的位置后计算其适应度,并将新的适应度存入禁忌表中,当迭代次数大于 L 次时,同时将最前面存入的适应度退出禁忌表。

3.4 基于改进粒子群动态搜索算法的配电网重构步骤

1) 初始化 输入网络信息,确定变量的维数(配电网中联络开关的数量,其变化范围为包括该联络开关的单个环网内的开关数量),设置粒子群的规模 M 和算法参数,设置禁忌长度 L ,设置最大迭代次数 I_{max} 。

2) 计算粒子的适应度,即配电网网损的倒数。

3) 计算出平均适应度,并以平均适应度为准,将其划分为子群 P_1 与 P_2 ; P_1 、 P_2 中的每个粒子比较它和它经过的历史最好位置的适应度值,如果更好则对粒子的速度和位置按照式(5)、(6)进行更新。

4) 若粒子群当前最优解的适应度在设定的迭代次数内未发生变化,对部分适应度非常相近和较差的粒子进行随机扰动,即以 $P=0.05$ 的概率进行变异操作,然后计算变异后粒子的适应度。

5) 按适应度的大小,重新划分子群 P_1 、 P_2 。

6) 判断当前迭代次数是否达到最大的迭代次数 I_{max} ,若不满足,返回步骤 2),反之,输出群体当前最优解 P 。

4 算例分析

以 IEEE 33 节点和美国 PG&E69 节点系统作为算例,验证本文算法。33 个节点的算例有 37 条支路,其中的 5 条为联络支路,额定电压为 12.66 kV。按本文算法,编码长度为 5,即为联络开关的数量;根据粒子群算法中粒子群规模的选择方法:当 M 较小时,找到全局最优解的可能性较小,而 M 较大时,找到全局最优解的可能性较高,但计算速度较慢,分别选择 $M=10$ 、 $M=20$ 、 $M=30$,经过计算,当 $M=20$ 时,计算结果和速度较优,所以选择种群规模 M 为 20;根据禁忌长度的选择方法,当禁忌长度较大时,适用于广域搜索,而禁忌长度较小时,适用于局域搜索,通过多次计算,本文确定禁忌长度为 6,即当禁忌表里存放的数据组数大于 6 时,最先存放的那组数据退出禁忌表。表 1 列出了网络重构的结果。PG&E69 节点算例的配电网 2 有 69 个节点,74 条支路,其中的 5 条为联络支路,额定电压为 12.66 kV,总负荷为(3802+j2694) kVA。具体参数设置方法和算例 1 相同,编码长度为 5,种群规模为 30,禁忌长

度为 8，网络重构结果列于表 2。

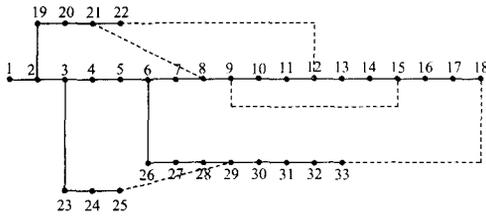


图 2 IEEE33 节点配电系统

Fig.2 IEEE 33 bus system

表 1 IEEE33 节点配电系统重构结果

Tab.1 Reconfiguration results of IEEE 33 bus system

	重构前	文献[15]算法	本文算法
打开开关集合	21-8	7-8	28-29
	22-12	9-10	32-33
	9-15	14-15	9-15
	33-18	32-33	21-8
	25-29	21-8	8-11
网损/kW	203.5	140.9	132.6
最低节点电压/p.u	0.910 2	0.930 8	0.938 7

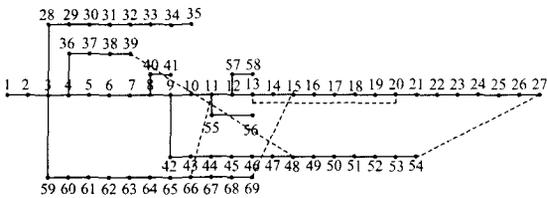


图 3 69 节点配电系统

Fig.3 Schematic diagram of 69-bus distribution system

表 2 美国 PG&E 69 节点配电系统重构结果

Tab.2 Reconfiguration results of U.S. PG&E 69 nodes system

	重构前	文献[16]算法	本文算法
打开开关集合	11-66	11-66	11-66
	13-	13-20	13-20
	15-69	14-15	11-12
	27-54	47-48	50-51
网损/kW	225.003	99.62	94.83
最低节点电压/p.u	0.909	0.9429	0.943 3

由重构的结果看，本文的改进粒子群算法重构后网损大为降低，网络的最低电压值明显提高，网络重构对降低系统运行网损和提高供电质量作用明显。基本遗传算法计算 IEEE33 和 PG&E69 节点系统收敛次数均在 100 次以上，本文算法与禁忌搜索算法收敛性能比较如图 4 和图 5。

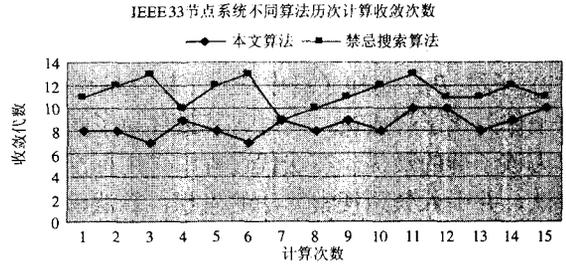


图 4 IEEE33 节点系统中迭代次数比较

Fig.4 Comparison of the number of iterative in IEEE 33

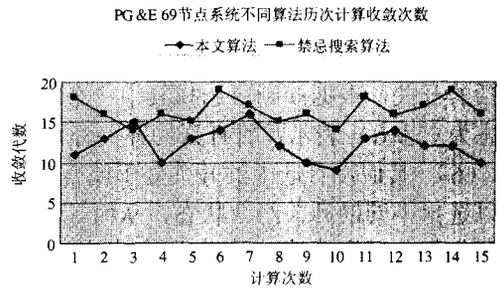


图 5 PG&E 69 节点系统中迭代次数比较

Fig.5 Comparison of the number of iterative in PG&E 69

4 结论

- 1) 基于动态搜索的粒子群算法，粒子在飞行过程中更易找到全局最优解。
- 2) 采用基于环路的编码方式，使每个粒子的维数大大降低，节省了存储空间，提高了计算速度。
- 3) 将遗传算法和禁忌搜索算法的思想与粒子群算法结合起来，提高了算法的全局寻优能力。
- 4) 算例结果表明，基于动态搜索粒子群算法的配电网络重构，能够有效降低网损，提高运算效率。

参考文献

[1] Peponis G J, Papadopoulos M P, Hatzigryriou N D. Distribution Network Reconfiguration to Minimize Resistive Line Losses[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1338-1342.

[2] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网络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.

[3] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网络重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.

- ZHANG Dong, ZHANG Liu-chun, FU Zheng-cai. A Quick Branch-exchange Algorithm for Reconfiguration of Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2005,29(9):82-85.
- [4] 金丽成, 邱家驹. 基于CMAC神经网络的配电网重构模型[J]. 浙江大学学报, 2004, 38(6):784-788.
JIN Li-cheng, QIU Jia-ju. Model of Distribution Power Network Reconfiguration Based on CMAC Neural Network[J]. Journal of Zhejiang University, 2004, 38(6): 784-788.
- [5] 胡敏, 陈元. 配电系统最优网络重构的模拟退火算法[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(2): 24-28.
HU Min-you, CHEN Yuan. Simulated Annealing Algorithm of Optimal Reconfiguration in Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(2): 24-28.
- [6] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng. Simplify the Complicated Distribution Network Analysis and Optimization[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [7] 余健明, 蔡利敏. 基于改进遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 71-74.
YU Jian-ming, CAI Li-min. Distribution Network Reconstruction Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 71-74.
- [8] 余贻鑫, 邱炜, 刘若沁. 基于启发式算法与遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2001, 25(11):19-22.
YU Yi-xin, QIU Wei, LIU Ruo-qin. Distribution System Reconfiguration Based on Heuristic Algorithm and Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2001, 25(11):19-22.
- [9] 宋平, 张焰, 蓝毓俊, 等. 改进遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(4): 488-491.
SONG Ping, ZHANG Yan, LAN Yu-jun, et al. Application of Improved Genetic Algorithm Power Distribution System Reconfiguration[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(4):488-491.
- [10] 钱国基, 李海锋, 张尧. 配电网重构的分步最优算法[J]. 广东电力, 2000, 13(5): 1-4.
QIAN Guo-ji, LI Hai-feng, ZHANG Yao. A Multiple-step Optimization Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Guangdong Electric Power, 2000, 13(5): 1-4.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks[C]. Perth(Australia), 1995.942-1948.
- [12] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14-19.
YUAN Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Yong-chuan, et al. A Survey on Application of Particle Swarm Optimization to Electric Power Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.
- [13] 张利彪, 周春光, 马铭, 等. 基于粒子群算法求解多目标优化问题[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(7):1286-1291.
ZHANG Li-biao, ZHOU Chun-guang, MA Ming, et al. Solutions of Multi-Objective Optimization Problems Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(7):1286-1291.
- [14] Kennedy J, Eberhart R C. A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm[A]. in: Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics[C]. 1997.4104-4108.
- [15] 张海棠. 基于遗传算法的配电网重构的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004. 37-39.
ZHANG Hai-tang. Study on Distribution Network Reconfiguration Based on Genetic Algorithm[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.37-39.
- [16] 代卫星. 基于网络重构和电容器投切的降低配网损耗的技术[D]. 成都: 四川大学, 2004. 46-47.
DAI Wei-xing. The Technology Reduction Based on Network Reconfiguration and Capacitor Control in Distribution System[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.46-47.

收稿日期: 2008-08-17; 修回日期: 2008-09-22

作者简介:

王秀云(1977-), 女, 讲师, 主要研究方向为电力系统自动化;

熊谦敏(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: xiongqianmin@163.com

杨劲松(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。