

基于负荷平衡的配电网重构遗传算法研究

邹必昌^{1,2}, 龚庆武¹, 李勋¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 长江大学电子信息学院, 湖北 荆州 434023)

摘要: 以负荷平衡为目的建立了一种新的配电网重构方案的数学模型, 即负荷的不平衡度以负荷平衡指数来衡量。采用遗传算法, 染色体以开关的状态为基因进行编码, 通过杂交、变异等操作综合分析计算出基于适应度函数的最优方案, 也就是具有最小的负荷平衡指数的重构方案为最优。作为对比, 计算出了负荷平衡指数较小时的网损, 发现优化重构后配电网的网损也相应降低了。以三馈线 IEE16 节点系统对该方法的有效性进行了验证, 结果表明该方案用于配电网重构能显著改善负荷, 降低网损。

关键词: 配电网; 重构优化; 负荷平衡指数; 遗传算法; 网损

Research on network reconfiguration GA in distribution system based on load balancing

ZOU Bi-chang^{1,2}, GONG Qing-wu¹, LI Xun¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Electronics and Information, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: This paper proposes a new mathematical model of distribution network reconfiguration with the purpose of load balancing, i.e. evaluating the load unbalance with the load balance index(LBI). And then it adopts genetic algorithm, takes the states of the switches as the genes of the chromosome for encoding, and through reproduction, crossover, mutation, etc, comprehensively analyses and calculates the optimal proposal based on fitness function, that is the proposal with the least LBI value. At the same time, by comparison, power loss values are calculated when the LBI values are relatively small, and the conclusion is drawn that the power losses are decreasing accordingly as the load becomes more balanced. The proposed approach is tested on IEEE three-feeder, 16-bus system and the results show the proposed scheme for network configuration is valid in improving load and reducing power loss.

Key words: distribution network; reconfiguration optimization; load-balancing index (LBI); GA; power loss

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0080-04

0 引言

配电网重构是配电网运行优化的一个重要手段。根据负荷预测以及网络负荷变化情况, 通过灵活调整网络中联络开关和相应常闭分段开关的开合状态, 可以降低运行网损、提高电压质量、消除过载、提高供电可靠性、提高网络供电能力等, 以往的大多数文献都以网损最小为目标, 而以负荷平衡为目的的配电网重构, 则是通过开关的操作实现馈线间的负荷转移, 从而改善整个系统的运行状况。由于配电线路包含住宅用电, 商业用电和工业用电等不同类型的负荷, 它们的特性各不相同, 因此配电网重构会经常发生。

关于配电网重构目前有多种方法, 但以网损最

小为目的的居多, 配电网重构的算法主要有最优流法, 动态规划算法、支路交换法、禁忌搜索法、遗传算法、免疫算法、协同进化算法等^[1-13]。在以负荷平衡为目的的配电网重构中, 文献[14]提出了一种称为“测距技术”(Distance Measurement Technique)的算法, 此法首先找到一个回路, 然后通过开关操作来改善负荷平衡。DMT 能够获得接近最优的重构方案。文献[15]则是采用两种近似潮流计算在降低网损的同时, 也使得负荷达到一定的平衡, 但计算量大; Aoki 等将容量和电压约束看成是一个非线性的混合整数问题并转化成二次规划的子问题从而提出了负荷平衡和故障恢复的公式^[16-17]。Baran 和 Wu^[18]则把网损最小和负荷平衡归结成整数规划问题得出解决方案。H. D. Chiang^[19]等人提出

一种含有等式和不等式的多目标和不可微的优化问题用于同时降低网损和平衡负荷。G. Peponis 等^[20]提出了改进的开关交换法来平衡负荷; M. A. Kashem 等^[21]则提议一种新的负荷平衡指数并用于网络的负荷平衡; Whei-Min Lin^[22]等则提出了一种新的负荷平衡算法用于解决电力系统三相负荷不平衡问题。

本文提出了一种新的基于遗传算法平衡负荷的配电网重构方法。在满足电压和线路潮流约束的前提下, 重构中分段开关和联络开关的状态由遗传算法确定。然后在不同的网络中计算其负荷平衡指数(LBI), 最后具有最小的 LBI 即为最优方案。

1 遗传算法

遗传算法(GA)是通过搜索技术去寻找优化问题的精确或近似解的方法。遗传算法又称演化算法, 即根据生物界适者生存的原理进行优化。算法以一个群体中的所有个体为对象, 并利用随机化技术指导对一个被编码的参数空间进行高效搜索。其中, 遗传, 变异, 选择和交叉(又称重组)构成了遗传算法的基本操作; 传统的方法是用二进制数来对染色体进行编码, 当然还有其他方式的编码, 如十进制编码。进化通常从随机产生的一群个体开始, 一代一代繁衍。对每一代中的个体适应值进行评估, 根据评估值和改良从中随机选出参与繁衍的下一代, 新的种群用在下一代的迭代计算中。迭代终止的条件是要么达到最大的迭代次数要么取得了令人满意的适应度值。起初, 根据适应度函数定义染色体然后按照随机选择或轮盘法进行选择, 最后进行交叉变异获得最优解。

遗传算法区别于传统的优化和搜索方法主要在以下几个方面:

(1) 遗传算法处理的是参数的编码而不是参数本身, 也就是说其操作是在给定的字符串中进行的。

(2) 遗传算法的本质并行性。遗传算法按照并行方式搜索种群中所包含的所有点, 而不是单点。

(3) 遗传算法只需要影响搜索方向的目标函数本身, 而不需要目标函数的导数或其他辅助信息, 因而具有广泛的适应性;

(4) 遗传算法使用概率规则而不是确定性规则指导搜索, 能处理病态、离散型的优化问题。

(5) 遗传算法强调概率转换规则, 而不是确定的转换规则。

所有这些特性使得遗传算法具有更好的鲁棒性、有效性及较小的对数据的依赖性。遗传算法为从代表可能解的一群个体中找出最优解提供了一种

有效的方法。每一个可能解被称为“染色体”。搜索空间的新解通过繁殖、交叉和变异等遗传操作产生, 这些操作在连续的后代中不停地产生更适合的个体, 最后很快找到全局最优解。

遗传算法大致采用三种基本操作: (1) 繁殖; (2) 交叉; (3) 变异。

A. 繁殖

繁殖通常是对种群的第一步操作, 其染色体称为父代, 通过交叉产生子代。繁殖以随机方式选择一对二进制表示的染色体来配对。

如 染色体 A: 111111111

染色体 B: 000000000

B. 交叉:

交叉是重组操作。两条染色体通过一点或两点交叉随机互换数值, 如两点互换交叉, 则新的后代如下:

后代 A: 001111111

后代 B: 110000000

C. 变异

经过交叉后, 再对染色体进行变异操作, 也就是随机地改变后代染色体中的某一位, 将 0 变为 1, 反之将 1 变为 0。

后代 A: 001110111

后代 B: 110001000

2 计算公式

在配电系统中, 馈线重构用来平衡负荷。除了电气约束条件必须满足之外, 开关倒换要遵从以下原则:

(1) 网络必须保持辐射状结构;

(2) 无孤岛;

(3) 除去断开/闭合的开关外, 网络的拓扑结构保持不变。

在负荷平衡的配电网重构中, 负荷的不平衡可用负荷平衡指数(LBI)表示为:

$$LBI = \frac{1}{n} \sqrt{\sum (S - S_i)^2}, \quad i=1, \dots, n \quad (1)$$

其中: n 为主馈线的数目; S_i 是馈线 i 上的规范化的负荷(即实际负荷除以负荷极限); S 是规范化的负荷 S_i 的平均值。

配电系统正常情况下都是闭环设计开环运行, 本文运用基因算法, 通过改变分段开关的状态来改变其结构。

3 网损的计算

网损的计算公式 P_{Loss} 可以表示为:

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^{n_b} k_i r_i |\dot{I}_i|^2 \quad (2)$$

式中： n_b 为配电网的支路数； r_i 为第*i*支路的电阻； \dot{I}_i 为流过第*i*条支路的电流； k_i 为开关（节点）*i*的状态， k_i 为0表示分断，为1表示闭合^[13]。

配电网损 P_{Loss} 通过潮流计算得到。

4 算例分析

图1是一个标准的3馈线16个节点的配电网^[23]，包括13个常闭的分段开关和3个常开的联络开关即4, 11, 13。符号(C, O)表示打开开关O和闭合开关C的操作。例如操作(4, 3)通过闭合联络开关4断开分段开关3将负荷(5)从母线1转移到母线2。为了保持配电网的辐射状结构，闭合一个常开开关必然伴随着打开一个常闭开关。打开分段开关6，闭合联络开关4，负荷(11)就从母线2转移到母线1。同样，其他的负荷也可以通过开关操作进行转移。

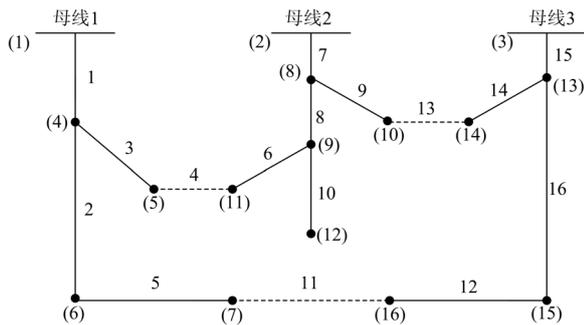


图1 IEEE标准3馈线16节点配电系统

Fig.1 IEEE three-feeder 16-bus distribution system

通过运用遗传算法对图1的三馈线测试系统进行计算，得到几组重组网络，其中负荷平衡指数(LBI)较小的列表如表1所示。

从表2可以看出，随着LBI值的减小，网损值

表1 LBI值

Tab.1 LBI values

开关状态		LBI	网损/kw
闭合	断开		
1,2,3,5,6,7,8,9,10,12,14,15,16	4,11,13	0.241 623	521.36
1,2,3,4,5,7,8,9,10,12,14,15,16	6,11,13	0.235 423	511.6
1,2,3,5,6,7,8,10,12,13,14,15,16	4,9,11	0.186 492	487.52
1,2,3,6,7,8,9,10,11,12,14,15,16	4,5,13	0.227 946	502.7
1,2,3,4,5,7,8,10,12,13,14,15,16	6,9,11	0.170 941	466.22
1,2,3,4,7,8,10,11,12,13,14,15,16	5,6,9	0.158 316	471.62

也降低了。具有最小LBI值的开关状态如表2所示。计算流程图如图2所示。

表2 重构后最优网络的开关状态

Tab.2 The optimal network switch states after reconfiguration

开关编号	开关状态	开关编号	开关状态	开关编号	开关状态
1	C	7	C	13	C
2	C	8	C	14	C
3	C	9	O	15	C
4	C	10	C	16	C
5	O	11	C		
6	O	12	C		

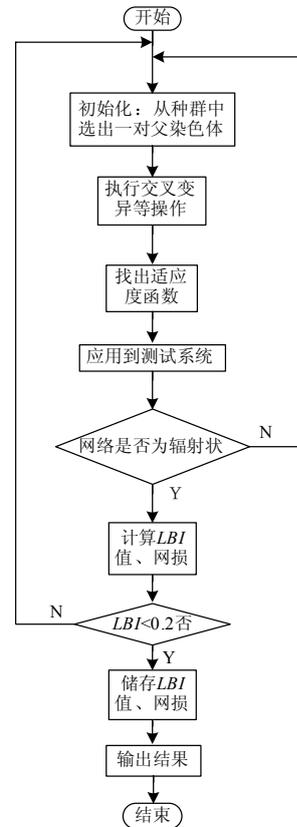


图2 计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart

比较文献[23]和本文的结果发现本文的LBI值最优。表3列出了两种LBI值和各自的开关状态。

表3 结果比较

Tab.3 Results comparison

	文献[20]方法	本文方法
断开的开关	15,21,26	5,6,9
闭合的开关	11,12,13,14,16,17,18,19,20, 22,23,24,25	1,2,3,4,7,8,10,11, 12,13,14,15,16
LBI	0.241 623	0.158 316

5 结论

本文就基于负荷平衡基础上的电力系统配电网重构问题进行了阐述并提出了一种新方法, 既平衡了负荷, 也大大降低了网损。对比其他方法, 本文所提出的结合负荷平衡指数的遗传算法获得了最佳的效果。对比图 1 所示的系统, 该方法在涉及馈线负荷平衡方面给出了最佳方案。

参考文献

- [1] 王林川, 梁栋, 于冬皓, 等. 基于遗传和禁忌搜索混合算法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 27-31.
WANG Lin-chuan, LIANG Dong, YU Dong-hao, et al. Distribution network reconfiguration based on genetic/tabu search hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 27-31.
- [2] 杨建军, 战红, 陈宪国, 等. 基于遗传算法并避免不可行解的配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 43-46.
YANG Jian-jun, ZHAN Hong, CHEN Xian-guo, et al. Optimization of distribution network reconfiguration of avoiding infeasible solutions based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 43-46.
- [3] 康明才. 模糊遗传算法在网络重构中的应用[J]. 继电器, 2002, 30(3): 37-38, 42.
KANG Ming-cai. Application of fuzzy genetic algorithm on distribution networks reconfiguration[J]. Relay, 2002, 30(3): 37-38, 42.
- [4] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网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.
- [5] 张忠会, 李曼丽, 熊宁, 等. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 继电器, 2007, 35(10): 41-44.
ZHANG Zhong-hui, LI Man-li, XIONG Ning, et al. An improved tabu search for reconfiguration of distribution systems[J]. Relay, 2007, 35(10): 41-44.
- [6] 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. An improved Tabu search for reconfiguration of distribution systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 22-26.
- [7] 张栋, 张刘春, 傅正财. 基于改进禁忌算法的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 60-64.
ZHANG Dong-zhang, LIU Chun, FU Zheng-cai. Network reconfiguration in distribution systems using a modified TS algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 60-64.
- [8] 毕鹏翔, 刘健, 等. 配电网重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-60.
BI Peng-xiang, LIU Jian, et al. A refined genetic algorithm for power distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-60.
- [9] 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 Xiao-ming, HUANG Yan-hao, YIN Xiang-gen. A genetic algorithm based on improvement strategy for power distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 49-54.
- [10] Mendoza J, Lopez R, Morales D, et al. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators real application[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 948-954.
- [11] 王秀云, 任志强, 楚冬青. 用于降低网损的配电网优化重构方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 21-24, 30.
WANG Xiu-yun, REN Zhi-qiang, CHU Dong-qing. Study of algorithm on distribution network optimum reconfiguration for reducing line loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 21-24, 30.
- [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 Wen-chuan, QIU Jia-ju. An artificial immune algorithm to distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 25-29.
- [13] 陈曦. 基于协同进化算法的配电网重构研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
CHEN Xi. Distribution network reconfiguration based on a cooperative co-evolutionary algorithm[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [14] Kashem M A, Ganapathy V, Jasmom G B. Network reconfiguration for load balancing in distribution networks[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(6): 563-567.
- [15] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1409.
- [16] Aoki K, Kuwabara H, Satoh T, et al. An efficient algorithm for load balancing of transformers and feeders[J]. IEEE Trans PWRD, 1988(4): 1865-1872.
- [17] Aoki K, Ichimori T, Kanezashi M. Normal state optimal load allocation in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 3(1): 147-155.

(下转第 111 页 continued on page 111)

- for supercapacitors[J]. Electric Machines and Drives Conference, 2001: 985-990.
- [6] Mihali F, Kos D. Reduced conductive EMI in switched-mode DC-DC power converters without EMI filters: PWM versus randomized PWM[J]. Power Electronics, 2006: 1783-1794.
- [7] Williams B W. Basic DC-to-DC converters[J]. Power Electronics, 2008: 387-401.
- [8] 陈明, 汪光深, 马伟明. 多重化双向 DC-DC 变换器电流纹波分析[J]. 继电器, 2007, 35 (4): 53-57.
CHEN Ming, WANG Guang-shen, MA Wei-ming. Analysis of the inductor current ripple in interleaved bi-directional DC-DC power converters[J]. Relay, 2007, 35 (4): 53-57.
- [9] 张慧妍, 齐智平, 韦统振. 超级电容器储能直流变换器的设计[J]. 电气应用, 2006, 25 (12): 97-100.
ZHANG Hui-yan, QI Zhi-ping, WEI Tong-zhen. Design DC-DC converter for ultracapacitor energy storage[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25 (12): 97-100.
- [10] 赵修科. 实用电源技术手册磁性元器件分册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
ZHAO Xiu-ke. Practical handbook of power magnetic components volumes[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2002.
- [11] 杨玉岗. 现代电力电子的磁技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
YANG Yu-gang. Magnetism in modern power electronics technology[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [12] 林忠岳. 现代电力电子应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
LIN Zhong-yue. Modern power electronics application technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [13] 翁情安, 张炳达, 郝爽. 基于 TMS320F2812 的同步发电机励磁控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (19): 92-96.
WENG Qing-an, ZHANG Bing-da, HAO Shuang. Excitation controller of synchro generator based on TMS320F2812[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (19): 92-96.
- [14] 熊军华, 王亭岭, 徐荣. 基于 TMS320F2812 直流操作电源系统的设计与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (20): 113-116.
XIONG Jun-hua, WANG Ting-ling, XU Xing. Design and development of direct current power supply systems based on TMS320F2812[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (20): 113-116.

收稿日期: 2010-04-08

作者简介:

任桂周 (1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为车辆电子控制及机电液一体化技术; E-mail: renguizhou@tom.com

常思勤 (1954-), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为车辆电子控制及机电液一体化技术、车辆动力装置设计、仿真与优化、车辆现代设计理论与方法。E-mail: changsq@mail.njust.edu.cn

(上接第 83 页 continued from page 83)

- [18] Baran M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans, 1989 (2): 1401-1407.
- [19] Chiang H D, Jumeau R J. Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 1: a new formulation and a solution methodology[J]. IEEE Trans PWRD, 1990 (4): 1902-1909.
- [20] Pepionis G, Papadopoulos M. Application of heuristic methods on large-scale networks[J]. IEE Proc. Gener, Transm and Distrib, 1995, 142 (6): 631-638.
- [21] Kashem M A, Moghavvemi M. Maximizing radial voltages stability and load balancing via loss minimization in distribution networks[C]. //Proceedings of the International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD98), Singapore: 1998: 91-96.
- [22] Lin W M, Chin H C. A current index based load balancing technique for distribution systems[C]. //Proceedings of the International Conference on Power System Technology, POWER CON98, 1998, 223-227.
- [23] Civanlar S, Grainger J J, Yin H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3 (3): 97-104.

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-07-08

作者简介:

邹必昌 (1966-), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及配电自动化; E-mail: zoubichang123@126.com

龚庆武 (1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、电力系统自动化和电力系统仿真等;

李 勋 (1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。