

基于改进禁忌搜索的配电网重构

张忠会¹, 李曼丽¹, 熊宁¹, 张文诚²

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330029; 2. 江西吉安电力公司调度所, 江西 吉安 343000)

摘要: 在配电网的运行中, 常需根据负荷的变化情况及时调整网络中的开关状态, 以达到整个网络消除过载、损耗最小的目的。为了解决配电网优化重构问题, 提出了一种改进禁忌搜索(TS)方法。该方法根据配电网在正常运行的情况下呈辐射状的特点, 将同步开关法的思想用于TS优化编码策略中, 以系统有功网损最小为目标函数对配电网进行重构。通过对典型系统的计算, 结果表明该算法具有更高的搜索效率和可靠性。

关键词: 配电网重构; 同步开关; 禁忌搜索; 网络损耗

An improved tabu search for reconfiguration of distribution systems

ZHANG Zhong-hui¹, LI Man-li¹, XIONG Ning¹, ZHANG Wen-cheng²

(1. Nanchang University, Nanchang 330029, China; 2. Jian Electric Utility, Jian 343000, China)

Abstract: Under the operation of distribution network, switches' status are usually altered according to the change of load power in order to diminish overload and minimize the transmission loss. To optimize distribution network reconfiguration, an improved method is presented and applied to optimize distribution network. In this method, considering the features of distribution network, i.e., radial structure in normal operation, the principle of synchronous switch is used for TS to optimize the code tactics and the minimization of active power loss is used as the objective function. The presented method is conducted by typical testing system, the calculation result shows that the new method possesses better search efficiency and dependability.

Key words: distribution network reconfiguration; synchronous switch; tabu search; transmission loss

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)10-0041-04

0 引言

为了提高供电的可靠性及灵活性, 配电网沿线上设有分段开关, 正常运行时闭合; 馈线间或供电电源间装设联络开关, 正常运行时打开, 以保证配电网辐射状运行。在运行的过程中根据负荷的变化情况及时调整网络中分段开关和联络开关的状态来改变配电网的结构, 达到平衡各馈线的负荷、消除过载、降低网损的目的, 这一过程我们称之为配电网重构。

理论上, 配电网重构是一个有约束、多目标的非线性组合优化问题。由于配电网中开关数目很多, 以致其解空间非常庞大, 如果仅采用简单的穷举法进行搜索将出现“组合爆炸”问题。目前已经有多种方法来解决这一问题, 如支路交换法^[1,2]、同步开关法^[3,4]、最优流模式算法^[5,6]、遗传算法^[7,8]、禁忌算法^[9,10], 模拟退火算法^[11,12]等。支路交换法的算法简单, 但由于各个环之间会互相影响, 因此不能

保证得到全局最优解, 而同步开关法是以联络开关(状态为开)加上其左右相邻的两个分段(状态为闭)开关作为一组开关。因此对于每个开关组都有断左、断右、不变三种状态, 对所有开关组的可能状态用网损指标进行评价, 确定其中最好的一个结构。然后分别对每一个联络开关进行扩展搜索, 就能找出全局最优解。但若系统有 n 个联络开关, 则开关组的状态数有 3^n 个, 造成组合爆炸, 如何快速找到最优的结构成为配网优化重构的核心问题。从近几年来看, 现代优化算法成了研究的热点, 特别是禁忌算法(TS)以其很强的寻优能力和较快的寻优速度受到研究者的重视。

本文提出一种改进禁忌搜索(TS)方法, 将同步开关法^[3]的思想用于TS优化编码策略中, 先用禁忌算法寻到网络的最优结构, 然后在最优结构的基础上进行扩展搜索寻到全局最优解。算例表明, 本文提出的方法寻优效果好, 速度快。

1 配电网重构的数学模型

当网损下降时,网络的过载情况、负荷平衡度和电压质量等都能得到一定的改善。因此本文以系统有功网损最小为目标函数,数学模型可以表示为:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{N_b} R_i I_i^2 \quad (1)$$

式中: N_b 为支路数; R_i 为支路 i 的电阻。

同时,配电网重构还需满足连通性、辐射性约束即配电网中无环路和孤立节点存在。

2 改进禁忌搜索算法在配网重构中应用

2.1 禁忌搜索简介

禁忌搜索算法是局部邻域算法的推广,是人工智能在组合算法中的一个成功应用。禁忌搜索的特点是采用了禁忌技术。所谓禁忌就是禁止重复前面的工作,为了回避局部邻域搜索陷入局部最优的主要不足,禁忌搜索算法是用一个禁忌表记录下已经达到过的局部最优点或有选择地搜索这些点或过程,以此来跳出局部最优点。该算法应用到配电网重构中的关键点是:编码方式的选择、邻域的构造、禁忌长度、释放水平以及终止规则。

2.2 改进禁忌搜索

2.2.1 编码方式的选择

编码方式对于禁忌算法是非常重要的,一个较好的编码能有效地提高整个搜索过程的效率,减少寻找最优解的时间。反之则会产生很多不可行解,造成解空间的膨胀,降低搜索效率。

文献[13]选取所有开关作为变量集合,在复杂的系统中,将造成解空间庞大,搜索效率低。文献[10]在文献[13]的基础上,从配电网自身的特点出发,将约束条件直接体现在寻优的控制上,相应提高了搜索的效率。文献[9]采用了一种向上节点的变量表达方法,这种表达方式的选择虽然在一定程度上简化了计算,提高了搜索的效率,但不能保证所有实验解都满足配电网辐射状约束。

本文以开关组^[3]的状态作为编码方式,对于一个具有 N 个联络开关的配电网,它的编码长度为 N ,每个码位的取值或为 0、或为 1、或为 2。这样的编码方式可以确保从初始解到实验解均严格满足配电网辐射状的网络结构的约束,从而大大减少了不可行解的产生,提高了搜索的效率。

2.2.2 邻域的构造

本文采用解的单步“移动”构造邻域。由于每个码位只有三种取值,即 0、1、2。因此对于每个码位邻域解的个数为二。如某一码位的当前值为 0,那么它的变化就只有 0→1 和 0→2。若编码的长度为 N ,则邻域解的个数就有 $2N$ 个。

2.2.3 禁忌表的长度

禁忌长度一般根据经验来确定。禁忌长度设置小了会造成搜索在极值点附近循环;设置大了会增大计算量,影响算法的搜索效率。

2.2.4 释放水平和终止规则

本文采用的释放水平是:当 Tabu 表中的一个移动作用于当前解,能够产生到目前为止的最优解,则认为该移动达到了“释放水平”。

为了兼顾搜索质量和效率,本文采用的终止判据是:达到最优状态连续保持不变的最大迭代次数 (K_{\max})。

2.2.5 扩展寻优

用上述算法进行搜索,得到的只是一个基于联络开关的最优结构,为了获得全局最优解,还得进行扩展搜索。

扩展搜索的具体步骤如下:如果在最优结构中,某一开关组的取值为 0,在扩展搜索中忽略该开关;如果开关组取值为 1,当前开关组中的联络开关必须向右移动;如果开关组取值为 2,则当前开关组中的联络开关须向左移动。对于形成的新结构,再计算其网损,然后和原来的最优结构比较,如果大于原来的,就停止对这个环的搜索;否则,当前的结构就被认为是最优结构,然后再朝着这个方向继续搜索,直到网损不再降低为止。依次对其它开关组进行上述的搜索,这样就可以找到最优解。

3 算例分析

本文采用 IEEE33 节点^[14]和美国 PG&E69 节点^[14]系统分别作为算例。

算例 1 的系统有 33 个节点,37 条支路,其中 5 条为联络支路。额定电压取 12.66 kV,TS 表的深度取 12,实验解个数 $S_{\max}=10$, $K_{\max}=8$ 。为了说明 TS 算法的有效性和可靠性,本算例同时编写了遍历寻最优结构与 TS 算法得到的最优结构进行比较。计算结果如表 1。算例 2 配电网有 69 个节点,74 条支路,其中也有五条为联络支路,同样,取额定电压为 12.66 kV,TS 表的深度取 12,实验解个数 $S_{\max}=10$, $K_{\max}=8$ 。计算结果如表 2。

表 1 33 节点配电网重构结果

Tab.1 33-bus calculation results based on improved tabu search

	重构前	重构后		
		遍历法找到的最优结构	TS 算法找到的最优结构	扩展寻找到的最优解
联络开关支路	8-21、9-15、12-22、18-33 和 25-29	7-8、11-12、14-15、 25-29、32-33	7-8、11-12、14-15、 25-29、32-33	9-10、14-15、 7-8、25-29 和 32-33
有功损耗/MW	0.2027	0.1412	0.1412	0.1396
有功降损/(%)	-	30.34	30.34	31.13
最低节点电压/pu	0.9130	0.9137	0.9137	0.9141
首次达到最优解的迭代次数	-	243	4	4

表 2 69 节点配电网重构结果

Tab.2 69-bus calculation results based on improved tabu search

	重构前	重构后		
		遍历法找到的最优结构	TS 算法找到的最优结构	扩展寻找到的最优解
联络开关支路	11-66、13-20、15-69、 27-54 和 39-48	11-66、13-20、14-15、 53-54 和 47-48	11-66、13-20、14-15、53-54 和 47-48	1-66、13-20、14-15、46-47 和 50-51
有功损耗/MW	0.2268	0.1180	0.1180	0.1010
有功降损/(%)	-	47.97	47.97	55.47
最低节点电压/pu	0.9090	0.9426	0.9426	0.9468
首次达到最优解的迭代次数	-	243	3	4

由表 1、表 2 可以看出, 重构后的网络损耗大大降低, 网络的最低电压值明显提高。同时, 用 TS 算法得到的最优结构与采用遍历法寻找到的最优结构完全相同, 这说明 TS 算法可以可靠搜索到全局最优结构, 但采用 TS 算法仅使用 3 次和 4 次就找到了最优的结构, 搜索效率大大提高。

另外, 本文将该算法还同文献 [9]、文献 [15] 提出的 Tabu 方法进行了比较, 结果如表 3。

表 3 不同编码策略的比较

Tab.3 Contrast for different coding strategy

迭代次数		算例 1	算例 2
文献[9]的迭代次数		10	15
文献[15]的迭代次数		8	12
本文的迭代	TS 算法	4	3
次数	扩展搜索	4	4

由表 3 可以看出, 文献 [15] 提出的算法性能略优于文献 [9]。本文方法与文献 [15] 比较, 在算例 1 中, 文献 [15] 需要 8 次迭代, 邻域构造为 10 个, 需进行 80 次潮流计算才能得出最优结果。而本文 TS 算法的迭代次数为 4, 邻域构造为 10 个, 扩展搜索次数为 4, 潮流计算次数为 $4 \times 10 + 4 = 44$ 次, 可见本文提出的算法迭代次数大大小于文献 [15]。算例 2 的数据更能体现出本文算法的优越性。

4 结论

1) 由于把同步开关法的思想引入到 TS 算法编码策略, 大大降低了不可行解的数量, 提高了搜索

的效率。

2) 通过与遍历算法寻最优结构的比较, 证明了本文算法收敛到全局最优结构的可靠性。

3) 基于最优结构基础上的扩展搜索, 可以快速找到全局最优解, 因此本文提出的新算法可以快速、有效地解决配电网重构问题。

参考文献

- [1] 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]. Proceeding of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [2] 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 Network[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85.
- [3] Kashem M A, Ganapathy V, Jasmon G B. A Novel Approach for Network Reconfiguration Based Load Balancing in Distribution Networks[J]. Electric Machines and Power Systems, 2000, 28: 415-437.
- [4] 钱国基. 配电网重构的改进同步开关法[J]. 自动化博览, 2003, (4): 79-82.
QIAN Guo-ji. An Improved Synchronous Switch for Distribution Network Reconfiguration[J]. The Automation Reads Extensively, 2003, (4): 79-82.
- [5] Hammadi D S, Hong H W. Reconfiguration of Electric

- Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2).
- [6] 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 You-man, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. An Improved Optimal Flow Pattern Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Power System Technology, 1995, 19(7): 47-50.
- [7] 梁勇, 张焰, 候志俭. 遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(4): 29-34.
LIANG Yong, ZHANG Yan, HOU Zhi-jian. Application of Genetic Algorithm in Power Distribution System Reconfiguration[J]. Proceedings of the EPSA, 1998, 10(4): 29-34.
- [8] 周青山, 向铁元, 罗亚, 等. 基于改进遗传算法的配电网重构[J]. 电力科学与生命, 2004, (1): 20-24.
Zhou Qing-shan, XIANG Tie-yuan, LUO Ya, et al. Electric Power Science and Engineering 2004, (1): 20-24.
- [9] 陈根军, 李继洸, 唐国庆. 基于 Tabu 搜索的配电网重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 12(10): 28-33.
CHEN Gen-jun, LI Ji-guang, TANG Guo-qing. A Tabu Search Approach to Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction[J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 12(10): 28-33.
- [10] 左飞, 周家启. TS 算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 66-69.
ZUO Fei, ZHOU Jia-qi. Application of Tabu Search Algorithm in Distribution Network Reconfiguration[J]. Proceedings of the EPSA, 2004, 16(1): 66-69.
- [11] 卢耀川, 廖迎春, 陈星莺, 等. 基于模拟退火法的网络重构技术[J]. 电力自动化, 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.
- [12] 张步涵, 沙立华, 曾次玲. 基于随机生成树的配电网重构模拟退火算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(6).
ZHANG Bu-han, SHA Li-hua, ZENG Ci-ling. Simulated Annealing Algorithm Based on Random Spanning Tree in Distribution Network Reconfiguration[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2005, 33(6).
- [13] 王秀丽, 吴宏晓, 别朝红, 等. 以提高系统可靠性为目标的配电网重构[J]. 中国电力, 2001, 34(9): 40-43.
WANG Xiu-li, WU Hong-xiao, BIE Zhao-hong, et al. Distribution System Reliability and Network Reconfiguration[J]. Electric Power, 2001, 34(9): 40-43.
- [14] 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. 273-277.
LIU Jian, BI Peng-xian, DONG Hai-peng. Simplification and Optimization on Complicated Distribution Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. 273-277.
- [15] 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): 23-27.
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): 23-27.

收稿日期: 2006-11-05; 修回日期: 2007-01-17

作者简介:

张忠会(1962-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制;

李曼丽(1982-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制、配网自动化; E-mail: civilaviation@hotmail.com

熊宁(1975-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行。

(上接第 40 页 continued from page 40)

- [12] 杨光亮, 乐全明, 郁惟镛, 等. 基于小波神经网络和故障录波数据的电网故障类型识别[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 99-103.
YANG Guang-liang, YUE Quan-ming, YU Wei-yong, et al. A Fault Classification Method Based on Wavelet Neural Networks and Fault Record Data[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 99-103.
- [13] 乐全明, 董志赞, 郑华珍, 等. 基于时态逻辑技术的高压输电线系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 38-43.

YUE Quan-ming, DONG Zhi-yun, ZHENG Hua-zhen, et al. Fault Diagnosis Based on Temporal Logic Technology in HV Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 38-43.

收稿日期: 2006-10-18; 修回日期: 2006-12-04

作者简介:

桂强(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: guiqiang@sjtu.edu.cn

刘意川(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护;

张沛超(1970-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统及其自动化的教学和研究工作。