

基于网损灵敏度和禁忌搜索的配电网重构方法

余林¹ 江东林², 王鑫¹

(1. 国网衡水供电公司, 河北 衡水 053000; 2. 国网德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 为应对配电网重构中频繁改变开关状态并多次进行潮流计算的寻优效率低下、无法全局寻优等缺陷, 以降低配电网运行网损为目标, 提出了基于网损灵敏度及禁忌搜索的重构新方法。该方法通过定义网损相对开关状态的网损灵敏度指标, 按启发式规则依次开闭开关并进行潮流计算可得到网损灵敏度开关排序表, 以此为基础为禁忌搜索算法构造合理搜索邻域, 在利用禁忌搜索全局寻优后最终可得到网路最佳重构方案且寻优时间满足应用需求, 最后通过算例验证了该方法的有效性。

关键词: 配电网重构; 网损灵敏度; 禁忌搜索

Abstract: In order to deal with the poor efficiency and locally optimal solutions in reconfiguration of distribution network, which is caused by frequently state change of switches and multiple call of power flow calculations, a new reconfiguration method based on loss sensitivity and tabu search is proposed to reduce the active power loss. Firstly, the loss sensitivity index is defined by loss and switching state, and then a stored switch list can be obtained by power flow calculation and loss sensitivity index. On this basis, a reasonable search neighborhood is constructed by tabu search algorithm, the best available network reconfiguration scheme can be obtained after the global optimization by tabu search, and the optimization time can meet the application requirements. The results of calculation examples show that the proposed method is effective.

Key words: reconfiguration of distribution network; loss sensitivity; tabu search

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0037-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.009

0 引言

随着坚强智能电网发展规划的提出及逐步推进, 配电自动化已在国内多个城市试点建设, 而配电网重构作为配电自动化系统的重要功能^[1-2], 其对于提高配电网运行的经济性有着重要意义。

目前针对网络重构的研究主要以降低网损^[3-4]、提高静态电压稳定性及均衡支路传输功率等为目标^[5-6]。不论选取何种目标函数, 采用方法通常是在每次网络拓扑改变后进行一次潮流计算, 进而对整个网络的网损、电压及负载率等指标进行评估, 而根据所采用方法不同其在寻优过程中通常会多次重复改变网络拓扑^[7-8], 从而导致多次重复的潮流计算, 降低算法的效率。

在配电网中根据各物理量间的相对变化关系, 可构造多种灵敏度指标^[9-10]。在灵敏度分析中, 按照各变量的数学作用, 可分为参数变量、状态变量、控制变量及输出变量等4类。实际运行中, 当控制变量发生微小变动时, 输出变量或状态变量均会发

生一定程度的微小变化, 用二者之间的这种微分关系来表示这种变化趋势, 即称为灵敏度指标。综上, 若能够通过求取单个开关变动导致的某一指标变化的灵敏度, 则可大大提高配电网重构的效率。

下面以降低配电网运行网损为目标, 在构造网损相对开关状态灵敏度指标的基础上, 通过启发式开关打开策略, 利用网损灵敏度排序后可得到的以网损为据的开关排序表, 构造合理搜索邻域后利用禁忌搜索全局寻优, 得到网络最佳重构方法且寻优时间满足应用需求。

1 配电网重构模型

1.1 目标函数

选择配电网运行的有功网损作为重构的目标函数, 配电网有功损耗可表示为

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^m R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (1)$$

式中: F 为系统网损; m 为闭合系统支路数; i 为支路编号; R_i 为支路 i 的电阻; P_i 和 Q_i 分别为支路 i 末

端传输的有功功率和无功率; V_i 为支路 i 的末端节点电压。

1.2 约束条件

重构后的网络应满足如下约束条件:

1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为系统节点数; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 有功和无功注入功率; V_i 为节点 i 电压; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为导纳矩阵的实部和虚部; $Q_{ij} = Q_i - Q_j$ 是 i 、 j 两节点电压的相位差。

2) 节点电压约束

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (3)$$

式中: V_{imax} 和 V_{imin} 分别为节点 i 电压的上下限。

3) 支路电流约束

$$I_i \leq I_{imax} \quad (4)$$

式中: I_{imax} 为支路 i 电流上限。

4) 辐射型网络约束

对单一网络而言,其节点与闭合支路的数量关系可表示为

$$m + 1 = n \quad (5)$$

2 网损灵敏度和禁忌搜索的配电网重构

2.1 网损灵敏度

基于网损灵敏度(power loss sensitivity, PLS)的配电网重构以网损相对于单个开关状态变化的变化量为基础,在拓扑分析校验网络连通约束后,经潮流计算对各开关引起的网损进行排序,最后依次选择网损最小的开关打开,直至网络满足辐射状约束,其中网损灵敏度定义如式(6)所示。

$$\Delta P_{loss} = \frac{\partial P_{loss}}{\partial x_i} \Delta Z_i \quad (6)$$

式中: x_i 为支路 i 的开闭状态; Z_i 为支路 i 的阻抗。

基于 PLS 的配电网重构总体流程如图 1 所示。算法详细步骤如下:

1) 读取网络基本参数,对 n 节点 M 支路的网络,生成确定开关状态表(decided switch status table, DSST)和临时开关状态表(temporary switch status table, TSST)用于记录所有 M 个开关开闭状态。DSST 和 TSST 均为 $1 \times M$ 行向量,其第 i 个元素为 0 或 1 分别代表开关 i 打开或闭合,将 DSST 所有元素

值置为 1。

2) 令 $j = 1$ 。

3) 令 TSST 等于 DSST,若 TSST 中第 j 个元素为 1 则将其变为 0;根据 TSST 代表的开关状态进行拓扑分析,校验网络中是否存在孤岛;若存在则转至步骤 5),否则转至步骤 4)。

4) 进行潮流计算,记录开关 j 打开的网损。

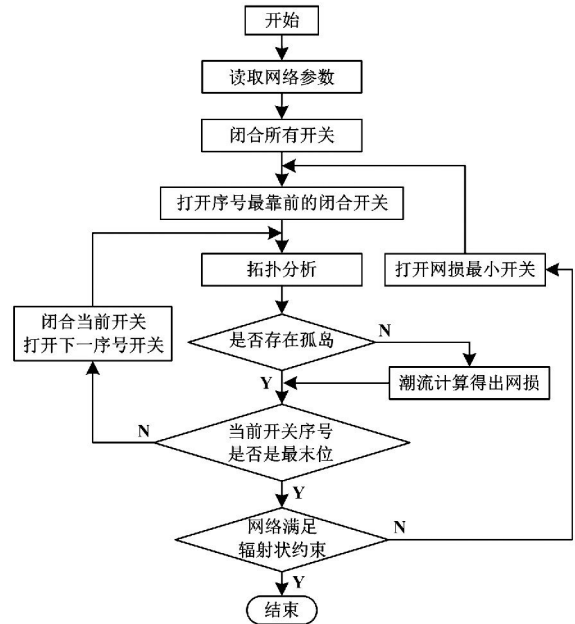


图 1 算法流程

5) 令 $j = j + 1$; 校验 j 是否大于 M , 若不大于转至步骤 4); 否则转至步骤 7)

6) 选择网络最小的开关,若为开关 k ,则将 DSST 的第 k 个元素置为 0; 根据 DSST 校验网络是否满足辐射状约束,即 DSST 中值为 1 的元素个数是否大于等于 n ,若不满足则进行步骤 2),否则转至步骤 7)。

7) 给出计算结果,退出。

综上所述,PLS 作为配电网重构中一种与最优流法(optimal flow pattern, OFP)相似的启发式方法,其从初始开关状态到最优网络拓扑的搜索是一个逐步确定打开开关的过程。最优流法每次选取某一环网中流过电流最小一开关打开,其对于非均一网络并不能代表网损最小,而网损灵敏度法则采用更为明确的网损指标。在每一轮迭代寻优中,网损灵敏度分析是基于当前已打开开关并寻找下一个最佳打开开关,其受到上一轮打开开关影响,而本轮打开开关结果也将影响下一轮网损灵敏度分析结果。因此,寻优过程必定受到开关打开的先后次序影响,而基于网损灵敏度的标准配电网重构方法对于打开先后次序没有明确

的启发式规则,故不能保证全局最优。

2.2 网损灵敏度和禁忌搜索的配电网重构

禁忌搜索算法(tabu search, TS)^[11-12]是对局部领域搜索的一种扩展,属于全局迭代寻优算法。TS的独特思想是对一段时期内已搜索的局部最优解进行标记,并在后续迭代搜索中尽量避开这些对象。由于TS保证对不同有效途径的探索并一定程度提高寻优效率,因此其在电力系统中经济调度、检修计划、无功优化及电网规划等方面得到了广泛应用。

在TS中,其主要参数包括邻域、禁忌表、禁忌长度、候选解、特赦规则、终止规则,于是在PLS基础上提出一种用于配网重构的网损灵敏度禁忌搜索法(power loss sensitivity tabu search, PLSTS),其利用PLS已找到的局部最优解构造合理的搜索空间,采用TS进行全局搜索以找到网损最小的开关组合方案,其具体步骤如下:

1) 构造邻域

对n节点M支路的网络,要保持网络辐射状需打开M-n+1个开关,采用2.1节网损灵敏度法进行网络重构,以其找到的最优解作为禁忌搜索的初始解,初始解邻域包括如下两部分:①取网损灵敏度法在寻优过程中会形成M-n+1个按网损大小的开关排序表。选择各排序表的前若干个开关。

②对作为初始解的M-n+1开关而言,当闭合其中某一特定开关时原网络必然形成一个环网,取环网中与特定开关相邻的若干个开关。

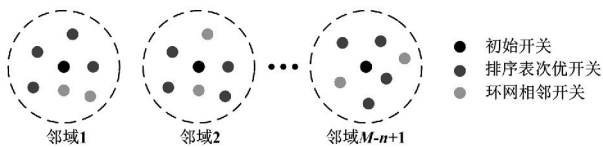


图2 邻域构造示意图

综上所述,通过囊括开关排序表中的网损次优开关及实际连接关系上的相邻开关并构造邻域,可尽量扩大搜索空间已保证搜到全局最优解。

2) 禁忌表

将一段时期内已搜到局部最优解的打开开关记录在禁忌表中,当禁忌搜索每次从邻域中搜到新解时,均利用禁忌表判断其禁忌属性,在不属于禁忌对象的情况下再进行潮流计算以得到其网损,可避免大量重复的潮流计算。

3) 特赦规则

比较当前搜索点的开关状态的网损值与目前为

止搜索到的最优开关状态的目标函数值,若前者更大,则满足特赦规则。

4) 终止条件

以如下作为PLSTS的终止条件:

①设定禁忌对象的最大禁忌频率,即开关状态及网损禁忌频率超过某一阈值;

②当达到指定迭代次数最优解未发生改变或达到最大迭代次数。

3 算例分析

IEEE 33节点系统有33个节点、37条支路,其中支路33~37属联络开关在正常运行时打开,系统总负荷为5 084.26 kW和2 547.32 kvar,系统如图3所示,网络参数见附录。

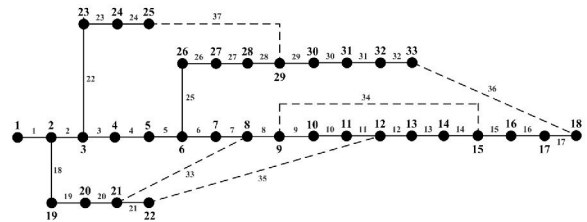


图3 IEEE 33节点配电网系统

首先采用PLS对该网络进行重构,通过5轮启发式寻优后,得到最佳重构方案如表1。为进行比较,同时采用OFP对该网络进行重构后的方案如表1。

表1 网损灵敏度法及最优流法最佳重构方案

状态	打开开关	网损/kW	耗时/s
初始状态	33 34 35 36 37	202.7	
OFP	7 10 13 14 37	138.7	0.287
PLS	7 10 13 28 34	137.7	3.650

由表1可知,相对于PLS,OFP在每轮选择最优打开开关时仅进行一次潮流计算,故在计算效率上优于PLS,但其重构方案的网损较PLS略大。由于两种方案均不属于全局寻优算法,故其重构方案的网损均高于IEEE 33系统最低网损。

以PLS最佳重构方案为TS搜索初始解,按2.2节选择各开关排序表前5个开关及网络中与初始解左右相邻的开关,剔除重复开关后共同组成的初始解搜索邻域如表2所示。为进行比较同时采用对交叉及变异概率做出自适应改进的改进遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)进行计算,其中改进遗传算法种群数为100。

表2 初始解搜索邻域

邻域	可选开关集合
邻域1	6 7 8 9 10 11 13 33
邻域2	9 10 11 13 34
邻域3	12 13 14 15 34
邻域4	8 9 14 15 16 17 34
邻域5	25 26 27 28 29 37

采用 PLSTS 得出的重构方案及对应网损如表 3 所示。由表 3 中内容对比可知, OFP 及 PLS 虽用时较少, 但由于其采用启发式规则, 未进行全局搜索故不能找到全局最优解。IGA 和 PLSTS 均找到网损 137.65 kW 的最优重构方案, 但由于 IGA 搜索空间较大且属随机搜索, 故用时超出 PLSTS 的 5.5 + 3.65 s, 所提方法用时分为两阶段, 其中 3.65 s 用于 PLS 生成开关排序表, 5.5 s 为禁忌搜索所用时间。

表3 配电网简化处理

	打开开关	网损/kW	耗时/s
OFP	7 10 13 14 37	138.91	0.287
PLS	7 10 13 28 34	137.67	3.650
PLSTS	7 11 14 28 34	137.65	3.65 + 5.5
IGA	7 11 14 28 34	137.65	43

采用所提重构方案后, 系统各节点电压如图 4 所示, 其中 PLSTS 搜索过程中最优解如图 5 所示。由图 5 与 IGA 对比可知, PLSTS 由于搜索初始值网损已很低, 故在搜索过程中不能明确看出网损下降趋势, 但在约迭代 60 次时找到最佳重构方案; 而 IGA 由于搜索空间较大且属随机搜索, 搜索效率较低, 在迭代 100 次时仍未找到最佳重构方案, 因此 PLSTS 由于合理构造邻域, 使得在未降低搜索解质量的情况下搜索效率优于改进遗传算法的随机搜索。

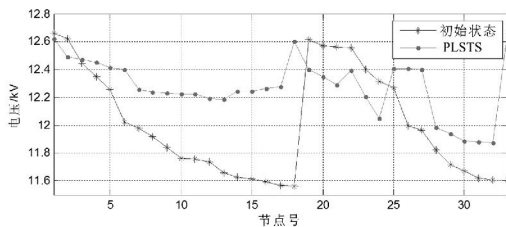


图4 重构后系统节点电压

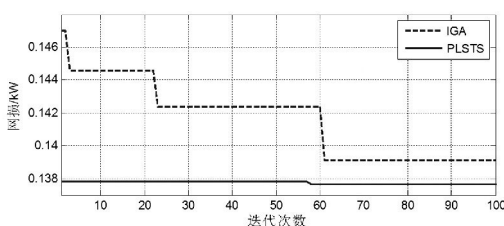


图5 最优解搜索过程

4 结 论

1) PLS 作为一种启发式方法, 其利用网损灵敏度排序用于配电网重构问题相对 OFP 虽用时较多, 但满足实际需求, 求解质量更高。

2) PLSTS 在 PLS 网损灵敏度排序表基础上可为全局搜索构造更合理的搜索邻域, 以避免 PLS 启发式方法陷入局部最优, 其用于节点较多的实际配电网重构时, 在求解时间及求解质量上具有明显的优势。

参考文献

- [1] 李伟, 车方毅, 李鹏. 湖北电网配电自动化建设思路[J]. 湖北电力, 2012, 36(6): 22-23.
- [2] 郑毅, 刘天琪, 洪行旅, 等. 中心城市大型配电自动化设计方案与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 62-66.
- [3] 魏玉仁, 杨玉华, 王磊, 等. 基于二进制粒子群算法的配电网重构[J]. 电工电气, 2012(3): 33-35.
- [4] 肖蔚, 伍伟斌, 廖兰珍. 基于改进模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 电工电气, 2012(6): 22-25.
- [5] 刘健, 武晓朦, 余健明. 考虑负荷不确定性和相关性的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 54-59.
- [6] 江东林, 刘天琪, 李樊. 采用动态时段划分和分层优化策略的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 153-157.
- [7] 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.
- [8] 李振坤, 陈兴莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.
- [9] 袁骏, 段献忠, 何仰赞, 等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 7-10.
- [10] 姜勇, 周双喜, 朱凌志. 基于系统网损灵敏度的二阶指标研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(20): 16-18.
- [11] 王明兴. 连续禁忌搜索算法改进及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [12] 董百强. 基于禁忌搜索算法的配电网重构研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

作者简介:

余 林(1985), 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统调度及其自动化;

江东林(1986), 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

王 霆(1986), 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期: 2015-04-22)