

灵敏度分析与支路交换法相结合的配电网重构算法研究

李启旺¹, 袁荣湘¹, 丁伟¹, 杨德尚¹, 王柳², 季宏², 季钢²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 针对大型城市配电网结构复杂、负荷密集、不均衡、功率损耗高等特点, 提出了一种基于灵敏度与支路交换法相结合的配电网重构算法。第一步用线路损耗对支路导纳的灵敏度来近似计算打开开关引起的网络有功损耗增量, 以此确定应打开的环路上的支路开关; 结合第一步的计算结果, 第二步运用启发式规则进行支路交换, 从而减少单独运用一种方法的不足, 提高优化效果。算法兼顾了计算量与优化效果。算例表明: 基于灵敏度和支路交换相结合的配电网重构算法正确有效, 且计算量少、速度快, 易于实时运用。

关键词: 配电网重构; 网损最小; 灵敏度; 支路交换

A comprehensive method for distribution network reconfiguration based on sensitivity analysis and branch-exchange algorithm

LI Qi-wang¹, YUAN Rong-xiang¹, DING Wei¹, YANG De-shang¹, WANG Liu², JI Hong², JI Gang²

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

2. Zhumadian Electric Power Corporation, Zhumadian 463000, China)

Abstract: Considering the characteristics of large city distribution network, such as network complexity, concentrate load, asymmetric, high power loss, this paper proposes a reconfiguration algorithm of distribution system based on the combination of sensitivity and branch exchange. First step, it uses the real power loss sensitivity with respect to the conductance of candidate branches to decide the real power loss which decides which loop switch should be opened. Second, combining with the result of first step, it carries out branch exchange by using heuristic rule to reduce the defect due to using a method independently and improve the optimization effect. The algorithm takes both methods into consideration and it has given dual attention to the amount of computation and the optimized results. The example indicates that the distribution network reconfiguration algorithm based on the sensitivity and branch-exchange with fewer calculated amount and greater speed is correct, effective and easy real-time application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50677046).

Key words: network reconfiguration; loss minimization; sensitivity; branch exchange

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0062-04

0 引言

配电网通常为环状设计, 辐射状运行, 因此配电网能利用自身的特点进行网络重构优化, 而且不需要额外的硬件投资。理论上, 存在一个最优结构, 使网络损耗达到最小。配电网重构的目的就是要寻求使网络损耗最小的最优结构, 同时满足实际运行约束。

目前, 求解配网重构的方法主要有支路交换算法^[1]、最优流模式算法^[2], 以及模拟退火算法(SA)^[3]、神经网络法^[4]、禁忌算法^[5]、遗传算法(GA)^[6]等智能

化算法。支路交换算法和最优流模式算法具有简单、直观的优点, 但计算精度较差, 无法保证全局最优性。SA和GA等智能算法能以较大的概率保证收敛到全局最优解, 但重构过程中潮流计算次数多, 计算量很大, 优化速度慢^[7]。此外, 在优化过程中还要防止“环网”及“孤岛”节点的出现, 这使算法操作更加困难、效率进一步降低。

对于大型城市配电网而言, 其结构复杂、负荷密集, 节点数目庞大, 使智能算法计算更加复杂, 计算量大大增加, 优化速度显著下降, 这类方法难以实时应用。针对上述问题, 结合传统的优化方法简单快速的优点, 本文提出了一种基于灵敏度与支路交换相结合的配电网重构算法, 兼顾优化效果

基金项目: 国家自然科学基金(50677046)

和计算量。追求优化效果最好的同时, 减少计算量, 加快优化速度。

1 配电网重构的数学模型

配电网经济运行应该使运行成本低, 同时满足 1) 电压不能越限; 2) 线路不能过载; 3) 网络为辐射状且无“孤岛”。考虑以上约束, 本文以网络损耗最小为目标函数, 以待重构支路导纳作为自变量, 网络重构的数学模型可描述为

$$\min P_{\text{loss}} = f(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n_b} V_i \sum_{j=1}^{n_b} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

$$\mathbf{u} \in [G_{ij}, B_{ij}]^T, \quad \mathbf{x} = [V_i, \delta_{ij}]^T \quad i, j=1, 2, \dots, n$$

n_b 为支路总数。限制条件:

$$\mathbf{g}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = [\Delta P_i, \Delta Q_i]^T = 0 \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= P_{is} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ \Delta Q_i &= Q_{is} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$h_{\min} \leq h(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \leq h_{\max} \quad (4)$$

式(2)、式(3)为潮流方程, 式(4)为节点电压线路电流等约束条件, 配电网重构还应当满足配电网辐射状运行且无孤岛约束条件。

灵敏度方法在电力系统诸多领域中得到了广泛的应用^[8-9]。根据灵敏度大小, 指导控制自变量的输入, 达到控制因变量输出的目的。灵敏度指标可以改善系统的安全性能, 提高系统稳定裕度和经济性指标。从时间角度灵敏度算法可划分为静态灵敏度和轨迹灵敏度两类, 静态灵敏度分析是在系统运行的一个静态工作点去考察自变量变化对因变量的影响, 它是稳态分析中非常重要的方法。这里采用静态灵敏度分析, 以支路上的导纳作为自变量, 以网络有功损耗作为因变量, 则网损对导纳的灵敏度为

$$S_{fu} = \frac{\partial p_{\text{loss}}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{u}} \quad (5)$$

式中: $\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{u}}$ 未知, 可以从潮流方程中求出。

$$\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{u}} = 0 \quad (6)$$

可知式(6)为线性方程组, 式中 $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}}$ 即牛拉法潮流中的雅可比矩阵, 可从潮流求解中得到。所以

$$S_{xu} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \left(-\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right) \quad (7)$$

即节点电压对支路导纳的灵敏度, 代入式(5)

$$S_{fu} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \cdot S_{xu} \quad (8)$$

所以

$$\Delta P_{\text{loss}} = S_{fu} \cdot \Delta \mathbf{u} \quad (9)$$

根据式(9)近似计算打开某支路开关引起的网络损耗增量, 其结果比较准确的反应了此支路对网损影响程度的相对大小, 从而指导重构开关操作。

2 灵敏度与支路交换法相结合的配电网重构算法

用灵敏度来计算网损增量, 将支路导纳看作是连续可变的, 是一种近似的计算方法。由于在网损增量中灵敏度的大小起主导作用, 通常能得到最优或接近最优的结果。支路交换法以网络初始结构为基础, 分别对各个环网进行开关操作, 每次只能考虑一个环路的一对开关, 重构结果依赖于网络初始结构。本文将灵敏度与支路交换法相结合。优化分两步进行: 第一步运用灵敏度对网络进行优化重构; 第二步则根据支路交换的思想在第一步的优化的基础上进一步优化, 从而提高优化效果。

2.1 基于灵敏度的配电网重构流程

首先, 合上配电网中所有的联络开关, 配电网中形成若干个环网。为了满足配电网辐射状的要求, 必须打开环路上的分段开关。然后根据式(9)计算网损对环路上各支路导纳的灵敏度和打开此开关引起的网损增量, 选择其中网损增量最小的一个支路开关打开。并记录与引起网损增量最小的支路同环路上的网损增量次小的支路。通常重构有改善电压和平衡负荷的作用, 在重构的过程中电压一般不会越限, 因此可以不检查电压约束。

每打开一个开关, 就有一个环路被解开, 此环路就可能出现一些支路不属于任何环路上。这些支路在下一轮计算时不需要考虑, 否则打开这些分段开关就会出现孤岛, 不满足网络拓扑结构要求。删除这些候选支路, 不仅保证了每一次打开开关后不会出现孤岛, 而且大大减少了计算量, 提高了程序的执行效率。

打开一个支路开关后, 检查网络是否满足辐射状要求, 若满足, 则计算结束; 若不满足, 则重新计算潮流, 更新节点电压, 作为下一次灵敏度和网损增量计算的初始条件。重复上述步骤, 直到网络变成辐射状。其流程图如图1。

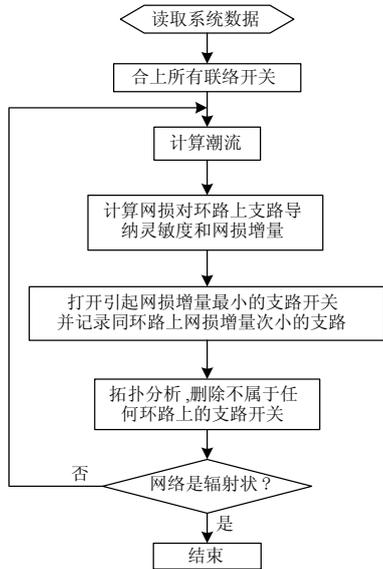


图 1 基于灵敏度重构流程图

Fig.1 Flow chart of reconfiguration in first stage

2.2 支路交换法

支路交换法^[14]首先计算配网的初始潮流和网损, 利用潮流计算的结果将负荷表示成恒定电流, 每次只合上一个联络开关, 在配网中形成一个环网; 再选择环网中一个分段开关并将其打开。由于配电网中候选开关对的数量很大, 对应的可行的网络结构也很大, 为了减少计算量, 在重构过程中采用一些启发式规则: 认为只有当联络开关的两端存在明显的电压差, 且负荷从电压低的一侧向电压高的一侧转移时, 才可能导致网损减少^[10]。设母线m和母线n之间的线路有一联络开关Sm-n, 负荷转移的网损近似变化公式:

$$\Delta P = \operatorname{Re}\{2(\sum_{i \in D} \dot{I}_i)(\dot{E}_m - \dot{E}_n)^* + R_{\text{loop}} |\sum_{i \in D} \dot{I}_i|^2\} \quad (10)$$

其中: D为转移的负荷的母线集合; \dot{I}_i 为母线i在负荷转移前的复电流; R_{loop} 为环路上的所有线路上的电阻之和; \dot{E}_m, \dot{E}_n 分别联络开关两端的母线电压。研究表明, 对于绝大多数配电网, 沿线电压相角变化极小^[10], 因此式(10)可进一步简化为:

$$\Delta P = 2(\sum_{i \in D} I_i)(E_m - E_n) + R_{\text{loop}} |\sum_{i \in D} I_i|^2 \quad (11)$$

ΔP 小于零时, 网损减小; ΔP 大于零时, 网损增加。式(11)的第二项恒为正, 所以, 只有当 $E_m < E_n$, 且负荷由n侧向m侧转移时, 式(11)的第一项才为负值, 才可能引起网损减小。

第一步优化得到的网络作为第二步支路交换法的初始网络, 从而可以减少由于初始网络不合理

导致支路交换法陷入局部最优的可能。结合第一步的结果, 第二步只需考虑同一环路上引起网损增量最小和网损增量次小的一对开关交换。对于满足负荷从电压低的一侧向另一侧转移, 则按式(11)计算网损变化量, 若网损减小, 则进行支路交换, 否则不交换。重复上述步骤, 直到第一步优化后的网络中的所有的联络开关被处理。

3 算例

本文采用IEEE33母线^[11]的三相平衡系统作为算例1, 系统有37条支路, 5个联络开关, 额定电压为12.66 kV, 系统总负荷为3 715+j2 300 kW。

第一步: 基于灵敏度的优化。合上全网所有开关, 根据流程图1循环计算, 直到网络变成辐射状。第一步优化结果如表1。此时网络损耗为144.0 kW, 已接近最优结果。

表 1 基于灵敏度的优化结果

Tab.1 Optimization results based on the sensitivity

打开 开关顺序	网损增量最小		同环上网损增量次小	
	打开开关	网损增量/p.u	打开开关	网损增量/p.u
1	9-10	1.30E-07	10-11	1.17E-06
2	13-14	2.75E-06	12-13	1.75E-05
3	31-32	2.77E-06	17-32	5.01E-06
4	5-6	3.16E-05	6-7	4.35E-05
5	24-28	8.01E-05	5-25	8.48E-05

第二步: 基于支路交换法优化。结合第一步的优化结果表1, 比较各联络开关两端的电压, 判断开关对(S9-10, S10-11), (S13-14, S12-13), (S31-32, S17-32), (S5-6, S6-7), (S24-28, S5-25)是否交换开关状态。合上支路5-6的开关, 打开支路6-7上的开关, 此时打开的支路开关为: S9-10, S13-14, S31-32, S6-7, S24-28, 网损为140.3 kW, 在第一步优化的基础上减少了3.7 kW, 提高了优化效果。

表2 与其它文献的比较

Tab.2 Comparison between this paper's algorithm and those from other references

	重构前	支路 交换法	文献[12]遗 传算法	本文
打开开关集合	7-20	7-8	6-7	9-10
	11-21	7-20	9-10	13-14
	8-14	13-14	13-14	31-32
	17-32	31-32	31-32	6-7
	24-28	27-28	24-28	24-28
网损/kW	202.7	146. 0	140.3	140.3
最低电压/p.u	0.913 1	0.939 3	0.937 8	0.937 8
潮流计算次数	--	6	30*	6

*假设进化30代

此外, 本文还将其它文献中对IEEE33, IEEE69 母线重构优化的结果与本文优化结果相比较。为了保证可比性, 网损值是将文献[12,14]控制变量的优化结果代入本文所采用的潮流程序计算而得的。比较结果见表2。

算例2采用IEEE69母线三馈线系统^[13], 有69个节点, 74条线路, 5个联络开关。额定电压为12.66 kV, 系统总有功负荷为3 802.2 kW, 总无功负荷为2 694.6 kvar。优化结果如表3。

表3 IEEE69母线优化结果

Tab.3 Optimization results of IEEE69 bus

	打开开关集合	网损 /kW	最低电压 /p.u	潮流计 算次数
重构前	11-66, 13-20, 15-69, 27-54, 39-48	226.1	0.896 9	--
文献[14]	11-66, 13-20, 14-15, 44-45, 50-51	101.3	0.932 7	70*
本文	11-66, 13-20, 14-15, 44-45, 50-51	101.3	0.932 7	6

*假设进化70代

从表2和表3的结果对比中可知, 文中提出的算法有效、可行, 优化效果明显; 且潮流计算次数少。因为潮流方程是非线性方程, 需要反复迭代, 对整个计算速度影响很大; 式(6)为线性方程组, 且式(7)中的雅可比矩阵可以从潮流计算中得到, 所以灵敏度对整个计算速度的影响相对相小。从上述计算过程可以看出潮流计算次数约等于联络开关的数目。

通常而言, 计算量与优化效果是对立的, 保证全局最优, 就要牺牲计算速度。保证全局最优的优化算法通常要反复的计算潮流, 计算量很大。因此, 相对于传统算法和智能算法计算量大, 难以实时应用的缺点, 该算法兼顾了优化效果和计算量, 易于实用。

4 结论

(1) 以网损为目标函数的配电网重构对平衡各馈线的负荷、消除过载、提高电压质量有明显作用。

(2) 将灵敏度与支路交换法相结合, 减少了单独运用一种方法的不足, 提高了优化效果。同时也大大减少了支路交换的计算量。灵敏度计算中计算量最大的雅可比矩阵即牛顿-拉夫逊潮流法中的雅可比矩阵, 可直接从潮流计算中获取。该算法兼顾了优化效果与计算量, 潮流计算次数少, 优化速度快, 易于实时应用, 适合于大型城市复杂配电网的重构。不足之处在于其全局寻优能力相对偏弱。

参考文献

- [1] Civanlar S, Grainger J J, Lee S. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.
- [2] Shirmohammadi D, Hong H W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492-1498.
- [3] Chiang H D, Jumeau R J. Optimal network reconfigurations in distribution systems: part II solution algorithms and numerical results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(3): 1568-1574.
- [4] Kashem M A, Jasmon G B. Artificial neural network approach to network reconfiguration for loss minimization in distribution networks[J]. Electrical Power & Energy System, 1998, 20(4): 247-258.
- [5] 陈根军, 李继洪, 唐国庆. 基于 Tabu 搜索的配电网网络重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 28-33.
CHEN Gen-jun, LI K K, TANG Guo-qing. A Tabu search approach to distribution network reconfiguration for loss reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 28-33.
- [6] Lin W M, Cheng F S, Tsay M T. Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(6): 349-354.
- [7] 张红. 配电网网络重构算法比较[J]. 华北电力技术, 2002(5): 44-46.
ZHANG Hong. Comparison of distribution network reconfiguration algorithm[J]. North China Electric Power, 2002(5): 44-46.
- [8] 苗峰显, 郭志忠. 灵敏度方法在电力系统分析与控制中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(15): 72-76.
MIAO Feng-xian, GUO Zhi-zhong. A survey of sensitivity technique and its application in power systems analysis and control[J]. Relay, 2007, 35(15): 72-76.
- [9] Viswanadha Raju G K, Bijwe P R. An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1280-1287.
- [10] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Modern distribution system analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [11] 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): 1401-1407.

(下转第 70 页 continued on page 70)

一次验证了开关函数建模法也是一种好的建模方法。

参考文献

[1] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[2] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[3] 吴文辉, 刘会金. 静止同步补偿器(STATCOM)技术的研究现状与发展[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(2): 89-94.
WU Wen-hui, LIU Hui-jin. Research status and development of static synchronous compensator [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2005, 22(2): 89-94.

[4] Claudio A C, Massimo P, Sandro C, et al. STATCOM Modeling for voltage and angle stability studies[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(6): 431-441.

[5] 孙元章, 刘前进. FACTS 控制技术综述-模型、目标与策略[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 1-7.
SUN Yuan-zhang, LIU Qian-jin. A summary of FACTS control technology-model, objective and strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 1-7.

[6] 栗春, 姜齐荣, 王仲鸿. STATCOM 电压控制系统性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 46-50.
LI Chun, QIANG Qi-rong, WANG Zhong-hong. Voltage regulation stability analysis of STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 46-50.

[7] 郑超, 周孝信, 李若梅. 新型高压直流输电的开关函数建模与分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 32-2092.
ZHENG Chao, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Modeling and analysis for VSC-HVDC using the switching

function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 32-35.

[8] 李勋, 杨荫福, 陈坚. 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 37-40.
LI Xun, YANG Yin-fu, CHEN Jian. Switching function mathematical model of UPFC based on SPWM control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 37-40.

[9] 冯宇, 董海波, 唐轶. 基于开关函数模型的 TCSC 电容电压过零点特性研究[J]. 继电器, 2004, 32(17): 6-10.
FENG Yu, DONG Hai-bo, TANG Yi. Study of TCSC zero-crossing point characteristics of capacitor voltage based on switch function model[J]. Relay, 2004, 32(17): 6-10.

[10] 宋珊, 陈建业. 基于晶闸管的 STATCOM 原理和实现[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 49-54.
SONG Shan, CHEN Jian-ye. Theory and prototype verification of thyristor based STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 49-54.

收稿日期: 2009-06-21; 修回日期: 2009-11-02

作者简介:

詹厚剑 (1981-), 男, 硕士, 主要从事电网调度运行工作; E-mail: zhanhj1981@126.com

吴杰康 (1965-), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士后, 主要研究方向是电力系统运行与分析、电力系统优化技术、装备 FACTS 的电力系统电压稳定性、FACTS 调控与影响;

康海兵 (1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为舰船电力推进。

(上接第 65 页 continued from page 65)

[12] 王超学, 李昌华, 崔杜武, 等. 一种新的求解配电网重构问题的免疫遗传算法[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 25-29.
WANG Chao-xue, LI Chang-hua, CUI Du-wu, et al. A novel immune genetic algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 25-29.

[13] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-732.

[14] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网网络重构[J].

中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.

LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.

收稿日期: 2009-06-21; 修回日期: 2009-09-20

作者简介:

李启旺 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统的优化运行与控制; E-mail: lqwiia@163.com

袁荣湘 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护、互联电网/分布式电网安全稳定分析与控制方面的研究工作。