

辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法

李志民, 李卫星, 刘迎春

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

摘要: 提出一种辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法。该算法能有效地考虑系统的容量约束, 尤其适用于含大量馈线和隔离开关的复杂配电网络。利用树的后向父节点搜索技术确定故障所属断路器的动作, 利用树的广度优先遍历算法和深度优先遍历算法分别确定隔离开关的故障隔离范围及负荷点的故障类型。该算法根据配电系统的结构特点, 将树的先根优先遍历和后根优先遍历技术分别用于配电网潮流的功率前推和回代计算, 能较好地与可靠性评估算法相结合。经算例验证, 该算法能有效地考虑配电系统的各种网络拓扑结构, 提高可靠性评估的精度, 是一种较为实用的可靠性评估算法。

关键词: 复杂辐射状配电系统; 可靠性评估; 故障遍历; 前推回代法

中图分类号: TM732; TM727.2

0 引言

随着工农业的发展, 用电负荷量迅速增加, 输电网的负担日益加重, 线路常常工作在接近甚至超过额定值的工况下, 因此线路容量限制成了影响供电可靠性的重要因素之一。尤其是在有并联回路及负荷转移的情况下, 这个问题变得更加复杂, 需要利用潮流的计算结果来确定负荷的配额, 以及紧急故障情况下的线路过负荷量。

配电网一般为辐射状或运行在辐射状态。基本的可靠性评估方法是故障模式与后果分析法(FMEA), 即以每个线路元件为对象, 分析各个基本故障事件及其后果, 然后加以综合。这种方法的缺陷是没有考虑线路的实际传输容量限制, 使计算结果与实际相差很大。为了克服这个缺陷, 需要通过潮流计算来确定线路是否过载, 是否需要切除负荷使线路运行在安全极限范围内。由于要进行多次潮流计算, 所以如何充分利用配电网的结构特点, 使计算速度得到提高, 就成为一个算法是否优越的关键。因此, 对辐射状配电网的潮流计算成为一个研究的热点^[1~5], 其中比较有效的是面向支路的前推回代法。面向支路的前推回代潮流算法直接取用支路参数, 无需求解雅可比矩阵, 具有编程简单、收敛性好等优点。文献[4, 5]证明出在恒功率负荷的辐射状配电网潮流计算中具有与牛顿-拉夫逊法(N-R)相似的快速收敛性。

对于当今复杂的配电网结构, 故障模式后果表

的建立将十分复杂。尽管配电系统可靠性评估已提出了最小路法^[6]、网络可靠性等值法^[7, 8], 并具有相对的优越性, 但对最小路的求取和对子系统的多次连续等效均需花费大量的时间, 而且它们均做了很大程度的近似。文献[9]提出一种基于故障扩散的复杂中压配电系统可靠性评估算法。该算法以故障扩散算法为基础, 不需进行等值处理及“合并”与“分解”工作, 能一次性形成负荷点和系统可靠性指标。但该算法在前向搜索断路器时采用潮流计算, 大大增加了计算量, 所以还有待于提高。基于此, 本文给出了基于遍历技术的可靠性评估算法, 利用树的优先遍历搜索算法实现配电系统的潮流计算及可靠性评估, 该方法充分利用了配电网自身的结构特点, 使潮流计算与可靠性评估算法得以统一。

1 原理分析

该算法是基于故障枚举思想, 并利用遍历技术而发展成的一种可靠性评估方法。由各种枚举故障所引起的所有负荷点的故障类型是可靠性评估的核心, 而遍历技术是确定负荷点故障类型的手段。

1.1 负荷点故障类型的分类

任何故障事件(主要考虑线路、变压器和断路器等元件故障及其组合元件故障)发生后, 根据故障持续时间的不同, 将负荷点分成以下4类:

a类: 故障事件发生后开关正确动作而不受故障影响;

b类: 故障时间为隔离操作时间;

c类: 故障时间为隔离操作时间+切换操作时间;

d类;故障时间为元件修复时间。

1.2 负荷点故障类型的确定^[9]

1.2.1 确定故障的影响范围

当网络中某元件发生故障后,以该元件所在支路的表示节点为起点,顺序向后搜索父节点,直到首次出现断路器为止。则该馈线上断路器前的负荷点为b类、c类或d类(其类型的具体确定还需进一步分析),而其他负荷点(包括该馈线上动作断路器后的负荷点和其他馈线上的所有负荷点)为a类,即正常负荷点。

1.2.2 确定隔离开关的动作及其影响范围

当某一元件发生故障,断路器动作后,需要找到相应的隔离开关,将故障隔离起来,以便进行修复。采用广度优先遍历搜索法确定隔离开关的动作,为下一步确定负荷点的故障类型打下基础。

其基本思想是:元件发生故障后,依次遍历搜索其相邻节点,当遇到隔离开关(线路分段器)或达到线路末端时便终止该方向的搜索。进行可靠性计算时,先求出故障元件的1度节点,并判断是否遇到隔离开关,如果遇到则终止该方向的搜索;否则继续搜索故障元件的2度节点,并判断是否遇到隔离开关,如果遇到则终止该方向的搜索;否则继续搜索其3度节点,依次类推,直到该故障元件向任一方向遍历到隔离开关或线路末端时为止。显然,遍历到的节点(记为 S_d)均为d类节点。

1.2.3 形成各分块子系统

当系统中某一元件发生故障并被隔离后,系统可形成许多以动作断路器或隔离节点为根节点的分块子系统(子树)。分别从动作断路器节点用深度搜索法遍历各子系统,即可确定各分块子系统的节点集,进而形成各子系统的网络参数。

1.2.4 确定负荷点故障类型

由于动作断路器的后向节点(父辈节点)及与它们相连的子馈线节点(子孙节点)均不受该故障的影响,其故障类型为a类;而断路器的前向节点为b类、c类或d类。广度优先遍历搜索到的节点(即 S_d 中的所有节点)为d类;若分块子系统与电源相连,则该子系统的所有节点均为b类;若分块子系统未与电源相连,但有节点与倒换操作开关相连,则该子系统的所有节点均为c类;若分块子系统未与电源相连,也未与倒换操作开关相连,则该子系统的所有节点均为d类。

综上所述,确定负荷点故障类型的程序框图见图1。

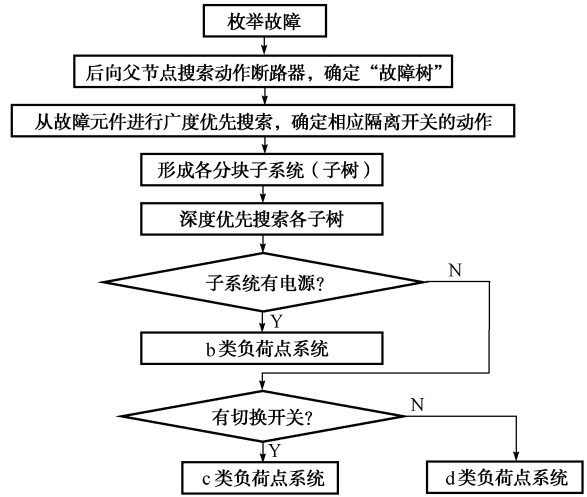


图1 确定负荷点故障类型的程序流程图
Fig. 1 Flow chart for determining the fault types of loads

的潮流算法,具有编程简单、占用内存小、数值稳定性好、计算效率高等优点。前推回代法有几种形式,其差别体现在有的方法以支路电流和节点电压为迭代变量,有的以支路功率和节点电压为迭代变量。本文根据配电系统可靠性评估的特点,采用以支路功率和节点电压为迭代变量来进行潮流计算。

2.1 以支路功率表示的前推回代法

首先定义几个术语。所谓父子节点,根据功率的流向划分,对一条支路来说,流入功率的节点为父节点,流出功率的节点为子节点。同父子节点的定义相似,父子支路定义如下:两条通过某节点相连的支路,沿着功率流动的方向,上游支路为父支路,下游支路为子支路。

需要指出的是,由于配电网呈辐射状,支路数与不计根节点的网络节点数相同。为表述方便,将支路号用其末端的节点号表示。

对于图2所示的配电网,节点 i 和 j 为父子节点,支路 i 和 j 为父子支路。显然,一个父支路可能有多个子支路,支路 i 的子支路的集合记为 C_i 。考虑到实际情况及编程方便,一般取3条子支路即可满足要求。

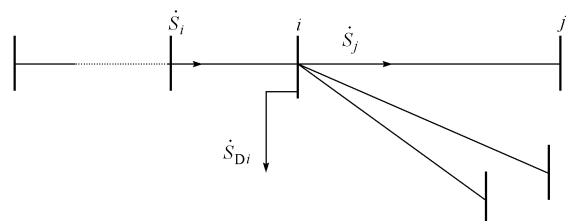


图2 简单辐射状配电网
Fig. 2 A simple radial distribution network

2 面向支路的配电网潮流计算

面向支路的前推回代法是一种结合配电网特点

用 P_i 和 P_j 分别表示支路 i 和 j 的首端功率, P_{Li} 和 Q_{Li} 分别表示支路 i 的有功损耗和无功损耗, P_{Di} 和 Q_{Di} 分别表示节点 i 的有功负荷和无功负荷, 支路 i 的第 k 次功率回代公式为:

$$P_i^{(k+1)} = P_{Di}^k + P_{Li}^{(k+1)} + \sum_{j \in C_i} P_j^{(k+1)} \quad (1)$$

$$Q_i^{(k+1)} = Q_{Di}^k + Q_{Li}^{(k+1)} + \sum_{j \in C_i} Q_j^{(k+1)} \quad (2)$$

式中,

$$P_{Li}^{(k+1)} = \frac{R_i}{(V_i^{(k)})^2} \left\{ \left[\sum_{j \in C_i} P_j^{(k+1)} + P_{Di}^k \right]^2 + \left[\sum_{j \in C_i} Q_j^{(k+1)} + Q_{Di}^k \right]^2 \right\} \quad (3)$$

$$Q_{Li}^{(k+1)} = \frac{X_i}{(V_i^{(k)})^2} \left\{ \left[\sum_{j \in C_i} P_j^{(k+1)} + P_{Di}^k \right]^2 + \left[\sum_{j \in C_i} Q_j^{(k+1)} + Q_{Di}^k \right]^2 \right\} \quad (4)$$

电压的前推计算公式为:

$$\dot{V}_j^{(k+1)} = \dot{V}_i^{(k+1)} - \frac{P_j^{(k+1)} R_j + Q_j^{(k+1)} X_j}{V_i^{(k+1)}} - j \frac{P_j^{(k+1)} X_j - Q_j^{(k+1)} R_j}{V_i^{(k+1)}} \quad (5)$$

电压幅值的前推计算公式为:

$$(V_j^{(k+1)})^2 = (V_i^{(k+1)})^2 - 2(P_j^{(k+1)} R_j + Q_j^{(k+1)} X_j) + \frac{(P_j^{(k+1)})^2 + (Q_j^{(k+1)})^2}{(V_i^{(k+1)})^2} (R_j^2 + X_j^2) \quad (6)$$

以支路功率表示的前推回代法的基本计算步骤如下:

- 置迭代次数 $k=0$, 给定根节点电压, 设定其他电压初值。
- 如考虑负荷静态特性, 计算负荷数据。
- 从各负荷点出发, 先子支路后父支路, 利用式(1)、式(2)计算功率分布。
- 从根节点出发, 前序遍历各节点, 利用式(5)计算节点电压分布。
- 判断是否满足收敛条件。若满足, 则停止迭代; 否则, 令 $k=k+1$, 进行新一轮前推回代。

2.2 潮流计算的遍历实现

从树的先根遍历和后根遍历的定义来看, 面向支路的前推回代法中的功率回代过程与树的后根遍历过程相同, 而节点电压的前推过程与树的先根遍历过程相同。所以借助树的遍历技术就可完成配电网潮流的前推回代计算。

功率回代过程可以用递归函数 Post-Root (GTreeNode* GT) 实现, 电压前推过程可以用递归函数 Pre-Root (GTreeNode* GT) 实现。

对树进行后根遍历, 从树的叶子节点出发, 利用

已知的负荷功率, 逐一计算式(1)和式(2), 即可求得根节点处的功率。再从根节点出发, 对树进行先根遍历, 用式(5)可求出各节点电压。这样完成一次前推回代计算。迭代重复进行, 直至满足收敛条件为止。

配电网由馈线组成, 每条馈线呈树状, 馈线与馈线之间除在根节点处通过高压输电网相连外, 没有其他电气联系。因此可以认为, 每条馈线的潮流分布由其本身的负荷及根节点处的电压决定, 与其他馈线无关, 即馈线间具有解耦性。根据这一特性, 配电网潮流计算可以以馈线为单位, 多条馈线并行计算。

3 算法流程

- 读入原始数据, 通过树的广义标准存储形式, 动态地表示配电网的拓扑结构;
- 枚举一故障事件;
- 用后向父节点搜索法确定故障范围, 形成“故障树”;
- 用广度优先遍历搜索法确定隔离开关的动作及其影响范围, 形成各子系统(子树);
- 用深度优先搜索法遍历各子系统(子树), 确定负荷点故障类型;
- 利用树的删除、子树插入和父向节点插入操作, 形成各故障子系统(子树);
- 根据上述各故障子系统的动态拓扑结构, 利用树的先根遍历和后根遍历技术计算含有备用电源和倒换操作开关的故障子系统潮流, 并进行线路容量和电压越限检查, 如果存在越限, 则以系统可靠性成本和用户停电损失成本之和最小为目标^[10], 对系统进行补偿或控制, 并采取就近切负荷措施;
- 根据网络各负荷点的故障类型和切负荷量进行可靠性指标计算;
- 检查故障事件是否枚举完毕, 如果未完, 转到步骤 b;
- 形成各负荷点、各馈线及整个配电系统的可靠性指标, 并输出计算结果, 为系统的运行、管理和规划部门及用户提供参考。

4 本算法对 IEEE DTRS Bus2 和 Bus6 的评估结果

评估时考虑了熔断器、隔离开关和备用电源的有无对可靠性指标的影响。Bus2 可靠性指标计算结果表明, 熔断器的有无对系统的可靠性影响非常大, 其次是隔离开关、倒换操作开关等。由此可知, 通过加装熔断器、隔离开关和倒换操作开关等装置, 对改变系统的可靠性极其重要。由于本文方法是基于树的动态存储结构及遍历算法实现的, 因而相对其他

方法来说,本文方法对配电系统可靠性的评估具有本质的优越性。尤其是用于系统的可靠性经济评价及配电系统的网络规划时,本文方法能利用树的添加和删除操作方便地改变配电网络的拓扑结构,动态地表示配电网络的各种结构,因而能更好地适应配电系统可靠性的实时评估和优化。

本文提出的可靠性评估的故障遍历算法能分别考虑系统各元件的故障及其对各负荷点的影响,不做任何近似,得出了更合理的结果。由于本文的潮流计算只需对含有备用电源和倒换操作开关的故障子系统进行,而且各子系统具有解耦性,所以本文的可靠性评估算法在考虑容量约束后,其计算量的增加相对较少,具有较高的计算速度。

5 结论

本文提出一种复杂辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法。该算法能有效考虑系统的容量约束,尤其对含有众多子馈线和众多隔离开关及备用电源的复杂辐射状配电系统,具有很强的处理能力。该方法用于系统的可靠性经济评价及配电系统的网络规划时,能利用树的添加和删除操作方便地改变配电网络的拓扑结构,动态地表示配电网络的各种结构,因而能更好地适应配电系统可靠性的实时评估和优化。

参考文献

- 1 郭永基, Kofi (Guo Yongji, Kofi). 考虑容量约束的配电系统可靠性评估 (Reliability Evaluation of Distribution System with Consideration of Capacity Constraint). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(17): 48~51
- 2 Luo G X, Semlyen A. Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Network. IEEE Trans on PS, 1999, 5(4): 1309~1216
- 3 Ghosh D D. Method for Load-flow Solution of Radial Distribution Networks. IEE Proceedings—Generation,

Transmission & Distribution, 1999, 46(6): 641~648

- 4 孙宏斌, 张伯明, 相年德 (Sun Hongbin, Zhang Boming, Xiang Niande). 配电网潮流前推回代法的收敛性研究 (Study on Convergence of Back/Forward Sweep Distribution Power Flow). 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1999, 19(7): 26~29
- 5 刘莉 (Liu Li). 基于模糊遗传算法的配电网络优化方法的研究: [博士学位论文] (The Research on Optimization Approach of Distribution Network Based on Fuzzy Genetic Algorithm, Doctoral Dissertation). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Harbin: Harbin Institute of Technology), 2000
- 6 别朝红, 王锡凡 (Bie Zhaozhong, Wang Xifan). 配电系统的可靠性分析 (Reliability Analysis of Distribution Networks). 中国电力 (Electric Power), 1997, 30(5): 10~13
- 7 Billinton R, Wang Peng. Network-equivalent Approach to Distribution-system-reliability Evaluation. IEE Proceedings-C, 1998, 145(2): 149~153
- 8 别朝红, 王秀丽, 王锡凡 (Bie Zhaozhong, Wang Xiuli, Wang Xifan). 复杂配电系统的可靠性评估 (Reliability Evaluation of Complicated Distribution Systems). 西安交通大学学报 (Journal of Xi'an Jiaotong University), 2000(8): 9~13
- 9 谢开贵, 周平, 周家启, 等 (Xie Kaigui, Zhou Ping, Zhou Jiaqi, et al). 基于故障扩散的复杂中压配电系统可靠性评估算法 (Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Radial Distribution Networks Based on Fault-spreading-method). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(4): 45~48
- 10 李卫星 (Li Weixing). 配电系统可靠性的研究: [硕士学位论文] (Research on Distribution System Reliability, Thesis). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Harbin: Harbin Institute of Technology), 2001

李志民(1963—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统分析与控制的教学和研究工作。E-mail: lilac@0451.com

李卫星(1977—), 男, 硕士, 主要从事配电系统可靠性评估和优化方面的研究。E-mail: lwx1121@sina.com

刘迎春(1972—), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统故障恢复与可靠性的研究。

FAULT-TRAVERSE ALGORITHM OF RADIAL-DISTRIBUTION-SYSTEM-RELIABILITY EVALUATION

Li Zhimin, Li Weixing, Liu Yingchun

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A reliability evaluation algorithm for radial distribution system is proposed. The algorithm effectively considers capacity constraint, and is fit to evaluate the relatively complex distribution systems consisting of many sub-feeders and disconnects. The parent-searching method is applied to determine the breaker influenced by the faults, and the breadth-first-searching and depth-first-searching are respectively applied to determine the disconnection areas and the fault types of load points. The proposed algorithm, according to the features of radial distribution systems, adopts back/forward sweep method to distribution power flow calculation, and is consistent with the above algorithm. The DRTS-bus2 and DRTS-bus6 are evaluated by using the proposed algorithm, which verifies the effectiveness of this algorithm.

Key words: complex radial distribution system; reliability evaluation; fault-traverse technique; back/forward sweep