

配电网故障判断与负荷均衡化

刘 健¹, 程红丽², 董海鹏¹, 蔡建新²

(1. 陕西银河电力自动化股份有限公司, 陕西省西安市 710075; 2. 西安科技学院, 陕西省西安市 710054)

摘要: 提出一种配电网简化模型: 将馈线开关当做节点, 将馈线当做弧, 从负荷的角度描述配电网, 并采用邻接表的数据结构加以描述。在此基础上发展了配电网故障区域判断方法, 讨论了以最少的开关操作隔离故障区域的方法。提出一种以联络开关为核心的用于负荷均衡化的配电网重构方法, 将每个联络开关对应的两条馈线看做馈线偶, 分别定义了馈线偶和配电网的负荷均衡率, 并以此作为网络重构的评价函数, 配电网重构过程由若干馈线偶内负荷均衡化过程组成, 这种方法具有迭代次数少和不需要量测馈线配电变压器参数等优点。文中给出了典型实例。

关键词: 配电网自动化; 馈线自动化; 故障判断; 负荷均衡化

中图分类号: TM727.2; TM711

0 引言

配电网自动化是减少停电时间、缩小停电面积从而提高供电可靠性的重要手段, 因此如何在配电网发生故障后, 根据 FTU 上报的信息及时准确地判断出故障区域, 并采取有效措施隔离故障区域、恢复健全区域供电是配电网自动化的关键技术之一。

尽管文献[1]提出了一种配电网故障区段判断的统一矩阵算法, 但是由于将配电网看成一种无向图, 因此不能较好地反映配电网的运行方式, 且需要进行矩阵相乘和对结果进行规格化处理。文献[2]对上述模型进行了改进, 但是仍不理想。文献[3]提出采用有向图描述配电网, 从而避免了矩阵相乘和规格化处理, 大大改进了文献[1]中的方法, 但是并没有讨论如何根据配电网的网架结构以及开关的当前状态自动生成该有向图。此外, 文献[1~3]均未仔细研究在判断出故障区域后, 如何以最少的开关操作隔离故障区域, 且均未考虑 T 接点的影响。本文提出一种基于配电网的变结构耗散网络模型的故障区域判断和隔离方法, 有效地解决了上述问题。

配电网重构是配电网自动化系统的重要组成部分。近 10 年来配电网重构的研究相当活跃, 研究以负荷均衡为目标的配电网重构对于发展我国配电网自动化具有重要意义。目前已有多种不同方法实现了以配电负荷均衡化为目标的网络重构^[4~7], 但是均需要配电网自动化系统提供每条配电线路上所有配电变压器的量测数据, 而在实际中是难以满足的。

本文提出以配电网的联络开关为核心的网络重

构方法, 能够实现全局负荷均衡化, 且具有迭代次数少和不需要量测馈线配电变压器参数等优点。

1 配电网的简化建模

文献[8]提出了基于变结构耗散网络的配电网简化建模方法, 即采用无向图描述配电网架结构, 采用赋权有向图描述其当前运行方式, 将沿线开关看成节点, 并以流过该节点的负荷为权, 将相邻两个节点间的馈线和变压器综合看成是耗散边, 并以该条边上所有变压器供出的负荷之和为权。文献[9]提出了采用等长邻接表描述配电网的数据结构。为了叙述方便, 本节先简述配电网的等长邻接表数据结构。

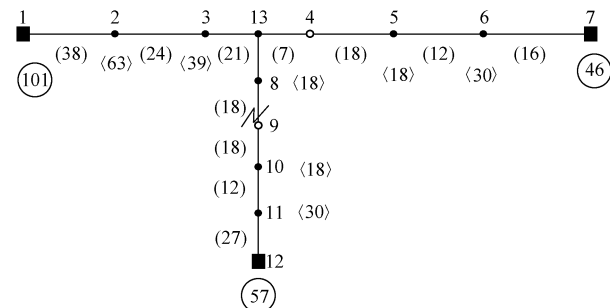
对于 N 点配电网, 定义 N 行 5 列的网基结构邻接表 D 描述其网架结构(无向图, 称为“网基”)。 D 中第 1 列元素 d_{i1} 描述各节点类型, 其取值可为 0, 1, 2 或 3, 分别表示该节点是普通点、T 接点、源点或末梢点。第 2 列元素 d_{i2} 描述各节点过负荷情况($d_{i2}=1$ 代表过负荷)。第 3 列元素至第 5 列元素描述与各节点邻接的节点序号, 空缺处填一个负数, 如 -1。

定义 N 行 5 列的弧结构邻接表 C 反映其当前运行方式(有向图, 称为“网形”)。 C 中的第 1 列元素 c_{i1} 描述各节点所处的状态($c_{i1}=1$ 代表合闸)。 c_{i2} 和 c_{i3} 分别表示以节点 i 为终点的弧的起点的序号。第 4 列元素和第 5 列元素描述以相应的节点为起点的弧的终点的序号, 空缺处填一个负数, 如 -1。

定义 N 行 4 列的负荷邻接表 L , 其第 1 列元素 l_{i1} 描述相应的节点的负荷; 第 2 列元素 l_{i2} 至第 4 列元素 l_{i4} 描述以相应的节点为端点的边的负荷。

已知配电网中各节点的负荷, 可以计算出各条弧的负荷, 称为点弧变换; 已知各条弧的负荷, 也可

以计算出各顶点的负荷,称为弧点变换。显然,节点的负荷与弧的负荷之间满足以下关系:父节点的负荷等于它的所有子节点的负荷之和加上以它为父节点的所有弧的负荷之和。例如,对于图 1 所示的配电网,流过节点 1 的负荷等于其子节点(即节点 2)的负荷加上以其为父节点的弧(2,1)的负荷。



<> 内为节点负荷; () 内为馈线负荷; ○ 内为电源流出的负荷;
节点 1, 7, 12 分别代表 3 个电源; ◊ 联络开关; • 分段开关

图 1 一个有故障的配电网

Fig. 1 A distribution network with a fault

对于图 1 所示的配电网,其 D , C 和 L 分别为:

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 13 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 13 & 5 & -1 \\ 0 & 0 & 4 & 6 & -1 \\ 0 & 0 & 5 & 7 & -1 \\ 2 & 0 & 6 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 13 & 9 & -1 \\ 0 & 0 & 8 & 10 & -1 \\ 0 & 0 & 9 & 11 & -1 \\ 0 & 0 & 10 & 12 & -1 \\ 2 & 0 & 11 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 3 & 4 & 8 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 3 & -1 \\ 1 & 2 & -1 & 13 & -1 \\ 0 & 5 & 13 & -1 & -1 \\ 1 & 6 & -1 & 4 & -1 \\ 1 & 7 & -1 & 5 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 6 & -1 \\ 1 & 13 & -1 & 9 & -1 \\ 0 & 8 & 10 & -1 & -1 \\ 1 & 11 & -1 & 9 & -1 \\ 1 & 12 & -1 & 10 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 11 & -1 \\ 1 & 3 & -1 & 4 & 8 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 101 & 38 & -1 & -1 \\ 63 & 38 & 24 & -1 \\ 39 & 7 & 24 & -1 \\ 0 & 7 & 18 & -1 \\ 18 & 18 & 12 & -1 \\ 30 & 12 & 16 & -1 \\ 46 & 16 & -1 & -1 \\ 18 & 7 & 18 & -1 \\ 0 & 18 & 18 & -1 \\ 18 & 18 & 12 & -1 \\ 30 & 12 & 27 & -1 \\ 57 & 27 & -1 & -1 \\ 32 & 7 & 7 & 7 \end{bmatrix}$$

为了跟踪配电网拓扑,需要根据配电网架构(D)和开关的当前状态(C 中第 1 列)求出配电网的运行方式(C 中其余各列)的过程,作者称该过程为基形变换。

配电网经常存在 T 接分支,为此引入区域的概念。区域是指相互连通的若干馈线段构成的子网络。区域的外部端点全部为馈线开关,其中潮流流入的端点称为该区域的人点,其余端点称为该区域的出点。区域的内部端点全部为 T 接点,没有内部端点的区域实际上就是一段馈线。显然,当线路发生故障时,区域是故障隔离的最小范围。区域用 $P(v_i, v_j, \dots, v_m)$ 表示,其中 $v_i, v_j, \dots, v_m$ 为该区域的端点,并且 v_i (排在最前面的顶点)为该区域的人点, $v_j, \dots, v_m$ 为该区域的出点。

例如对于图 1 所示的配电网,共含有 10 个区域,分别为 $P_1 = (1, 2)$, $P_2 = (2, 3)$, $P_3 = (3, 4, 8)$, $P_4 = (4, 5)$, $P_5 = (5, 6)$, $P_6 = (6, 7)$, $P_7 = (8, 9)$, $P_8 = (9, 10)$, $P_9 = (10, 11)$, $P_{10} = (11, 12)$ 。

2 配电网故障区域的确定和隔离

在基形变换和区域分解完成的基础上,实现配电网故障区域判断就比较方便,只需引入下列规则。

规则 1 如果一个区域的始点经历了过电流,并且该区域的所有末点均未经历过电流,则该区域内有故障。

例如对于图 1 所示的配电网,当节点 8 和节点 9 之间发生故障时,节点 1, 2, 3 和 8 会经历过电流,其余节点不经历过电流。对于由节点 3, 4, 8 围成的区域,其入点(节点 3)和出点(节点 8)都经历了过电流,因此依据规则 1,故障不在该区域中。对于由节点 8 和 9 围成的区域,其入点(节点 8)经历了过电流,而其出点均未经历过电流,因此依据规则 1,故障就在该区域中。

故障区域判断出来以后,一般只需将该区域的端点断开就可以隔离故障区域。但是对于某些特殊情形,并不需要将故障区域的所有端点全部分断。如图 2(a)中的配电网,节点 1 为源点,当由节点 3,4 和 5 围成的区域发生故障后,节点 4 和 5 就不需要分断。图 2(b)中的配电网,节点 1 和 8 为源点,节点 5 为联络开关,当由节点 2,3 和 4 围成的区域发生故障后,节点 4 就不需要分断。

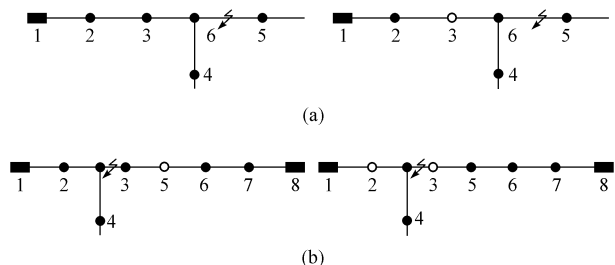


图 2 配电网故障区域隔离的若干示例
Fig. 2 Several instances of fault isolation on distribution network

为了反映上述情况,还需要建立下列规则。

规则 2 为了隔离故障区域,故障区域的端点中的源点必须断开。

规则 3 分别以故障区域的端点中除去源点的端点为假想源点而不包含真正的源点进行基形变换,若得到的局部网形的所有端点均为末梢点,则该假想源点对应的节点不必断开;若得到的局部网形的端点中存在源点或联络开关(处于分断状态的节点),则该假想源点对应的节点必须断开,以便隔离故障区域。

对于馈线上采用的是具有过流脱扣功能的开关的情形,由于配电线路的供电半径较短,并且受电流互感器的精度和开关设备的动作时间的影响,期望通过对开关设备更精细的整定来进一步提高故障时的选择性的努力通常是难以实现的^[10],因此当故障发生后,有时会发生越级跳闸现象。在故障区域隔离之后,应将越级跳闸的开关合上。越级跳闸的节点的判断可以这样进行:将故障隔离后网形中所有处于分断位置的节点与故障前所有处于分断位置的节点进行比较,并且排除为了隔离故障必须分断的节点,所剩下的处于分断状态的节点就是发生了越级跳闸而应合上的节点。

对于馈线上采用的是重合分段器(又称为电压-时间型分段器)的情形,如图 3 所示。节点 1 和 7 为源点,采用重合器;节点 2,3,5 和 6 为分段开关,节点 4 为联络开关,它们都采用重合分段器。当故障发生后(如节点 2 和 3 间发生故障),可以根据重合分

段器 X-时限和 Y-时限的配合自动将故障线路源端所在侧的故障区域端点(节点 2)闭锁在分闸状态^[11](如图 3(b)所示),但如果不将故障区域的其他端点(节点 3)也闭锁在分闸状态,当联络开关合闸以恢复健全区域(节点 2 和 3 间的区域)供电时,会导致该端点(节点 3)重合到故障区域,从而导致对侧线路源点也发生跳闸,使未发生故障的区域受影响。

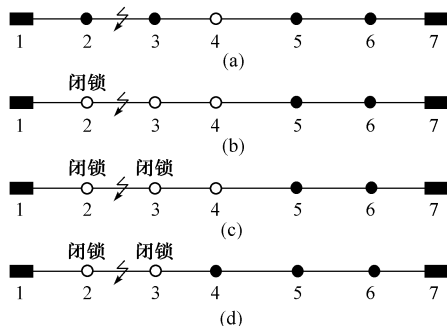


图 3 一个采用重合器和分段器的配电网
Fig. 3 A distribution network with reclosers and sectionalizers

若判断出故障区域,并通过配电自动化系统下达遥控命令将必须保持分断位置的开关全部闭锁,就可以解决上述问题。但是重合分段器一般均不带有保护电流互感器,因此难以根据过电流信息判断故障区域,为此引入规则 4。

规则 4 以被自动闭锁的节点为始点的区域的末点应予以闭锁。

图 3(c)所示为根据规则 4 闭锁了节点 3 的情形,图 3(d)为联络开关合闸后恢复了健全区域(节点 2 和 3 间的区域)供电的情形。

当然,对于采用重合分段器的情形,并不需要将故障区域的所有端点全部闭锁。为了反映这个情况,规则 2 仍然适用,但是规则 3 修改为规则 5。

规则 5 首先将所有节点设置为分断状态,然后分别以故障区域的端点中除去源点的端点为假想源点而不包含真正的源点进行基形变换,若得到的局部网形的所有端点均为末梢点,则该假想源点对应的节点不必闭锁;若得到的局部网形的端点中存在源点,则该假想源点对应的节点必须闭锁。

3 配电网负荷均衡化

通常具有网络重构潜力的配电网呈环状或网格状以开环方式运行,因此从某个联络开关 TS_i 出发,沿逆潮流方向搜索,总可以找到两条馈线,对应两个源点 V_m 和 V_n 。定义一个联络开关两侧的两条馈线为该联络开关的馈线偶,其中对应源点相对负荷较大的一侧称为热馈线,相应源点称为热源点;联络开

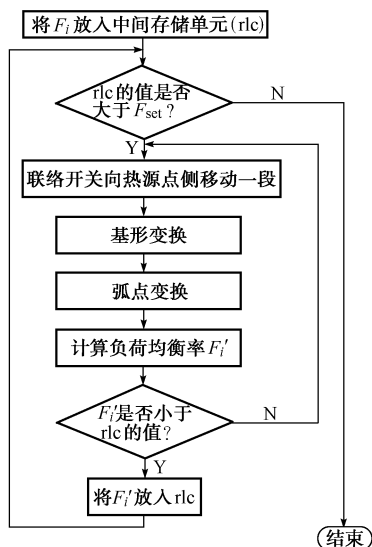
关的另一侧称为冷馈线,相应源点称为冷源点。定义联络开关 TS_i 的馈线偶的负荷均衡率 F_i 为:

$$F_i = \frac{\max \{L_{kmn}, L_{knn}\}}{\min \{L_{kmn}, L_{knn}\}} \quad (1)$$

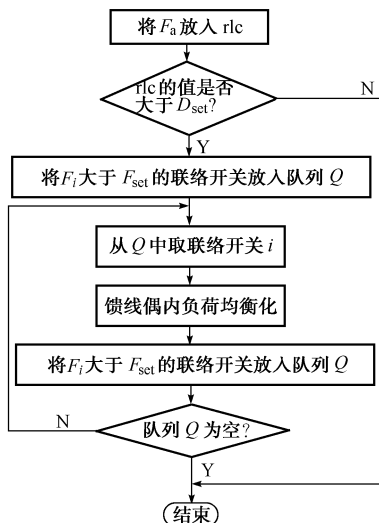
定义配电网中所有联络开关的馈线偶的负荷均衡率最大者为该配电网的负荷均衡率 F_a ,即:

$$F_a = \max \{F_1, F_2, \dots, F_{nt}\} \quad (2)$$

配电网重构过程包含了若干馈线偶内的负荷均衡化过程。规定配电网重构的启动条件为 D_{set} ,当配电网的负荷均衡率 F_a 大于 D_{set} 时启动网络重构。规定馈线偶内负荷均衡化的启动条件为 F_{set} ,当馈线偶的负荷均衡率大于 F_{set} 时启动。一般 F_{set} 应小于 D_{set} 。馈线偶内负荷均衡化过程如图 4(a)所示。



(a) 馈线偶内负荷均衡化过程



(b) 配电网负荷均衡化过程

图 4 配电网负荷均衡化过程

Fig. 4 Process of load balancing in a feeder couple and in the distribution network

在实际运用中,还要规定最大迭代次数,以便在该馈线偶内无法将负荷均衡到 F_{set} 以下时,能够避免死循环。整个配电网负荷均衡化过程如图 4(b)所示。在实际运用中,也要规定最大迭代次数,以便在配电网内无法将负荷均衡到 D_{set} 以下时,能够避免死循环。

例如对于图 1 所示的一个具有 3 个电源点的配电网,显然,网络重构前 $F_4=2.19$, $F_9=1.77$, $F_a=2.19$ 。取 $D_{set}=1.4$, $F_{set}=1.2$ 。

首先对联络开关 4 的馈线偶进行负荷均衡化,结果如图 5(a)所示。此时, $F_3=1.37$, $F_9=1.49$, $F_a=1.49$ 。再对联络开关 9 的馈线偶进行负荷均衡化,结果如图 5(b)所示。此时, $F_3=1.08$, $F_9=1.21$, $F_a=1.21$,由于 $F_a < D_{set}$,迭代结束。

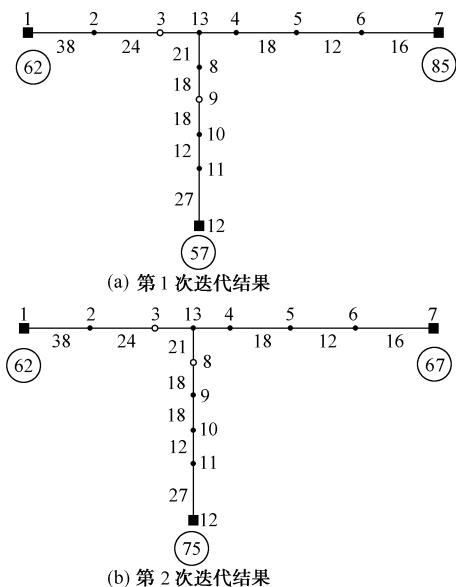


图 5 配电网优化的过程

Fig. 5 Process of distribution network optimization

4 结论

本文在配电网的变结构耗散网络模型基础上提出了对于各种配电网形式的故障区域判断和隔离方法。该方法已经应用于多个城市配电自动化系统中,效果良好。

对于具有网络重构潜力的开环运行配电网,联络开关是网络重构的核心,每个联络开关对应的两条馈线构成一个馈线偶。配电网负荷均衡化过程包含了若干馈线偶内的负荷均衡化过程。这种方法具有迭代次数少和不需要量测馈线配电变压器参数等优点。

对于具有多个供电途径的网格状配电网,在故障区域隔离后,还必须选择一个最佳方案恢复健全

区域供电,其原则是不发生新的过负荷、负荷分布均匀和线路损耗小。健全区域优化恢复供电方案的确定方法可参考文献[12],本文不再赘述。

参考文献

- 1 刘健,倪建立,杜宇(Liu Jian, Ni Jianli, Du Yu). 配电网故障区段判断和隔离的矩阵算法(A Unified Matrix Algorithm for Fault Section Detection and Isolation in Distribution System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(1): 31~33
- 2 朱发国,孙德胜,姚玉斌,等(Zhu Faguo, Sun Desheng, Yao Yubin, et al). 基于现场监控终端的线路故障定位优化矩阵算法(Optimized Matrix Arithmetic of Line Fault Location Based on Field Terminal Unit). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(15): 42~44
- 3 卫志农,何桦,郑玉平(Wei Zhinong, He Hua, Zheng Yuping). 配电网故障定位的一种新算法(A Novel Algorithm for Fault Location in Power Distribution Network). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(14): 48~50
- 4 Peponis G, Papadopoulos M. Reconfiguration of Radial Distribution Network; Application of Heuristic Methods on Large-scale Networks. IEE Proceedings—Gener, Transm & Distrib, 1995, 142(6): 631~638
- 5 Aoki K, Kuwabara H, Satoh T, et al. An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 865~1872
- 6 Baran M E, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. IEEE Trans on

- Power Delivery, 1989, 4(2): 1401~1407
- 7 Song Y H, Wang G S, Johns A T, et al. Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Using Fuzzy Controlled Evolutionary Programming. IEE Proceedings—Gener, Transm & Distrib, 1997, 144(4): 345~350
- 8 刘健,程红丽(Liu Jian, Cheng Hongli). 配电网的模型化方法(Approach to Modeling Distribution System). 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 2000, 34(10): 10~14
- 9 刘健,程红丽(Liu Jian, Cheng Hongli). 面向配电自动化的配电网数据结构(Data Structure of Distribution Automation Systems). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(13): 26~30
- 10 刘健(Liu Jian). 城乡电网建设与改造指南(Construction and Reformation of Urban and Rural Distribution Network). 北京: 中国水利水电出版社(Beijing: China Water Power Press), 2001
- 11 刘健,倪建立,邓永辉(Liu Jian, Ni Jianli, Deng Yonghui). 配电自动化系统(Distribution Automation System). 北京: 中国水利水电出版社(Beijing: China Water Power Press), 1998
- 12 刘健(Liu Jian). 变结构耗散网络(Variable Structure Dissipated Network). 北京: 中国水利水电出版社(Beijing: China Water Power Press), 2000

刘健(1967—),男,博士生导师,教授,IEEE 高级会员,总工程师,研究领域为配电网分析及电力系统自动化。
E-mail: dongzxxa@vip.sina.com

程红丽(1966—),女,副教授,研究方向为配电网分析。
董海鹏(1971—),男,工程师,研究领域为配电网优化。

FAULT SECTION IDENTIFICATION AND LOAD BALANCING OF DISTRIBUTION NETWORK

Liu Jian¹, Cheng Hongli², Dong Haipeng¹, Cai Jianxin²

(1. Shanxi Galaxy Electric Power Automation Co Ltd, Xi'an 710075, China)

(2. Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: A new model of distribution system is presented, whereby, the feeder switches are regarded as the vertexes of a graph and the feeder lines are regarded as the arcs. A distribution network is described on the basis of load adjacent tables. Based on the proposed model, a novel way to identify fault sections of a distribution network is presented. Algorithm to isolate the fault section with minimum switch operations is discussed. A novel distribution network reconfiguration approach for load balancing is presented, in which tie switches are regarded as critical elements. The two feeder lines connected with one tie switch are regarded as a feeder couple. Load balancing ratios of feeder couples and total distribution network are defined and used as indices of network reconfiguration, respectively. A network reconfiguration procedure is made up of several load balancing processes within each feeder couple. The proposed method shows the advantage of less iteration time and no need of feeder distribution transformer data. Typical examples are also given in the paper.

Key words: distribution automation; feeder automation; fault section identification; load balancing