

辐射型配电网重构的功率矩法

董家读¹, 黄庆², 黄彦全¹, 史华伟¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 绵阳电业局, 四川 绵阳 621000)

摘要: 研究了配电网的重构方法。根据配电网“闭环设计, 开环运行”的特点, 提出了阻抗距离、广义负荷、功率矩的概念, 建立了配电网的功率矩模型。通过理论分析, 得出了配电网功率矩均衡与优化的关系, 即配电网运行的优化程度取决于功率矩的均衡程度, 进而提出了基于功率矩均衡的配电网重构方法。该方法不需进行费时的潮流计算, 不受网络初始结构的影响, 充分利用了配电网的特点。只需根据网络和负荷参数经过少量简单计算即可得到重构结果, 具有实用的潜力。典型配电网算例的测试结果验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 配电网; 网络重构; 广义负荷; 功率矩

The power moment method for radial distribution network reconfiguration

DONG Jia-du¹, HUANG Qing², HUANG Yan-quan¹, SHI Hua-wei¹

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Mianyang Electric Power Bureau, Mianyang 621000, China)

Abstract: The optimal algorithms of distribution network reconfiguration are researched. According to the distribution network's feature, i.e. closed-loop designing and opened-loop running, the concept of impedance distance, generalized load and power moment are defined, the distribution network's power moment model is also established. Through theoretical analysis, the connection of network's optimization and power moment is discovered, that the optimization result of distribution network operation is determined by the power bar balance degree of power moment, then a new network reconfiguration method is put forward. This method uses the distribution network's characteristic and is not affected by network's initial structure. The solution procedures become very simple and fast, because the conventional procedures of load flow calculation are reduced. It is simple and direct for analysis and calculation in radial distribution network. The effectiveness of proposed method is verified by typical distribution systems.

Key words: distribution networks; network reconfiguration; generalized load; power moment

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0022-04

0 引言

配电网重构是配电网优化分析的重要任务之一, 是配电管理系统(DMS)中的一项重要的高级应用功能。关于配电网重构问题, 国内外学者做了大量工作, 提出了不少算法, 同时发表了不少研究论文^[1-10]。配电网重构是大规模非线性混合整数规划问题, 是典型的NP难问题, 目前在理论上还没有获得最优解的实用和有效方法。迄今为止, 配电网重构的方法主要包括数学优化方法^[1-2]、启发式优化方法^[3-5]和人工智能方法^[6]。数学优化方法可以得到不依赖于初始结构的最优解, 但存在严重的“维数灾”问题; 启发式算法速度快, 但不能保证得到最优解; 人工智能法虽然可得到全局最优解或全局次最优解, 但计算量大, 效率低。在各种分析方法中, 最有实际应用潜力的应该是启发式算法。

启发式算法结合配电网的结构特点, 通过理论

分析把开关组合问题转化为其它容易求解的问题, 使复杂问题得到了简化, 减小了计算量。

本文提出了配电网功率矩的概念和模型, 在文献[7]的基础上, 利用该模型论述了配电网功率矩均衡与优化的关系: 功率矩越均衡则功率损失越小。在功率矩模型的基础上, 提出了基于功率矩均衡的配电网重构方法。本文所提方法不需计算网络潮流, 直接根据网络和负荷参数经过少量简单计算即可得到重构结果, 具有一定的实用价值。

1 配电网重构的数学模型

配电网重构的目标多为降低网损、均衡负荷、提高供电电压质量等。本文以网损最小为目标函数的数学表达式为:

$$\min F = \sum_{i=1}^n P_{Li} \quad (1)$$

式中: F 为网络重构的目标函数, P_{Li} 为支路 i 上的有功损耗, n 为支路总数。

网络重构过程中还必须满足以下约束:

(1) 网络拓扑和供电约束。配电网一般为闭环设计, 开环运行, 即要求配电网重构后呈辐射状且不能出现孤立节点 (即所谓“孤岛”)。

(2) 潮流约束。即 $\mathbf{AX} = \mathbf{D}$, \mathbf{A} 为网络节点支路关联矩阵, \mathbf{X} 为线路潮流矢量, \mathbf{D} 为负荷矢量。

(3) 支路容量和节点电压约束。

$$S_i < S_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$U_{i\min} < U_i < U_{i\max} \quad (3)$$

式中: n 为节点总数; S_i 、 $S_{i\max}$ 分别为支路 i 的功率和容量; U_i 、 $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 的电压及其上下限。

2 辐射型配电网重构的功率矩法

2.1 配电网的功率矩模型

辐射型配电网具有单向流动性。不失一般性, 定义如下 5 个基本概念:

(1) 逆流路径。逆流而上, 节点 n_i 到源点 o 所经历的支路集合和节点集合构成逆流路径, 记作 L_i 。

(2) 阻抗距离。逆流路径 L_i 的所有支路阻抗之和, 记作 Z_{ni} , 即

$$Z_{ni} = \sum_{b_j \in L_i} Z_{b_j} \quad (4)$$

其中: n_i 表示节点; b_j 表示支路; Z_{b_j} 为支路 b_j 的阻抗。

(3) 广义负荷。节点到源点的阻抗距离 Z_{ni} 与节点负荷的共轭 S_{ni}^* 的乘积, 记作 W_{ni} , 即

$$W_{ni} = Z_{ni} S_{ni}^* \quad (5)$$

(4) 功率矩。逆流路径 L_i 上的所有节点的广义负荷之和的实部, 记作 T_{Li} , 即

$$T_{Li} = \operatorname{Re} \left(\sum_{n_i \in L_i} W_{ni} \right) \quad (6)$$

(5) 功率矩不平衡度。两个不同的功率矩之差的绝对值, 记作 $B(L_i, L_j)$, 即

$$B(L_i, L_j) = |T_{Li} - T_{Lj}| \quad (7)$$

2.2 功率矩均衡与配电网优化的关系

在用启发式算法进行配电网重构时, 一般需要先

合上联络开关形成环网, 然后用启发式规则来选择需要断开的开关。当形成环网后, 环网上存在一个电压最低点。文献[7]中, 作者根据开关交换前后的网损变化估算公式, 得出如下结论: 在配电网重构中, 断开电压最低点两侧的开关产生的网损增量最少, 这两个开关中最优的一个即为需要断开的开关, 此时的网络具有最优的结构。从上述结论可知, 确定断开开关的关键是寻找电压最低点两侧的开关。简单的环网如图 1 所示。

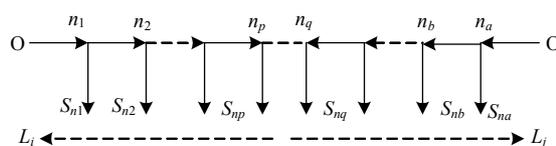


图 1 环网示意图

Fig.1 Loop distribution system

图 1 中, O 为源点, 功率流向如图所示。在图中, 两边的源点 O 是同一点, n_p 、 n_q 为电压最低点的两个虚拟节点, 二者的电压显然也相等, n_p 、 n_q 之间的虚拟支路的阻抗为 0, 该支路上没有电流, 相当于此虚拟支路处于断开状态。因此, 从源点 O 沿两条路径到电压最低点的电压降的实部相等, 即

$$\sum_{b_i, n_i \in L_i} \operatorname{Re}[Z_{b_i}(S_{b_i}/U_{n_i})^*] = \sum_{b_j, n_j \in L_j} \operatorname{Re}[Z_{b_j}(S_{b_j}/U_{n_j})^*] \quad (8)$$

式中: Z_{b_i} 、 Z_{b_j} 为支路阻抗; S_{b_i} 、 S_{b_j} 为支路功率; U_{n_i} 、 U_{n_j} 为节点电压。由于各节点的电压均在额定值附近, 因此 $U_{n_i}, U_{n_j} \approx 1.0 \text{ pu}$, 则式 (8) 简化为:

$$\sum_{b_i \in L_i} \operatorname{Re}(Z_{b_i} S_{b_i}^*) = \sum_{b_j \in L_j} \operatorname{Re}(Z_{b_j} S_{b_j}^*) \quad (9)$$

式(9)的左边

$$\begin{aligned} \sum_{b_i \in L_i} \operatorname{Re}(Z_{b_i} S_{b_i}^*) &= \operatorname{Re}[Z_{b_1}(S_{n_1}^* + S_{n_2}^* + \dots + S_{n_p}^*) + Z_{b_2}(S_{n_2}^* + S_{n_3}^* + \dots + S_{n_p}^*) + \dots + Z_{b_{np}} S_{n_p}^*] \\ &= \operatorname{Re}[S_{n_1}^* Z_{b_1} + S_{n_2}^* (Z_{b_1} + Z_{b_2}) + \dots + S_{n_p}^* (Z_{b_1} + Z_{b_2} + \dots + Z_{b_{np}})] \\ &= \operatorname{Re}[S_{n_1}^* Z_{n_1} + S_{n_2}^* Z_{n_2} + \dots + S_{n_p}^* Z_{n_p}] = T_{Li} \end{aligned} \quad (10)$$

同理可得到

$$\sum_{b_j \in L_j} \operatorname{Re}(Z_{b_j} S_{b_j}^*) = T_{Lj} \quad (11)$$

由式 (9)、(10)、(11) 得到此时网络的功率矩

不平衡度为

$$B(L_i, L_j) = |T_{L_i} - T_{L_j}| = 0 \quad (12)$$

从式(9)、(10)、(11)可以看出, 逆流路径 L_i 、 L_j 上的电压降的实部等于该逆流路径的功率矩。从式(12)可以看出, 当电压最低点被分解为两个虚拟节点后, 沿电压最低点到源点的两个逆流方向上的功率矩相等, 此时的功率矩不平衡度为 0, 我们称此时这两个虚拟的辐射型网络处于完全平衡状态。当断开左侧辐射型网上电压最低点一侧的支路后将形成两个新的辐射型网络, 其逆流路径分别记为 L'_i 和 L'_j 。此时, 这两个辐射型网络沿逆流路径的功率矩 $T_{L'_i}$ 、 $T_{L'_j}$ 和功率矩不平衡度 $B(L'_i - L'_j)$ 变为:

$$T_{L'_i} = T_{L_i} - \text{Re}(S_{np}^* Z_{np}) \quad (13)$$

$$T_{L'_j} = T_{L_j} + \text{Re}(S_{np}^* Z_{nq}) \quad (14)$$

$$B(L'_i - L'_j) = |T_{L'_i} - T_{L'_j}| = |T_{L_i} - T_{L_j} - \text{Re}[S_{np}^* (Z_{np} + Z_{nq})]| = \text{Re}[S_{np}^* (Z_{np} + Z_{nq})] \quad (15)$$

则支路断开前后两个系统的功率矩不平衡度之差为:

$$B(L'_i - L'_j) - B(L_i - L_j) = \text{Re}[S_{np}^* (Z_{np} + Z_{nq})] > 0 \quad (16)$$

即支路断开后网络的功率矩不平衡度增大。不难证明, 当断开的开关逐渐向源点移动时, T'_{L_i} 逐渐减小, T'_{L_j} 逐渐增大, 功率矩不平衡度单调增大。同理, 当断开右侧辐射型网络上的开关逐渐向源点移动时, T'_{L_i} 逐渐增大, T'_{L_j} 逐渐减小, 功率矩不平衡度亦会单调增大。因此, 断开电压最低点两侧的开关时系统的功率矩不平衡度最小。

文献[7]通过理论分析, 得出了断开环网上电压最低点两侧的开关所产生的网损增加量最少的结论, 而本文经过上述分析, 得到断开电压最低点两侧的开关时系统的功率矩不平衡度最小。因此, 当使网络中各断开开关两侧的功率矩不平衡度达到最小时, 网络的功率损失也达到最小。综合上述结果, 可得出以下结论: 欲使重构后网络的功率损失达到最小, 应该使各断开开关两侧的功率矩不平衡度达到最小。也就是说, 以网络功率损耗最小为目标的重构问题可以转化为网络功率矩不平衡度最小的问题。

2.3 基于功率矩均衡的配电网重构

以功率损失最小为目标的配电网重构可以描述为: 在保证网络为辐射状的前提下, 确定网络中各个开关的状态而使网络的功率损失达到最小。

对于一个辐射型配电网, 网络重构需要先合上一个联络开关, 然后采用一定的方法来确定需要断开的开关, 当对所有的联络开关都进行了操作后, 网络的功率损失达到最小, 网络结构达到最优。

(1) 闭合开关的选择

设联络开关 S 两边的节点为 n_i 和 n_j , 分别计算这两个节点至源点的逆流路径的功率矩, 进而得到功率矩不平衡度 $B(L_{n_i}, L_{n_j})$ 。按照以上方法计算出所有剩余联络开关的 $B(L_{n_i}, L_{n_j})$, 找出 $B(L_{n_i}, L_{n_j})$ 最大的联络开关即为当前需要闭合的开关。

(2) 断开开关的选择

闭合步骤(1)找出的联络开关 S_L , 断开功率矩较大侧逆流路径上与 S_L 最近的支路开关 S_1 , 计算此时的功率矩不平衡度。若此时的功率矩不平衡度比前一次的大, 则撤销此次操作, 维持各个开关前一次的状态不变且结束对此联络开关的操作; 若此时的功率矩不平衡度比前一次的小, 则闭合此时断开的开关 S_1 , 然后断开逆流路径上的下一个开关 S_2 , 继续按以上方法进行计算比较, 直到找到最小的功率矩不平衡度为止, 此时断开的开关就是最终需要打开的开关, 至此完成了对一个联络开关的操作。

当对某个联络开关的操作完成后, 则在下一次选择闭合的联络开关时不再考虑这个开关, 如此重复步骤(1)和(2), 直到完成对所有联络开关的操作, 此时的网络具有最小的功率损失。

3 算例分析

按照本文的模型和算法, 对 33 节点系统^[8]和 69 节点系统^[9]进行了重构计算。计算中额定电压取为 12.66 kV。采用本文方法和其它方法重构后的结果见表 1 和表 2 所示。

表 1 33 节点系统计算结果的比较

Tab.1 Result comparison of 33-node system

指标	文献[4]	本文
断开开关	6-7、8-9、	6-7、8-9
	13-14、31-32	13-14、31-32
网损/kW	24-28	24-28
	140.82	139.55
最低电压/pu	0.937 6	0.937 8

表 2 69 节点系统计算结果的比较

Tab.2 Result comparison of 69-node system

指标	文献[10]	本文
	10-70、12-20	10-70、12-20
断开开关	13-14、44-45	13-14、47-48
	50-51	50-51、
网损/kW	100.81	99.76
最低电压/pu	0.933	0.943

从表 1 可以看出, 对于算例 1, 用本文方法所得重构结果与文献[4]相同, 降损率达 30%, 最低点电压大幅提高, 重构效果明显。从表 2 可以看出, 对于算例 2, 用本文所提方法所得结果比文献[10]更优, 验证了本文所用方法的优越性。由于本文算法无需计算网络潮流, 经过少量简单计算即可得到重构结果, 所需时间很少, 因此适合解决大规模网络的重构问题。

4 结论

(1) 提出了阻抗距离、广义负荷、功率矩的概念, 在上述概念的基础上建立了配电网的功率矩模型。

(2) 在已有研究成果的基础上, 利用功率矩模型论述了配电网优化与功率矩均衡的关系。

(3) 以功率矩模型为基础, 提出了配电网重构的功率矩法。该方法不需计算网络潮流, 采用网络和负荷参数经过少量计算即可得到结果, 具有实用的潜力。

参考文献

- [1] FAN Ji-yuan, ZHANG Lan, Mc Donald D J. Distribution Network Reconfiguration Single loop Optimization[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1643-1647.
- [2] Wanger T P, Chikani A Y, Hackm R. Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: an Application of Distribution of Distribution Automation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1922-1931.
- [3] 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]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103

- [4] Goswami S K, Basu S K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1484-1491.
- [5] 蔡中勤, 郭志忠, 陈学允. 配电网重构的均衡视在精确矩法[J]. 继电器, 2000, 28(12): 8-12.
CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong, CHEN Xue-yun. Poised Apparent Accurate Moment for Network Reconfiguration in Distribution Systems[J]. Relay, 2000, 28(12): 8-12.
- [6] Kin Hoyong, Ko Yunseok, Kyung-Hee Jung. Artificial Neural-network Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1356-1366.
- [7] 韩学军, 陈鹏, 国新风, 等. 基于潮流计算的配电网重构方法[J]. 电网技术, 2007, 31 (17): 60-63.
HAN Xue-jun, CHEN Peng, GUO Xin-feng, et al. A Power Flow Based Reconfiguration Method of Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 60-63.
- [8] Baran M E, Wu F F. Networks Reconfiguration in Distribution Systems or Loss Reduction and Load Balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [9] Baran M E, Wu FF. Optimal Capacitor Placement on Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-732.
- [10] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[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: 2009-04-24; 修回日期: 2009-05-12

作者简介:

董家读 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网自动化系统方面的研究工作; E-mail: 308799258@qq.com

黄庆 (1969-), 男, 工程师, 主要从事电力系统的运行工作;

黄彦全 (1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事继电保护和变电站综合自动化方面的研究和教学工作。

(上接第 7 页 continued from page 7)

- [11] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 于歆杰, 周根贵, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004. 76-108.
- [12] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [13] 吴际舜, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

收稿日期: 2009-09-14; 修回日期: 2009-11-09

作者简介:

陈得宇 (1974-), 男, 博士研究生, 主要从事智能体 (Agent) 技术在电力系统中应用, 大系统建模、控制及辅助决策支持系统等研究; E-mail: chen_power@163.com

张仁忠 (1952-), 男, 教授, 研究方向为系统工程理论与应用。