

基于线路最大传输功率的配电网网络重构

伍利¹, 姚李孝¹, 彭金宁²

(1. 西安理工大学电力工程系, 陕西 西安 710048; 2. 西安热工研究院, 陕西 西安 710032)

摘要: 单端供电的配电网, 电源端对节点的电压调节与控制是有限的, 随着节点负荷功率的不断增长, 导致了节点电压的下降。根据配电网负荷分布和节点电压潮流可行解的分析, 提出了一种基于线路最大功率传输的配电网重构方法。此方法在送端电压一定的情况下, 在保证节点电压可行解存在的前提下, 以负荷因子(LSF)决定线路的最大传输功率, 以线路最大传输功率的大小来决策输电线路的薄弱路径; 以节点电压偏差和网损最小为重构目标, 获得了对辐射型配电网重构的优化算法。同时利用快速支路交换法实现网络重构, 以IEEE33为例对算法进行了验证, 结果表明了该算法的有效性与正确性。

关键词: 配电网重构; 节点电压; 功率传输; 支路交换

Distribution network reconfiguration based on maximum line power transfer capability

WU Li¹, YAO Li-xiao¹, PENG Jin-ning²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute, Xi'an 710032, China)

Abstract: Distribution network supplied by single-ended power limits bus voltage control. With load increasing in distribution network, its bus voltage falls. According to the relation between load distribution and power flow feasible boundary, a new method based on power transmission for configuration of radial distribution system (RDS) is proposed. When the sending end voltage is kept constant and power load is increasing, index of load scale factor quantifies the margin to maximum loadability for any transmission line. Optimal reconfiguration involves selection of the best set of branches to be opened to reduction voltage deviation and loss, such that resulting of configuration of RDS by quick branch-exchange has the desired performance. A 33-bus RDS is reconfigured by presented method and the results are effective and valid.

Key words: distribution network reconfiguration; bus voltage; power transmission; branch-exchange algorithm

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)09-0015-05

0 引言

近十年来对配电网重构的研究相当活跃, 以降低网损为目标函数的重构方法有最优流模式算法和启发式算法以及人工智能算法^[1-7], 以负荷分布均衡化的方法有二次电流矩法^[8,9], 基于模式识别的支持向量机算法^[10]。这些新方法的不断出现, 丰富和推进了配电网重构的研究, 但这些方法都是在一定负荷下对配电网运行模式的改变, 没有在配电网负荷变化时, 对配电网的负载能力及电压情况进行分析。随着电力系统的不断发展, 从单一的重构目的逐渐向多目标的重构方向发展^[11], 从简单的网架结构重构逐渐深入到综合考虑网架结构特征与电压质量关系的网络重构发展, 而且考虑负荷随机性变化将是网络重构的发展方向。

本文基于配电网网络的物理参数, 提出了用负荷因子 LSF (load scale factor) 来决定辐射型配

网线路最大传输功率的方法, 以各支路最大传输功率的大小来确定配网的薄弱路径。在配电网中对于 LSF 接近于 1.0 的路径, 其传输功率的能力达到极限, 如果再给其节点增加负荷功率, 势必造成节点电压的急剧下降, 甚至失稳。以各支路的 LSF 为依据, 对配电网的运行模式进行重构, 使增加的负荷分布均衡和节点电压一定。此方法考虑了负荷的动态变化, 对实时监控的配电网运行管理提供了判断依据。应用传输功率进行配电网重构, 不但优化了网络结构, 而且优化后的配电网保证了其节点电压一定和网损最小。另外本方法是在原网络基础之上寻找最薄弱路径, 因此在重构时开关操作次数少, 在实际使用时简捷有效。

1 基于潮流的节点电压可行解分析

随着国民经济的发展和人们生活水平的提高, 配电网负荷正急剧地增长, 使配电网网络的运行状

态越来越接近极限状态, 导致了配电系统低电压运行, 其电压不稳定主要是由于负荷超过其可控能力而引起电压不可控下降造成的。配电网承受负荷增长的能力是有限的, 如何有效地实施配电网的运行管理及其扩展规划, 在负荷不断变化的情况下, 在保证配电网电压质量的前提下研究配电网重构问题是非常重要的。

假设以变电站为电源的辐射型配电网共有 L 条线路 ($L=1, 2, \dots, L$), N 个节点 ($N=1, 2, \dots, N$), 以图 1 所示配电网的等值电路图为例。

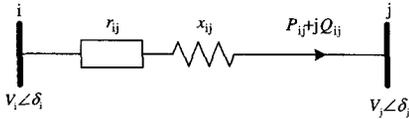


图 1 配电网的等值电路
Fig.1 Model of a transmission line in RDS

图 1 中 $V_i\angle\delta_i$ 为首端节点 i 的电压, $V_j\angle\delta_j$ 为末端节点 j 的电压, r_{ij} 和 x_{ij} 分别为传输线路的电阻和电抗, $P_{ij} + Q_{ij}$ 为首端到末端节点线路的传输功率, 同时也是末端节点 j 的注入功率。基于配电网的等值电路对其电压进行分析。

$$P_{ij} - jQ_{ij} = (V_i\angle\delta_i - V_j\angle\delta_j) * \frac{V_i\angle\delta_i - V_j\angle\delta_j}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (1)$$

对式 (1) 进行展开, 可得式 (2)。

$$(P_{ij}r_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + j(P_{ij}x_{ij} - r_{ij}Q_{ij}) = V_iV_j \cos(\delta_i - \delta_j) + jV_iV_j \sin(\delta_i - \delta_j) - V_j^2 \quad (2)$$

由式 (2) 可得式 (3) 和式 (4)。

$$P_{ij}r_{ij} + x_{ij}Q_{ij} = V_iV_j \cos(\delta_i - \delta_j) - V_j^2 \quad (3)$$

$$P_{ij}x_{ij} - r_{ij}Q_{ij} = V_iV_j \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可推导出式 (5)。

$$V_j^2 = - \left[r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij} - \frac{V_i^2}{2} \right] \pm \sqrt{\left[r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij} - \frac{V_i^2}{2} \right]^2 - [r_{ij}^2 + x_{ij}^2][P_{ij}^2 + Q_{ij}^2]} \quad (5)$$

对式 (5), 当且仅当

$$\left[r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij} - \frac{V_i^2}{2} \right]^2 - [r_{ij}^2 + x_{ij}^2][P_{ij}^2 + Q_{ij}^2] \geq 0 \quad (6)$$

时有解, 也就是一个具体的配电网, 进行潮流计算

时节点电压可行解存在。

在保证配电网每个节点电压存在的前提下, 线路传输的功率以 $LSF \cdot (P_{ij} + jQ_{ij})$ 的速度增长, 达到其传输功率的最大值时满足式 (7)。

$$\left[r_{ij} \cdot LSF \cdot P_{ij} + x_{ij} \cdot LSF \cdot Q_{ij} - \frac{V_i^2}{2} \right]^2 - [r_{ij}^2 + x_{ij}^2] \cdot LSF^2 \cdot [P_{ij}^2 + Q_{ij}^2] = 0 \quad (7)$$

根据式 (7), 对于一个具体的配电网, 求出其所有线路的 LSF , 进一步可得到各线路的最大传输功率, 其中最小的 LSF 是一个配电网电压可行解存在的必要条件, 其所对应的线路是该系统功率传输的最薄弱路径。当负荷发生变化时, 系统节点发生电压急剧下降一定是从最薄弱的部分开始。由于配电网每个线路的基本物理参数是确定的, 那么应用 LSF 在保证节点电压有可行解的前提下, 可求得配电网网络各线路最大传输功率, 进一步可得到配电网网络各线路末端节点的最大负荷功率, 给实施配电网实时运行管理提供可靠的数据。对于传输功率较小的路径, 在负荷增加时, 其末端节点便是电压最易降低点, 那么在实时配电网重构中, 就要对其增加的负荷进行转移, 以保证配电系统可靠运行。

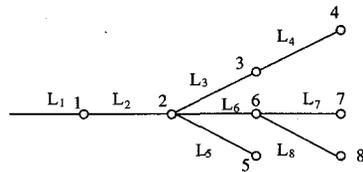


图 2 单端供电配电网
Fig.2 Distribution network of single-ended power

如图 2 所示的单端供电配电网, 它的上一级输电线路为 L_1 , 节点 1 为变电站母线节点, 是配电网的电源端。线路 L_2 的首端为节点 1, 节点 2 是它的末端, 线路 L_2 的传输功率由其末端节点 2 的负荷功率决定, 节点 2 又是它后面线路 L_3 、 L_5 和 L_6 的首端, 线路 L_3 、 L_5 和 L_6 的传输功率分别由它们的末端节点 3、5、和 6 的负荷功率决定, 以此类推, 可求出配电网所有线路传输功率。基于节点电压可行解, 当负荷增加时, 由潮流计算可求得配电网中每一传输线路的最大传输功率。只有当线路的传输功率小于等于其最大传输功率时, 配电网可靠运行。

2 配电网重构的数学模型

2.1 节点电压指标

在有 N 条线路的辐射形配电网中, 令其第 i 线

于潮流可行解存在的最大负荷功率与原网络节点负荷功率的比较。以线路的最大传输功率,对配电网各支路优化组合,实现配电网重构。

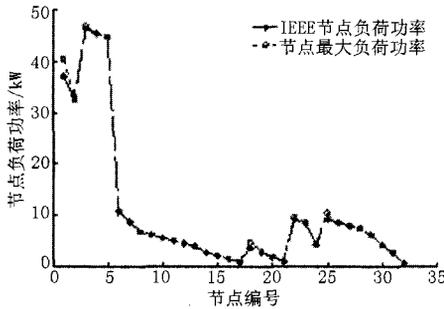


图4 节点最大负荷功率

Fig.4 Bus maximum power

表1 结果比较

Tab.1 Results of configuration

状态	打开支路	功率损耗/kW	电压偏差	最低电压/p.u
IEEE	33-34-35-36	211.22	0.024 89	0.912 3
重构后	7-14-10-16-37	148.29	0.012 18	0.923 8

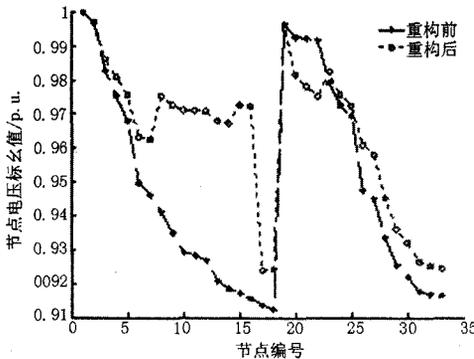


图5 节点电压

Fig.5 Bus voltage

在图4中,在节点12、13、14、15、16和17曲线重合,表明这些节点其负荷功率已达最大值。节点1、2、18、19、20、21、22、23、24和25曲线相距较远,表明其节点还有一定的负荷裕度,可将增加的负荷在这些节点之间均衡分配。而其余节点两曲线几乎接近重合,表明其节点负荷裕度很小,不可再承受增加的负荷。

由表1可知,配电网经过重构后,网络的损耗降低了29.8%,这是由于网络结构的变化使负荷分布更加均匀,负荷的均衡分布可以使功率在传输过程中损耗降低,使各节点潮流计算的电压与节点理想电压差值减小,重构后节点电压最低值比重构前电压最低值提高了11.5%。

节点电压的下降,主要是由于配电网有限的可利用无功功率,配电网重构减小了线路无功功率的流动,减小了线路功率损耗,提高了节点电压。由图5可知大部分节点的电压值较重构前提高了。

5 结论

(1) 以配电网潮流计算为基础,节点电压可行解存在是配电网稳定运行的必要条件,以节点电压可行解存在为前提,以输电线路的最大传输功率为重构方法,使配电网负荷分布均衡,重构后的配电网节点电压得到了提高,节点电压的偏差和网损得以减小。

(2) 提出了用节点负荷因子(LSF)来决策辐射型配电网线路最大传输功率,找出网络最薄弱的路径,这种方法是在原网络基础之上寻找最薄弱路径,利用支路交换法,以减少电压偏差和网损为目标函数,在重构时开关操作次数少,在实际使用时简捷可行。

参考文献

[1] Kashem M A, Jasmon G B, Ganapathy V. A New Approach of Distribution System Reconfiguration for Loss Minimization[J]. Electrical Power and Energy Systems,2000,22: 269-276.

[2] 余健明,蔡丽敏,杨文字.基于提高系统可靠性降低网损的配电网重构[J].电工技术学报,2004,19(10): 70-74.
YU Jian-ming, CAI Li-min, YANG Wen-yu. Distribution Network Reconfiguration for System Reliability Improvement and Power Loss Reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(10): 70-74.

[3] 邓佑满,张伯明,相年德.配电网重构的改进最优流模式算法[J].电网技术,1995,19(7): 47-50.
DENG You-man, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. An Improved Optimal Flow Pattern Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Power System Technology, 1995, 19(7): 47-50.

[4] Matar Y E E, Hobeila N Y. A Heuristic Algorithm for Electric Distribution Networks Optimal Feeder Configuration Using Geographic Information System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1232-1237.

[5] 张栋,张刘春,傅正财.配电网重构的快速支路交换算法[J].电网技术,2005,29(9): 82-85.
ZHANG Dong, ZHANG Liu-chun, FU Zheng-cai. A Quick Branch-exchange Algorithm for Reconfiguration of Distribution Networks[J]. Power System Technology,

- 2005, 29 (9): 82-85.
- [6] Jeon Y J, Kim J C. An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large Scale Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (4): 1070-1078.
- [7] 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): 65-67.
LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Genetic Algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (2): 65-67.
- [8] 屠强, 郭志忠. 辐射型配电网重构的二次电流矩法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (16): 57-61.
TU Qiang, GUO Zhi-zhong. The Quadratic Current Moment Method for Radial Distribution Network Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (16): 57-61.
- [9] Kashem M A, Ganapathy V, Jasmon G B. A Novel Approach for Network Reconfiguration Based load Balancing in Distribution Networks[J]. Electric Machines and Power Systems, 2000 (28): 415-431.
- [10] 刘蔚, 韩桢祥. 基于支持向量机的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (7): 48-52.
LIU Wei, HAN Zhen-xiang. Distribution System Reconfiguration Based on the Support Vector Machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (7): 48-52.
- [11] 孙健, 江道灼. 一种多目标配电网网络重构算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 57-61.
SUN Jian, JIANG Dao-zhuo. A New Multi-objective Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (20): 57-61.
- [12] 刘健, 武晓滕, 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.
LIU Jian, WU Xiao-meng, YU Jian-ming. Distribution Network Reconfiguration Considering Load Uncertainty and Dependence[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (12): 54-59.
- [13] 刘健, 徐精求, 董海鹏. 配电网静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 17 (27): 26-30.
LIU Jian, XU Jing-qiu, DONG Hai-peng. Security Analysis of Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 17 (27): 26-30.
-
- 收稿日期: 2008-06-19; 修回日期: 2008-10-20
- 作者简介:
伍利(1970-), 女, 博士, 研究方向为电力系统规划与运行; E-mail: wuli@xaut.edu.cn
姚李孝(1962-), 男, 博导, 研究方向为电力系统规划与运行;
彭金宁(1971-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统发电与调试.
-
- (上接第 14 页 continued from page 14)
- WANG Tong-wen, GUAN Lin. Power System Stability Assessment and Rule Extraction Based on Pattern Discovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, (19): 25-31. (in Chinese).
- [16] 郭迅华, 陈国青. 基于 XML 的通用关联规则挖掘应用模式[J]. 管理工程学报, 2005, (4): 53-59.
GUO Xun-hua, CHEN Guo-qing. An XML-based General-purpose Application Model for Association Rule Mining[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2005, (4): 53-59.
- [17] 张斌, 孙哲. 关联规则技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2007(S1): 63-66.
ZHANG Bin, SUN Zhe. Application of Association Rules Techniques on Power Systems[J]. Power System Technology, 2007, (S1): 63-66.
- [18] 王轶. 基于数据挖掘的机车牵引变流器故障诊断[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
WANG Yi. The Fault Diagnosis of Locomotive Converter Based on Data Mining[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
-
- 收稿日期: 2007-06-09; 修回日期: 2008-07-31
- 作者简介:
聂倩雯(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电综合自动化、电网故障诊断技术; E-mail: Wonderful0305@163.com
高玮(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电综合自动化、电网故障诊断技术.