

负荷随机性对网损计算和配电网重构的影响

刘 栋, 陈允平, 沈 广, 樊友平

(武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

摘要: 首先分析了考虑负荷随机性情况下的配电网网损计算的特点, 指出考虑负荷随机性时的网损期望值通常会大于由负荷期望值计算出的网损。进而以网损期望值最小为目标, 使用支路交换法对恒定电流随机负荷情况下的配电网重构方法进行研究, 以网损对负荷的有功期望值、无功期望值、有功方差、无功方差的导数确定开关交换对。算例表明, 网损期望值最小的重构方案不一定是负荷期望值计算的网损最小的重构方案。该方法对实际配电网重构具有一定的指导意义。

关键词: 配电网重构; 随机负荷; 网损计算; 支路交换法

中图分类号: TM744; TM727.2

0 引言

配电网经济性、可靠性的重构问题一直受到研究和运行人员的关注^[1~15]。目前对经济性指标的研究大多是以运行网损最小为目标, 重构算法有遗传算法、支路交换法、图论、模式识别等^[1,3,5~8,14,15]; 对可靠性指标的研究大多是减少停电次数和停电量。多数对于配电网重构的研究中, 没有考虑负荷的随机变化。配电网重构需要以负荷预测结果为基础。传统配电网重构研究中总是假定负荷是确定的、已知的, 而实际上负荷预测的准确度有限, 这就对重构方案的制定造成了一定的困难。

常见的考虑负荷随机性的潮流分析方法有概率分析法^[12]、模糊分析法和区间分析法^[13]。概率分析法在给定负荷概率的情况下得出潮流的概率分布; 区间分析法根据负荷的可能区间得出潮流的可能区间; 模糊分析法简化了概率分析法的运算难度, 同时又比区间分析法包含更多的概率信息。文献[2]采用区间潮流算法以求得网络有功功率损耗的变化区间, 在假定的概率分布曲线上进行了配电网重构的网损区间优劣评价。传统配电网潮流计算采用恒定功率负荷模型, 计算较复杂, 文献[6,10]中的讨论部分指出忽略负荷的电压特性在某些情况下并不合理。通常, 配电网重构目标对于确定性负荷来说是网损最小, 对于随机负荷来说是网损期望值最小。

本文首先讨论负荷随机性对网损的影响。在考虑负荷随机性的情况下, 以网损期望值最小为目标对配电网重构。算例表明, 在考虑负荷随机性的情

况下, 网损期望值最小的重构方案与仅考虑负荷期望值情况下的最优重构方案不一定相同。

1 3种随机负荷的网损计算简单举例

图1显示的接线图中, 由电压为 V 的母线经过阻抗为 $R+jX$ 的线路给负荷 L 供电。以下分3种情况讨论随机负荷对线损期望值的影响。

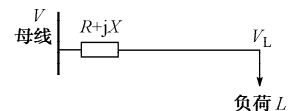


图1 配电网简化接线

Fig. 1 Simplified diagram of distribution network

1) 恒定电流负荷。设负荷电流为随机变量 I_L , 线损期望值为:

$$E(P_{\text{loss}}) = \int_{I_n} |I_L|^2 R f(I_L) dI = R(E^2(|I_L|) + D(|I_L|)) \quad (1)$$

式中: I_n 为负荷电流的变化范围; $f(I_L)$ 为负荷的概率密度函数; $E(|I_L|)$ 为负荷的期望值; $D(|I_L|)$ 为负荷的方差。

显然, 线损期望值比根据负荷期望值计算出来的线损要多一项由负荷的方差引起的修正项。

2) 恒定阻抗负荷。设负荷的阻抗为随机变量 Z_L , 则网损的期望值为:

$$E(P_{\text{loss}}) = R \int_{Z_n} \left| \frac{V}{R+jX+Z_L} \right|^2 f(Z_L) dZ_L \quad (2)$$

对于大多数概率论上经常讨论的对称分布, 网损期望值基本上不等于由负荷期望值计算得到的网损。

3) 恒定功率负荷。设负荷功率为随机变量 $P+jQ$, 线路电流的平方为:

$$|I|^2 = \frac{1}{2(R^2 + X^2)} \left\{ |V|^2 - 2(PR + QX) - \left[(2(PR + QX) - |V|^2)^2 - 4(R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

如果功率是一个对称分布,其功率较大部分对于网损的正贡献要大于功率较小部分对于网损的负贡献,网损期望值会比由负荷期望值计算得到的网损大。很多文献采用忽略电压变化($V_i \approx 1$)的方法来计算网损^[1,7],则网损计算公式为:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) r_i$$

实际上这与恒定电流负荷模型下的网损计算公式相同。

综上所述,考虑负荷随机性的网损期望值,并不等于由负荷期望值计算得到的网损。因此,根据负荷期望值计算得到的配电网重构最优方案,不一定是随机负荷下网损期望值最小的最优方案。

2 随机负荷对配电网网损计算的影响

本文主要针对恒定电流随机负荷进行讨论。以图2所示配电网为例,支路*i*的电流为:

$$\begin{cases} I_{Ri} = \sum_{j \in i} I_{L,Rj} \\ I_{Li} = \sum_{j \in i} I_{L,Lj} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{Ri} , I_{Li} 为支路*i*电流的实部和虚部的随机变量。

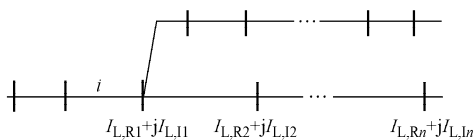


图2 随机负荷的支路网损计算

Fig. 2 Line loss calculation of stochastic loads

网损为:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j \in i} I_{L,Rj} \right)^2 + \left(\sum_{j \in i} I_{L,Lj} \right)^2 \right] R_i \quad (5)$$

式中: n 为支路数; $I_{L,Rj}$ 和 $I_{L,Lj}$ 分别为负荷电流实部和虚部的随机变量。

网损期望值为:

$$\begin{aligned} E(P_{\text{loss}}) = & \sum_{i=1}^n R_i \left\{ \left(\sum_{j \in i} \bar{I}_{L,Rj} \right)^2 + \left(\sum_{j \in i} \bar{I}_{L,Lj} \right)^2 + \right. \\ & \sum_{j \in i} D(I_{L,Rj}) + \sum_{j \in i} D(I_{L,Lj}) + \\ & \left. 2 \sum_{m,k \in i, m \neq k} \left[R_{\text{ela}}(I_{L,Rm}, I_{L,Rk}) + \right. \right. \\ & \left. \left. R_{\text{ela}}(I_{L,Lm}, I_{L,Lk}) \right] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $R_{\text{ela}}(x, y)$ 为*x*和*y*的协方差。在负荷相互独立的情况下协方差为0。

相互独立的随机负荷的网损期望值比确定负荷的网损值多了方差修正项,且方差和网损期望值是线性关系。为了减小负荷期望值产生的网损,应选择负荷少、线路电阻小的供电路径;对于方差产生的网损,只需选择电阻最小的路径。

3 考虑负荷随机性的配电网重构

以网损期望值最小为目标对配电网进行重构时,需要考虑随机负荷的影响。由以上分析可知,根据负荷期望值计算出的网损值,不等于随机负荷造成的网损期望值。而配电网重构的目标,又是网损期望值最小。这就使重构方案的求取变得复杂。

3.1 负荷为恒定电流负荷且负荷相互独立情况下的重构

以支路交换算法为例来说明随机负荷下的配电网重构特点。对于2条用联络开关隔离的支路*A*和支路*B*,其网损分别为:

$$\begin{cases} E(P_{\text{Aloss}}) = \sum_{i \in A} [(\bar{I}_{Ri}^2 + \bar{I}_{Li}^2) + D(I_{Ri}) + D(I_{Li})] R_i \\ E(P_{\text{Bloss}}) = \sum_{i \in B} [(\bar{I}_{Ri}^2 + \bar{I}_{Li}^2) + D(I_{Ri}) + D(I_{Li})] R_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_{Ri} , I_{Li} 分别表示支路*i*的有功和无功电流。

假定从支路*A*转移负荷 $I_{\text{trans}} = I_{\text{transR}} + jI_{\text{transL}}$ 到支路*B*,则开关交换后的网损为:

$$\begin{aligned} E(P_{\text{loss}}) = & \sum_{i \in A} \left[(\bar{I}_{Ri} - \bar{I}_{\text{transR}})^2 + (\bar{I}_{Li} - \bar{I}_{\text{transL}})^2 + \right. \\ & D(I_{Ri}) - D(I_{\text{transR}}) + D(I_{Li}) - \\ & \left. D(I_{\text{transL}}) \right] R_i + \sum_{i \in B} \left[(\bar{I}_{Ri} + \bar{I}_{\text{transR}})^2 + \right. \\ & (\bar{I}_{Li} + \bar{I}_{\text{transL}})^2 + D(I_{Ri}) + D(I_{\text{transR}}) + \\ & \left. D(I_{Li}) + D(I_{\text{transL}}) \right] R_i + \\ & (\bar{I}_{\text{transR}}^2 + \bar{I}_{\text{transL}}^2) R_{\text{trans}} \quad (8) \end{aligned}$$

式中: R_{trans} 为联络开关与支路*A*上最近负荷间的电阻。

将式(8)对 $\bar{I}_{\text{transR}}$, $\bar{I}_{\text{transL}}$, $D(I_{\text{transR}})$, $D(I_{\text{transL}})$ 在0点求导,可得负荷转移方向的估计。当

$$\frac{\partial E(P_{\text{loss}})}{\partial \bar{I}_{\text{transR}}} \bigg|_0 = 2 \left(\sum_{i \in B} I_{Ri} R_i - \sum_{i \in A} I_{Ri} R_i - R_{\text{trans}} \right) < 0$$

时,说明将有功负荷从支路*A*移向支路*B*,可以降低有功期望值引起的网损,反之亦然。对于 $\bar{I}_{\text{transL}}$, $D(I_{\text{transR}})$, $D(I_{\text{transL}})$ 也有同样的结论。当这4项同号时,说明负荷转移方向是确定的,可尝试转移一个馈线段上的负荷(即将联络开关与最近的支路开关作为交换开关对)后网损是否降低来确定是否转移负荷。当这4项不同号时,需要尝试2个方向的转

移负荷。如果在某个方向上尝试转移负荷不能使网损减小,则停止尝试该方向上的负荷转移。这里采用的尝试法与文献[7,8]有所区别,文献[7,8]中计算负荷转移量的方法可能会因为负荷不连续、有功和无功的转移方向不同等原因而难以确定交换开关对。当所有联络开关都无法找到能够降损的交换开关时,可以近似认为配电网结构达到最优。

当联络开关附近的负荷较大时,即 $\bar{I}_{\text{trans}}$ 较大,极限情况为 $\bar{I}_{\text{trans}}$ 对应的 2 条支路上的原有负荷可以忽略,则该负荷应选择电阻较小的支路供电。因此, $\bar{I}_{\text{trans}}$ 较大时 $\bar{I}_{\text{trans}}$ 的最佳供电路径和方差 $D(\bar{I}_{\text{trans}})$ 是一致的,此时负荷随机性对最优重构方案影响不大。从这一点也可以看出负荷的方差项对重构的影响不会太大,因为大负荷才会具有较大的方差。

在负荷之间不相互独立的情况下,其协方差不一定为 0。这时可以仍然仿照以上关于随机负荷情况下交换支路法的推导进行计算。

3.2 随机负荷与变化负荷的相似性

由于频繁操作配电网中的开关会引起设备老化,因此配电网重构需要考虑在某个时间段内负荷的变化情况。考虑负荷的变化特性时,可以对设备操作损失和网损进行综合优化^[9],也可以给定重构的时间间隔而对该时间段内以网损最小为目标进行重构。第 2 种情况即给定每个负荷随时间的变化曲线,而认为负荷在每个时刻是确定的,如何使配电网网损最小的重构问题。如果负荷变化曲线给定,需要计算配电网的某个时段内的网损最小结构,这种情况下可以定义负荷的期望值 $E(I_L)$ 、方差 $D(I_L)$ 和协方差 $R_{\text{ela}}(I_{L1}, I_{L2})$ 分别为:

$$E(I_L) = \int_0^T I_L(t) dt / t$$

$$D(I_L) = \int_0^T (I_L(t) - E(I_L))^2 dt$$

$$R_{\text{ela}}(I_{L1}, I_{L2}) = \int_0^T (I_{L1}(t) - E(I_{L1})) \cdot (I_{L2}(t) - E(I_{L2})) dt$$

这样,变化负荷与随机负荷的网损计算完全一致。此时协方差很可能不为 0,因此可以说这是考虑负荷之间强相关情况下的重构。由于负荷之间强相关,导致用于表示配电网结构的参数急剧增加,普通基于推理的算法不容易应用,可考虑使用遗传算法等人工智能方法进行优化。

4 算例

以文献[6]中的 12.66 kV 33 母线作为算例进行配电网重构计算。关于该配电网的确定性负荷下重构方案已讨论很多,当负荷为恒定功率模型时,其网损最小的最优重构方案为打开 6-7,8-9,13-14,

24-28 和 31-32 间的开关,如图 3 所示,此时网损为 139.55 kW。以标准差与期望值的比值来定义预测精度。一般来说,小负荷的统计特性差,随机性强,单个用电设备占总负荷的比重大,因此预测精度低,大负荷的预测精度较高。但大负荷时标准差有名值要比小负荷大。假定该系统中的随机负荷的有功标准差和无功标准差均按 $f(x) = 50x/(x+50)$ 计算,其变化曲线如图 4 所示。当每个负荷均服从正态分布时(忽略负荷为负数的情况),假定负荷为恒定功率负荷,采用蒙特卡罗方法对该结构进行 1 000 次模拟计算,其网损期望值为 142.45 kW。可见随机负荷对网损是有影响的,并且一般来说比确定性负荷下的网损要大。

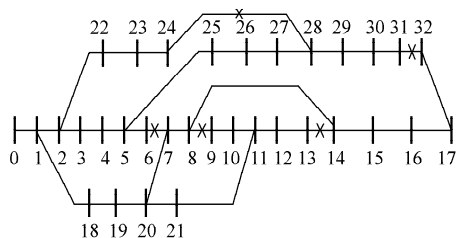


图 3 32 节点配电网

Fig. 3 Thirty-two nodes distribution network

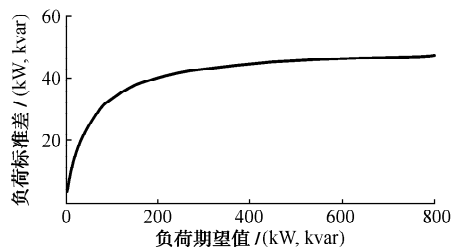


图 4 负荷标准差变化曲线

Fig. 4 Variance curve of loads

如果忽略负荷节点的电压变化,将负荷功率除以电压 12.66 kV,得到负荷电流。假定负荷为恒定电流负荷。这种情况下按确定性负荷计算得到的最优重构方案也是一样的(同文献[7])。按照 3.1 节的方法进行计算,发现考虑负荷随机性的最优重构方案仍然是打开 6-7,8-9,13-14,24-28 和 31-32 间的开关。

由 3.1 节分析可知,当联络开关附近的某个负荷节点分配给两个支路的两种情况下,其有功期望值和无功期望值造成的网损差别不大,而两条支路的电阻相差较大时,则由负荷的方差引起的网损可能会影响最优重构方案。对于图 3 所示的 33 母线系统,负荷期望值对最优重构方案影响较大,且多数负荷的供电路径已经是电阻最小或相差不大。仅负荷 32 相邻的两条支路电阻相差较大,最优方案中负荷 32 供电路径 A(0-1-18-19-20-7-8-14-15-16-17-

32)距离电源点的电阻是 $10.4672\ \Omega$,而另外一条支路 $B(0-1-2-3-4-5-25-26-27-28-29-30-31-32)$ 的电阻为 $6.6351\ \Omega$,可见支路 A 的负荷比支路 B 轻。

假定负荷 17 的电流实部期望值增大到 $355\ \text{kW}/12.66\ \text{kV}$,导致支路 A 或支路 B 加载负荷 32 时由负荷期望值引起的网损相等,即不考虑负荷随机性时这 2 种结构均为网损最小。若考虑负荷随机性,负荷 32 应该由支路 B 加载。同时,由于支路 B 上增加了负荷,导致负荷 28,29,30,31,32 均应转移到另外一条电阻较小的支路(22-23-24)上。结果在考虑负荷随机性的情况下,网损期望值最小的重构方案为断开 6-7,8-9,13-14,27-28,17-32,闭合其余开关。

5 结语

本文首先针对负荷的 3 种模型讨论负荷随机性对网损计算的影响,进而研究了负荷随机性对于配电网重构的影响。研究表明,根据负荷期望值计算得到的网损,并不等于随机负荷的网损期望值。并且,根据负荷期望值得到的最优配电网重构方案,也不一定是网损期望值最小的最优重构方案,当前者的最优重构方案下负荷的供电路径并非电阻最小时,其最佳重构方案与网损期望值最小方案不一定一致,这对于实际配电网运行具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王成山,王守相. 负荷变化不确定性的配电网重构区间评价方法. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 49—53.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. An Interval Assessment Method for Distribution Network Reconfiguration Considering Load Uncertainty. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 49—53.
- [3] 张鹏,郭永基. 一种新的大规模配电网重构的图论算法. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 25—29.
ZHANG Peng, GUO Yong-ji. A Novel Spectral Partitioning Method for Large-scale Distribution System Feeder Reconfiguration. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18): 25—29.
- [4] 刘健,徐精求,董海鹏. 配电网概率负荷分析及其应用. 电网技术, 2004, 28(6): 67—70, 75.
LIU Jian, XU Jing-qiu, DONG Hai-peng. Probabilistic Load Flow Analysis of Distribution Network and Its Application. Power System Technology, 2004, 28(6): 67—70, 75.
- [5] 刘蔚,韩祯祥. 基于支持向量机的配电网重构. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 48—52.
LIU Wei, HAN Zhen-xiang. Distribution System Reconfiguration Based on Support Vector Machine. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 48—52.
- [6] GOSWAMI S K, BASU S K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization, IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484—1491.
- [7] 张栋,张刘春,傅正财. 配电网重构的快速支路交换算法. 电网技术, 2005, 29(5): 82—85.
ZHANG Dong, ZHANG Liu-chun, FU Zheng-cai. A Quick Branch-exchange Algorithm for Reconfiguration of Distribution Networks. Power System Technology, 2005, 29(5): 82—85.
- [8] 毕鹏翔,刘健,张文元. 配电网重构的改进支路交换法. 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 Network Reconfiguration. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98—103.
- [9] 刘健,徐精求. 考虑负荷变化的配电网动态优化. 继电器, 2004, 32(13): 15—19.
LIU Jian, XU Jing-qiu. Distribution Networks Dynamic Optimization Considering Load Changes. Relay, 2004, 32(13): 15—19.
- [10] BARAN M E, WU F F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725—734.
- [11] 张鹏,王守相. 提高系统可靠性的配电网多目标重构区间方法. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 22—33.
ZHANG Peng, WANG Shou-xiang. Interval Analysis Based Multi-objective Network Reconfiguration for Distribution System Reliability Improvement. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 22—33.
- [12] MELIOPOULOS A P S, COKKINIDES G J, CHAO X Y. A New Probabilistic Power Flow Analysis Method. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 182—189.
- [13] 王守相,王成山,刘若沁. 基于模糊区间算法的配电网潮流计算. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 19—22.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan, LIU Ruo-qin. Fuzzy Interval Algorithm Based Computation of Power Flow in Distribution Network. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 19—22.
- [14] 孙健,江道灼. 一种多目标配电网重构新算法. 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. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 57—61.
- [15] 车仁飞,李仁俊. 一种大规模配电网实时重构新方法. 电力系统自动化, 2004, 29(1): 59—63.
CHE Ren-fei, LI Ren-jun. A New Real-time Reconfiguration Approach to Large Scale Distribution System. Automation of Electric Power Systems, 2004, 29(1): 59—63.

刘 栋(1979—),男,博士研究生,研究方向为电力系统随机问题及随机控制、配电网重构及恢复。E-mail: wanderld@tom.com

陈允平(1945—),男,教授,博士生导师,研究领域为电力系统继电保护、电力电子技术、电力系统运行与控制等。

沈 广(1974—),男,博士研究生,工程师,从事电力系统恢复的研究。

(下转第 55 页 continued on page 55)

Influence of Stochastic Loads on Line Loss Calculation and Distribution Reconfiguration

LIU Dong, CHEN Yun-ping, SHEN Guang, FAN You-ping

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The method for economical reconfiguration of the distribution network is attracting many researchers' attention. This paper firstly analyzes the characteristic of line loss calculation with the stochastic loads taken into account. The result shows that considering the stochastic characteristic of loads, the expected value of the line loss is generally larger than that calculated by the expected value of loads. Furthermore, an algorithm based on the branch-exchanging method is proposed to minimize the expected value of the line loss under the condition of stochastic constant current load. The pair of exchanged switches is determined by the differential coefficient of line loss to the expected value of active power, reactive power, active variance and reactive variance. Test results indicate that by considering stochastic loads the optimal reconfiguration scheme of minimal expected value of line loss is not always the same as that of minimal line loss. The proposed method is instructive for actual reconfiguration in a distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50477018) and Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2005ABA289).

Key words: distribution reconfiguration; stochastic load; line losses calculation; branch-exchanging method