

# 基于概率密度函数的对称电压凹陷预测方法

曾 智, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**提出了基于对线路上故障概率密度函数积分的方法, 从而对系统网络中发生三相对称短路故障时所关心节点的电压凹陷幅值和一定时间内的发生频次这两个特征量进行预测, 并由此对电压凹陷在网络中的传递进行分析。再根据系统网络的阻抗矩阵 $Z$ , 建立网络对应的电压凹陷矩阵, 并由电压凹陷矩阵提供的信息, 从而减小在网络中需要计算的线路数。最后以一个实际系统作为算例进行了计算和分析, 仿真结果证明了上述算法的有效性和优越性。

**关键词:**故障概率密度函数; 电压凹陷; 电能质量

**Abstract:** A new analytical method for predicting the features of the balanced voltage sags is proposed. The features include the magnitude and the frequency of the balanced voltage sags. Based on this method, the transfer of the voltage sag in HV networks can be analyzed. Furthermore, according to the impedance matrix of positive sequence, voltage sag matrix can be easily established. Based on the information of the voltage sag matrix, the number of the lines which should be calculated can be decreased. Finally taking a real system for example, the simulation results show the effectiveness and the significant advantage of this method.

**Key words:** fault probability function; voltage sag; power quality.

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)02-0072-03

现代化供电侧与用电户最重要且不可回避的电能质量问题就是电压凹陷。IEEE 定义电压凹陷为: 供电系统中某点的工频电压有效值突然下降为额定值的 10% 至 90%, 并在随后的 10 ms 至 1 min 短暂持续期后恢复正常<sup>[9]</sup>。在影响电能质量的各种现象中, 电压凹陷问题是造成电压敏感设备不能正常工作的最重要原因。电压凹陷的特点是影响面大, 从而带来的经济损失大, 危害突出。电压凹陷主要会造成程序逻辑控制器 PLC 误动作, 调速装置失灵, 以及计算机系统丢失数据等危害, 从而对各类敏感用户造成大量经济损失。设备对电压的敏感程度越高, 电压凹陷所造成的危害就越大。严重的电压凹陷则可能产生巨大的经济损失甚至人员伤亡。发生电压凹陷原因可能有电网系统和用户用电两方面。系统方面原因一般包括由网络中远距离的节点各种短路故障, 感应电动机启动或者变压器激磁涌流等。用户原因则包括用户内部短路故障或者冲击性负荷的投运。

## 1 电压凹陷的特征量及其预测

这里关心的是系统网络发生三相对称短路故障情况时对关心节点造成的电压凹陷。在描述短路故障引起的电压凹陷时, 一般使用的是电压凹陷幅值, 发生频次以及持续时间这三个特征量, 它们之间是相

互关联的。凹陷幅值即为电压幅值偏离额定值的最大值, 它主要与节点短路故障发生的位置和类型有关, 发生频次是指针对某一负荷节点一定时间内一定凹陷程度的电压凹陷次数, 它与相应凹陷程度对应的凹陷域和凹陷域内线路的故障率有关, 电压凹陷持续时间是指出凹陷发生到结束之间的时间, 它主要取决于故障保护的类型。这里主要关心的电压凹陷特征量是针对某负荷节点电压凹陷幅值, 以及一定时间内电压凹陷的发生频次。

电压凹陷幅值和发生频次这两个特征量与电压凹陷在电网中的传递密切相关。当电网系统中任意节点发生三相对称短路故障时候, 故障节点的电压标么值降为 0, 即发生幅值为 1 的电压凹陷。而与故障节点相邻的各个节点也会发生幅值程度不一的电压凹陷。

针对某一节点的电压凹陷幅值以及一定时间内凹陷发生频次这两个特征量的预测国外许多学者对此进行了研究。主要的方法包括: 以概率论数理统计理论为基础的蒙特卡罗仿真法<sup>[2]</sup>。根据随机产生一组随机信息进行预测, 该方法能较好地反映了电力系统的随机性, 主要缺点在于仿真计算量大, 占用计算机存储空间过大。临界距离法<sup>[4][5]</sup>提出了凹陷域的概念, 指出在凹陷域内的短路故障会造成相应的电压凹陷, 该方法计算简单并适合辐射状网络的计算, 但

并不适用与复杂环网。而针对环网的故障点法<sup>[8]</sup>, 同样针对凹陷域, 根据对网络在选取的多个故障点进行故障仿真。但最大问题是故障点的选取只能依靠人工选择和经验, 并没有固定的法则。

针对三相对称短路故障, 提出以线路故障位置为变量的故障率密度函数对线路进行积分, 从而得到所关心负荷节点一定时间内发生的电压凹陷幅值以及电压凹陷发生频次的方法。再根据网络系统的阻抗矩阵, 得到电压凹陷矩阵<sup>[1]</sup>, 并根据电压凹陷矩阵所提供的信息, 进一步减少需要计算的线路。与前所提方法相比<sup>[2,4,5,8]</sup>, 这里提出的方法不仅适用于环型网络, 且大大简化了计算步骤。

## 2 电压凹陷幅值和频次预测方法

根据高压环网的特点, 略去电阻, 线路阻抗参数均以纯电抗表示, 且故障前网络中所有节点的电压标幺值均为 1。

在上述两个设定下, 当网络任意节点  $g$  发生三相对称短路故障时, 节点  $g$  的短路“注入”电流  $i_g$  可以表示如下:

$$i_g = -\frac{1}{Z_{gg}} \quad (1)$$

式(1)中,  $Z_{gg}$  为网络阻抗矩阵第  $g$  行第  $g$  列元素, 也即为网络节点  $g$  的自阻抗。

此时网络另一任意节点  $k$  的电压可以表示为:

$$V_k = 1 - \frac{Z_{kg}}{Z_{gg}} \quad (2)$$

式(2)中,  $V_k$  为节点  $g$  发生对称短路故障后节点  $k$  的电压, 容易看出相对故障前, 节点  $k$  的电压幅值下降了  $Z_{kg}/Z_{gg}$ , 即节点  $k$  发生了幅值为  $Z_{kg}/Z_{gg}$  的电压凹陷。 $Z_{kg}$  为系统网络阻抗矩阵对应第  $k$  行第  $g$  列元素, 即表示网络上节点  $k$  和节点  $g$  之间的互阻抗。

一般来说, 由于线路暴露在恶劣的自然环境和天气状况会导致使其有更大的可能发生短路故障。线路  $i-j$  上任意位置  $p$  (可以称之为虚拟节点  $p$ ) 对关心节点  $k$  之间的互阻抗  $Z_{kp}$  和虚拟节点  $p$  的自阻抗  $Z_{pp}$  可以用下式(3)(4)表示:

$$Z_{kp} = (1-\lambda)Z_{ki} + \lambda Z_{kj} \quad (3)$$

$$Z_{pp} = (1-\lambda)^2 Z_{ii} + \lambda^2 Z_{jj} + 2\lambda(1-\lambda)Z_{ij} + \lambda(1-\lambda)Z_{ij} \quad (4)$$

上两式中  $\lambda = Z_{ip}/Z_{pj}$ , 且  $\lambda \in [0, 1]$  表示发生对称短路故障的虚拟节点  $p$  的位置,  $Z_{ij}$  为线路  $i-j$  的

电抗,  $L_{ip}$  为节点  $i$  与虚拟节点  $p$  之间的线路距离,  $L_{pj}$  为虚拟节点  $p$  与节点  $j$  之间的线路距离。再将式(3)和(4)代入式(2), 即可以得到网络上任意线路上任意位置发生三相对称故障时, 节点  $k$  发生的电压凹陷幅值。

根据以上分析, 要进一步对关心节点一定时间内发生一定凹陷幅值程度电压凹陷次数进行预测, 还需要知道任意线路发生对称短路故障的针对位置变量  $\lambda$  的故障概率密度函数, 以  $g(\lambda)$  表示,  $\lambda \in [0, 1]$  表示发生对称短路故障的任意虚拟节点  $p$  的位置, 故障概率密度  $g(\lambda)$  为故障位置变量参数  $\lambda$  的函数。粗略考虑情况下, 可以将  $g(\lambda)$  认为是在线路上均匀分布的。

于是对于关心节点  $k$  来说, 在一定时间内由于任意线路  $i-j$  发生三相对称短路故障而发生凹陷幅值大于  $A$  小于  $B(0 \leq A \leq B \leq 1)$  的电压凹陷次数  $n$  可以表示如下:

$$n = \int_{\lambda=A}^{\lambda=B} G^{-1}(A) g(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

在式(5)中,  $G(\lambda) = Z_{kp}/Z_{pp}$ ,  $Z_{kp}$  和  $Z_{pp}$  由式(3)(4)给出, 如前所述,  $g(\lambda)$  为位置变量的故障概率密度函数, 应该注意,  $G(\lambda)$  和  $g(\lambda)$  均为  $\lambda$  的函数。

根据式(5), 要进一步得到网络所有线路一定故障率情况下发生三相对称短路故障时, 关心节点发生凹陷幅值大于  $A$  小于  $B(0 \leq A \leq B \leq 1)$  的电压凹陷次数  $N$  可以容易得到: 只需要用式(5)逐一计算每条线路得到  $n$ , 再将得到的每一个  $n$  累加起来即为所求的  $N$ 。

## 3 根据电压凹陷矩阵缩小计算范围

一般来说, 在大型系统网络中随着距离的增大, 故障节点对关心负载节点  $k$  不会对造成一个较大幅值的电压凹陷。于是距离负载节点  $k$  过远的节点发生三相对称短路故障时, 可以不予考虑, 也就是说根据式(5)计算关心节点  $k$  凹陷幅值大于  $A$  小于  $B(0 \leq A \leq B \leq 1)$  的电压凹陷次数时某些线路不用计算, 此问题可采用电压凹陷矩阵<sup>[1]</sup>分析如下。

首先设:

$$\beta_{kf} = Z_{kg}/Z_{gg} \quad (6)$$

$\beta_{kg}$  表示节点  $g$  发生三相对称短路故障后, 节点  $k$  的电压凹陷幅值。将每一个节点对应的元素计算就可以形成电压凹陷矩阵如图 1。电压凹陷矩阵对角

线上的元素均为1,它表示任一节点发生三相对称短路故障时,发生故障的节点电压幅值改变量为1。容易看出  $\beta_{kj} \neq \beta_{jk}$ 。

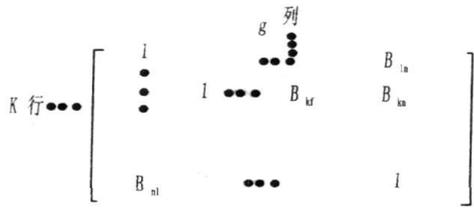


图1 电压凹陷矩阵

由系统的阻抗矩阵直接可以得到如图1的电压凹陷矩阵。在得到系统电压凹陷矩阵以后,对于关心的节点  $k$  来说,需要直接观察第  $k$  行元素。对于任意线路  $i-j$  来说,可以先观察  $\beta_{ki}$  和  $\beta_{kj}$ 。 $\beta_{ki}$  和  $\beta_{kj}$  分别表示节点  $i$  和节点  $j$  发生对称短路故障情况时,关心节点  $k$  发生的电压凹陷幅值。如果  $A \leq \beta_{ki} \leq B$  或者  $A \leq \beta_{kj} \leq B$ ,则此线路  $i-j$  需要按上式(5)计算,反之此线路则不用计算。 $A$  和  $B$  意义如式(5)所示。这样,特别针对大型网络,可以大大减少需要计算的线路数,从而减小了计算量。

#### 4 实验结果

图2所示为某一实际系统。具体接线如图。具体网络阻抗参数都为标么值,表示如下,不计电阻:线路1-2的阻抗参数  $z_{12}=j0.105$ ,同理  $z_{45}=j0.184$ , $z_{24}=j0.08$ , $z_{23}=j0.065$ , $z_{34}=j0.05$ 。线路1-2的长度  $L_{1-2}=33$  km,同理  $L_{4-5}=58$  km,  $L_{2-4}=98$  km,  $L_{2-3}=78$  km,  $L_{3-4}=60$  km。设在各线路上任意一点发生三相对称短路的概率是相等的,即故障概率密度函数  $g(\lambda)$  是在线路上均匀分布的,如图3所示。再设网络中任意每千米线路一年之中发生三相对称短路故障的概率均为0.1次。

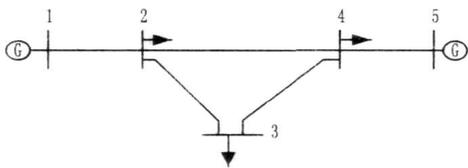


图2 某实际系统接线图

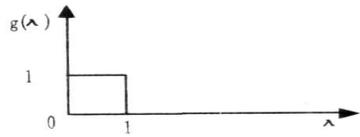


图3 线路上均匀分布的故障概率密度函数

以2节点作为关心节点进行说明。当2节点发生三相对称短路故障时,2节点本身会发生一个凹陷幅值为1的电压凹陷,而与2节点相邻的线路上发生三相对称短路故障时,2节点会发生凹陷幅值小于1的电压凹陷。根据网络的阻抗参数和式(2)、(3)、(4),可以计算网络线路上任意虚拟节点发生三相对称短路故障时,2节点发生的电压凹陷幅值。

进一步要得到2节点一定凹陷幅值一年中发生的次数只需要根据式(5)对每一条线路逐一积分即可。根据前文所述,可以根据电压凹陷矩阵减小运算量。具体分析如下:根据网络阻抗参数可以容易的得到网络的阻抗矩阵,再根据前文所述式(6)等式逐一可得到网络电压凹陷矩阵的每个元素,于是可得到电压凹陷矩阵如图4。

$$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.58 & 0.48 & 0.49 & 0.30 \\ 0.80 & 1.00 & 0.82 & 0.84 & 0.51 \\ 0.75 & 0.93 & 1.00 & 0.93 & 0.57 \\ 0.71 & 0.89 & 0.86 & 1.00 & 0.61 \\ 0.38 & 0.48 & 0.46 & 0.54 & 1.00 \end{pmatrix}$$

图4 系统电压凹陷矩阵

针对2节点,观察第2行。如需要计算2节点  $0.9 \leq k \leq 1$  电压凹陷幅值发生的频次,只需要计算线路1-2,线路2-3,线路2-4即可。根据如图4电压凹陷矩阵,观察第2行第4,5列原素,可以发现线路4-5上的4节点和5节点发生三相对称短路故障,2节点发生的电压凹陷幅值分别为0.84和0.51,均不在  $[0.9, 1]$  中,不需要对线路4-5进行积分计算,同理可以分析线路3-4。2节点其它电压凹陷幅值情况分析完全类似。根据电压凹陷矩阵,可以减小一定的计算量。2节点发生各程度电压凹陷幅值在一年中发生的频次如表1所示。(下转第94)

燃料重油均应注意采用较低的加热温度和加热强度。

2)煤焦油的燃烧特性和一般燃料重油特性不尽相同,煤焦油的热解和燃烧时挥发份与水份同时析出。因此,能否利用煤焦油简单替代重油在直接在重油燃烧器上燃烧还有待进一步研究。

3)对煤焦油燃烧技术仍需进一步的深入研究。在实际工程技术中,对燃料输送过程中燃烧器喷嘴的改进和配风是提高煤焦油燃烧效率的重要途径。

### 参考文献

- [1] 于连海. 煤基合成燃料油的研究与开发[M]. 杭州:浙江大学, 2005.
  - [2] 何宏舟, 吴德华. 重油燃烧技术的现状与展望[J]. 锅炉技术, 2004, 35(3): 40-44.
  - [3] 张同翔. 合成燃料油的开发[M]. 杭州:浙江大学, 2004.
- (收稿日期: 2007-11-15)

(上接第74页)

表1 2节点电压凹陷各程度幅值发生频次

2节点发生的电压凹陷幅值 K	需要计算的线路	一年发生的次数
$0.9 \leq K \leq 1$	1-2, 2-3, 2-4	9.4
$0.8 \leq K \leq 0.9$	1-2, 2-3, 2-4, 3-4	12.1
$0.7 \leq K \leq 0.8$	4-5	2.3
$0.6 \leq K \leq 0.7$	4-5	1.9
$0.5 \leq K \leq 0.6$	4-5	1.1

### 参考文献

- [1] Quaia, S.; Tosato, F. A method for analytical voltage sags prediction [J]. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna Volume 4, Issue.
- [2] 宋云亭, 郭永基, 张瑞华. 电压骤降和瞬时供电中断概率的蒙特卡罗仿真[J]. 电力系统自动化, 2003 27(18): 21-24.
- [3] 张伯明, 高景德. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [4] 李妍, 段余平, 邱军, 熊信良, 尹项根. 环网配电网电压暂降分析的临界比距法[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 51-55.
- [5] Bollen M H J. Fast assessment method for voltage sags in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6): 1480-1487.
- [6] Olguin, G.; Bollen, M. H. J. Stochastic assessment of unbalanced voltage dips in large transmission systems [J]. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna Volume 4, Issue, 23-26 June 2003 Page(s): 8 pp. Vol. 4: 23-26.
- [7] E. E. Juarez; A. Hernandez. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 3, July 2006, 1493-1500.
- [8] Lim, Y. S.; Strbac, G. Analytical approach to probabilistic prediction of voltage sags on transmission networks [J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings - Volume 149, Issue 1, Jan 2002, 7-14.
- [9] IEEE Std 1159-1995. IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality New York: IEEE Press, 1995.

## 5 结论

上面针对实际情况中较易发生的三相对称短路故障所造成的电压凹陷,提出了对线路上故障概率密度函数积分的方法,从而对一定时间内电压凹陷的幅值和发生的频次进行预测,以及进一步分析电压凹陷在更大范围电网中传递。再由电压凹陷矩阵提供的信息,减小需要计算的线路数。电压凹陷矩阵直接可以由网络节点阻抗矩阵得到。所提方法与前文所提临界距离法<sup>[4][5]</sup>相比的优势在于本方法适应于实际中更常见的环形网络。而与同样针对环网的故障点法<sup>[8]</sup>相比,本方法优点在于完全不需要对故障点发生位置进行预设。与蒙特卡罗仿真法<sup>[2]</sup>相比,本方法优点在于大大简化了计算过程和步骤。

所提方法需要进一步研究和探讨的问题包括:仅考虑了网络系统发生三相对称短路故障,而没有考虑实际中更常见的各种不对称短路故障的情况。综合考虑各种对称与不对称短路故障情况所造成的电压凹陷以及根据此方法对电压凹陷的特征量的预测值进一步对电压凹陷造成的经济损失性评估是值得更深入探讨的问题。

### 作者简介:

曾智(1981~),男,硕士研究生,研究方向为电能质量与电力市场。

杨洪耕(1949~),男,博士,教授,博士生导师,长期从事电能质量监测和控制技术方面的教学和研究工作。

(收稿日期: 2008-01-24)