

一种精确确定电压暂降凹陷域的算法

常学飞, 田立军, 秦英林

(山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 提出一种基于节点阻抗矩阵确定电压暂降凹陷域的算法, 根据电压暂降幅值与传输线故障距离的解析关系式, 计算得到各种短路故障情况下各电压限值对应的临界故障点。对任意给定网络参数的电力系统, 可确定各种短路故障情况下不同电压限值对应的电压暂降凹陷域。并在此基础上考虑电压暂降持续时间、相位跳变等因素, 对电压暂降凹陷域进行修正, 从而更加精确地确定凹陷域。利用该算法对 IEEE 39 节点标准测试系统进行凹陷域分析, 并传统故障点法得到的结果进行比较, 验证了算法的精确性和实用性。

关键词: 短路故障; 电压暂降; 凹陷域; 凹陷域修正

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)04-0064-05

0 引言

电压暂降(voltage sag)是指供电电压均方根值在短时间突然下降到额定值的 90 %~10 %、典型持续时间为 0.5~30 个周期的一种现象。近年来, 随着可编程控制器、调速电机、计算机等对电压暂降敏感设备的广泛应用, 电压暂降已成为电能质量中最为突出的问题^[1-3]。所谓凹陷域是指系统中发生故障引起电压暂降, 因而使所关心的某一点敏感性负荷不能正常工作的故障点所在区域^[4]。电压暂降凹陷域分析是电压暂降综合评估的前提, 为电网设计、规划和重构提供必要的数据基础。

凹陷域分析属于电压暂降评估的研究范畴, 分析方法现有实测统计法和随机预估法 2 类^[5]。实测统计法^[6-8]合理的精确度需要很长的测量周期, 且需要安装监测设备, 成本较高。随机预估法有临界距离法和故障点法 2 种常用的方法, 但两者都存在局限性。临界距离法^[9-10]对辐射型网络简单适用, 但不适用于环网。故障点法^[11-13]较高的精确度需要设置较多的故障点, 计算量也较大, 并且对如何合理地设置故障点数目和位置至今没有统一标准。而且这 2 种凹陷域分析方法一般仅考虑电压暂降幅值的影响。

针对上述问题, 本文提出一种基于节点阻抗矩阵精确确定凹陷域的算法, 根据电压暂降幅值对传输线故障距离的解析式, 计算得到各种短路故障情况下各电压限值对应的临界故障点, 利用解析式的连续性, 克服了故障点法盲目地设置离散故障点的缺陷。并在此基础上考虑电压暂降持续时间、相位跳变等特征量的影响, 对由电压暂降幅值得到的凹陷域进行修正, 从而更精确地确定凹陷域。

1 电压暂降解析表达式

电压暂降解析表达式基于节点阻抗矩阵。对于任意给定系统参数的电网, 利用节点导纳矩阵求逆法或支路追加法不难得到正、负、零序节点阻抗矩阵。

电力系统等值网络如图 1(a)所示, 假设 f 为短路故障点, 节点 m 连接敏感性负荷, 即为所关心节点。发生故障时, 应用叠加原理可以将系统分解为正常运行和故障分量 2 个网络, 如图 1(b)(c)所示。

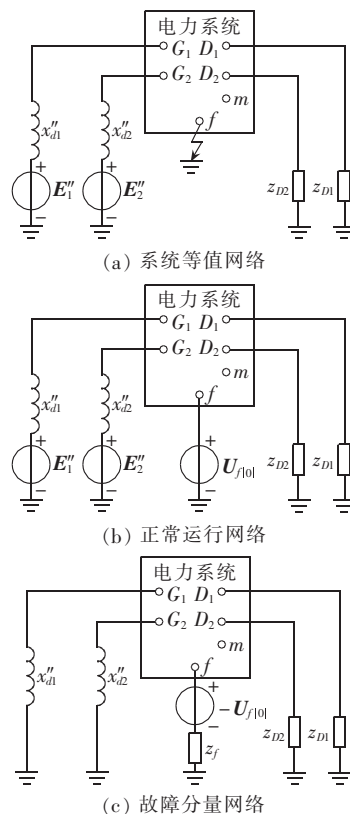


图 1 电力系统等值网络

Fig.1 Equivalent model of power system

收稿日期: 2010-05-20; 修回日期: 2011-02-22

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Y2008F37)

Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province(Y2008F37)

对称故障情况下,由于三相对称,只需写出节点 m 的 a 相电压。由叠加原理,有

$$U_m = U_{m|0|} + \Delta U_m \quad (1)$$

其中, U_m 为 f 处三相短路故障时节点 m 的电压; $U_{m|0|}$ 为正常运行情况下节点 m 的电压(潮流计算可得); ΔU_m 为故障分量网络节点 m 的电压。

由故障网络节点阻抗矩阵元素 Z_{mf} 、 Z_{ff} 的物理意义,有

$$\Delta U_m = -I_f Z_{mf} \quad (2)$$

$$\Delta U_f = -I_f Z_{ff} \quad (3)$$

其中, I_f 为短路电流, $-I_f$ 为故障点 f 的注入电流; ΔU_f 为故障分量网络 f 处的电压。

故障分量网络中,有

$$\Delta U_f = -U_{f|0|} + I_f z_f \quad (4)$$

其中, $U_{f|0|}$ 为正常运行情况下 f 处的电压; z_f 为短路故障时的接地阻抗。

由式(3)(4)得:

$$I_f = \frac{U_{f|0|}}{Z_{ff} + z_f} \quad (5)$$

把式(2)(5)代入式(1)可得:

$$U_m = U_{f|0|} - \frac{Z_{mf}}{Z_{ff} + z_f} U_{f|0|} \quad (6)$$

为了方便计算不妨做如下假设:

a. 正常运行情况下,系统各节点电压标幺值均为 1, 即 $U_{m|0|} = 1$ p.u., $U_{f|0|} = 1$ p.u.;

b. 金属性接地故障,即接地阻抗 $z_f = 0$;

c. 不考虑电压暂降的暂态过程,认为故障瞬间电压降到最低。

根据上述假设条件对式(6)化简,可得:

$$U_m = 1 - Z_{mf} / Z_{ff} \quad (7)$$

不对称故障情况下(以 a 相为特殊相),利用对称分量法,不难推导出节点 m 的各相电压。

单相接地故障(SLGF)情况下:

$$\begin{cases} U_{m,a} = 1 - \frac{Z_{mf(0)} + Z_{mf(1)} + Z_{mf(2)}}{Z_{ff(0)} + Z_{ff(1)} + Z_{ff(2)}} \\ U_{m,b} = \alpha^2 - \frac{Z_{mf(0)} + \alpha^2 Z_{mf(1)} + \alpha Z_{mf(2)}}{Z_{ff(0)} + Z_{ff(1)} + Z_{ff(2)}} \\ U_{m,c} = \alpha - \frac{Z_{mf(0)} + \alpha Z_{mf(1)} + \alpha^2 Z_{mf(2)}}{Z_{ff(0)} + Z_{ff(1)} + Z_{ff(2)}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\alpha = e^{j120^\circ}$; $Z_{mf(1)}$ 、 $Z_{mf(2)}$ 、 $Z_{mf(0)}$ 及 $Z_{ff(1)}$ 、 $Z_{ff(2)}$ 、 $Z_{ff(0)}$ 分别为正、负、零序故障网络节点阻抗矩阵元素。

相间短路故障(ILLF)情况下:

$$\begin{cases} U_{m,a} = 1 - \frac{Z_{mf(1)} - Z_{mf(2)}}{Z_{ff(1)} + Z_{ff(2)}} \\ U_{m,b} = \alpha^2 - \frac{\alpha^2 Z_{mf(1)} - \alpha Z_{mf(2)}}{Z_{ff(1)} + Z_{ff(2)}} \\ U_{m,c} = \alpha - \frac{\alpha Z_{mf(1)} - \alpha^2 Z_{mf(2)}}{Z_{ff(1)} + Z_{ff(2)}} \end{cases} \quad (9)$$

两相接地故障(DLGF)情况下:

$$\begin{cases} U_{m,a} = 1 - \frac{(Z_{mf(1)} - Z_{mf(0)})Z_{ff(2)} + (Z_{mf(1)} - Z_{mf(2)})Z_{ff(0)}}{Z_{ff(0)}Z_{ff(1)} + Z_{ff(1)}Z_{ff(2)} + Z_{ff(2)}Z_{ff(0)}} \\ U_{m,b} = \alpha^2 - \frac{(\alpha^2 Z_{mf(1)} - Z_{mf(0)})Z_{ff(2)} + (\alpha^2 Z_{mf(1)} - \alpha Z_{mf(2)})Z_{ff(0)}}{Z_{ff(0)}Z_{ff(1)} + Z_{ff(1)}Z_{ff(2)} + Z_{ff(2)}Z_{ff(0)}} \\ U_{m,c} = \alpha - \frac{(\alpha Z_{mf(1)} - Z_{mf(0)})Z_{ff(2)} + (\alpha Z_{mf(1)} - \alpha^2 Z_{mf(2)})Z_{ff(0)}}{Z_{ff(0)}Z_{ff(1)} + Z_{ff(1)}Z_{ff(2)} + Z_{ff(2)}Z_{ff(0)}} \end{cases} \quad (10)$$

电压暂降凹陷域分析要计算系统各处发生故障时所关心节点的电压暂降情况,不妨假设在任意线路 $j-k$ 上 f 点短路故障,如图 2 所示。

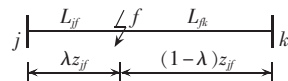


图 2 传输线 $j-k$ 上 f 点故障

Fig.2 Fault position f on line $j-k$

定义故障距离 λ 为

$$\lambda = L_{jf} / L_{jk} \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (11)$$

其中, L_{jf} 为线路起始点 j (文中取编号小的节点作为起始点)到故障点 f 的距离; L_{jk} 为线路起始点 j 到终点 k 的距离。

故障网络的正、负、零序节点阻抗矩阵元素 $Z_{ff(1,2,0)}$ 、 $Z_{mf(1,2,0)}$ 随故障点的变化而变化,无法直接用于计算分析,须将其用正常网络的正、负、零序节点阻抗矩阵元素表示^[14]。

$$Z_{mf(1,2,0)} = (Z_{mk(1,2,0)} - Z_{mj(1,2,0)})\lambda + Z_{mj(1,2,0)} \quad (12)$$

$$Z_{ff(1,2,0)} = (Z_{jj(1,2,0)} + Z_{kk(1,2,0)} - 2Z_{jk(1,2,0)} - z_{jk(1,2,0)})\lambda^2 + (2Z_{jk(1,2,0)} - 2Z_{jj(1,2,0)} + z_{jk(1,2,0)})\lambda + Z_{jj(1,2,0)} \quad (13)$$

其中, Z_{jk} 为节点阻抗矩阵的元素, z_{jk} 为线路 $j-k$ 的阻抗。

把式(12)(13)代入式(7)~(10),可得各种故障情况下所关心节点的电压关于故障距离 λ 的函数解析式,其模值即为敏感负荷电压暂降幅值对传输线故障距离的解析式,其相位即为电压暂降相位跳变对传输线故障距离的解析式。

2 计算各电压限值对应的临界故障点

由电压暂降幅值对传输线故障距离的解析式,确定敏感负荷电压限值对应的临界故障点是凹陷域分析的关键。下面描述具体步骤。

步骤 1 形成正、负、零序节点阻抗矩阵。正、负序网近似相同,但零序网与它们有较大差异,这是因为电力设备的零序阻抗与正、负序阻抗大不相同,且零序网络结构与变压器的接线方式及中性点接地方式密切相关。由于变压器接线方式等因素的影响,网络中部分支路可能无零序电流流通,故有效的零序节点阻抗矩阵的阶数可能小于正、负序节点阻抗矩阵的阶数,但为方便序节点阻抗矩阵元素的调用,生成的零序节点阻抗矩阵要与正序节点阻抗矩阵的阶数相等且节点排列顺序相同。故在生成零序节点阻抗矩阵时,需在程序中加入对变压器接线方式的判断,当变压器的接线方式(如 Y/Δ 接线)使得支路无零

序电流流通时,认为本支路及其下面连接的支路零序阻抗为无穷大。

步骤 2 根据敏感负荷对电压暂降的承受能力,设定电压限值 $U_{\text{thre}}(i)$ 。由于电力系统往往要不断地接入各种不同类型的敏感负荷,它们对电压暂降幅值的承受能力不同,考虑到算法的通用性,往往需要设定多个电压限值。

步骤 3 由电压暂降幅值对传输线故障距离的解析式,可得每条传输线上发生短路故障时引起的关心节点电压暂降幅值的最大值 $U_{\text{sag,max}}$ 和最小值 $U_{\text{sag,min}}$ 。由于电压暂降幅值与传输线故障距离的关系曲线可能非单调, $U_{\text{sag,max}} \setminus U_{\text{sag,min}}$ 不一定在线路的起点和终点。

步骤 4 将关心节点电压暂降幅值对每条传输线故障距离的解析式与每个电压限值 $U_{\text{thre}}(i)$ 进行比较判断:

a. 若 $U_{\text{thre}}(i) \geq U_{\text{sag,max}}$, 那么这条线路全部在该电压限值对应的凹陷域范围内;

b. 若 $U_{\text{thre}}(i) \leq U_{\text{sag,min}}$, 这条线路不在该电压限值对应的凹陷域范围内;

c. 若 $U_{\text{sag,min}} < U_{\text{thre}}(i) < U_{\text{sag,max}}$, 令电压暂降幅值的解析式等于 $U_{\text{thre}}(i)$, 对方程用数值计算的方法求得对应该电压限值的临界故障点。

算法流程图如图 3 所示。

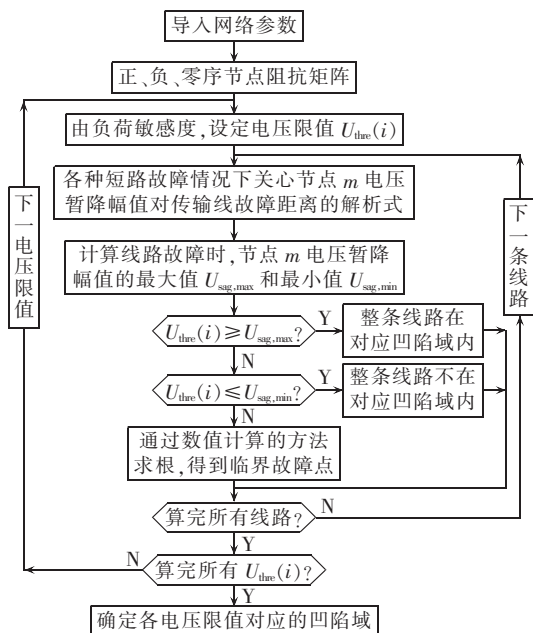


图 3 确定凹陷域的流程图

Fig.3 Flowchart of vulnerable area determination

3 算例分析

算法用于 IEEE 39 节点标准测试系统^[15], 该系统包括 10 个电源、12 个变压器、39 条母线、34 条输电线路, 假定节点 18 连接敏感负荷, 如图 4 所示。

利用 Matlab 6.5 编写程序, 确定单相接地短路故障情况下节点 18 的电压暂降凹陷域。由节点 18 电压暂降幅值对每条传输线故障距离的解析式, 得到

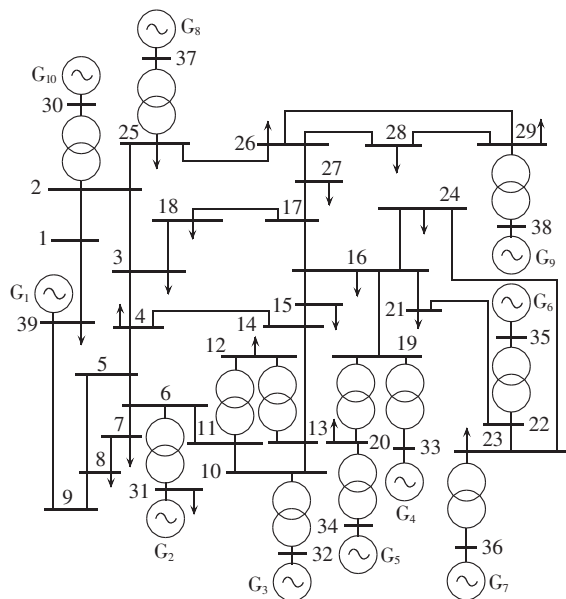


图 4 IEEE 39 节点标准测试系统

Fig.4 IEEE 39-bus test system

每条传输线上与各电压限值相对应的临界故障点。

算例电压限值不妨设为

$$U_{\text{thre}} = [10\%, 30\%, 50\%, 60\%, 70\%, 80\%] \quad (14)$$

将各电压限值对应的临界故障点连接起来, 可以得到与所设定各电压限值相对应的凹陷域示意图, 如图 5 所示。

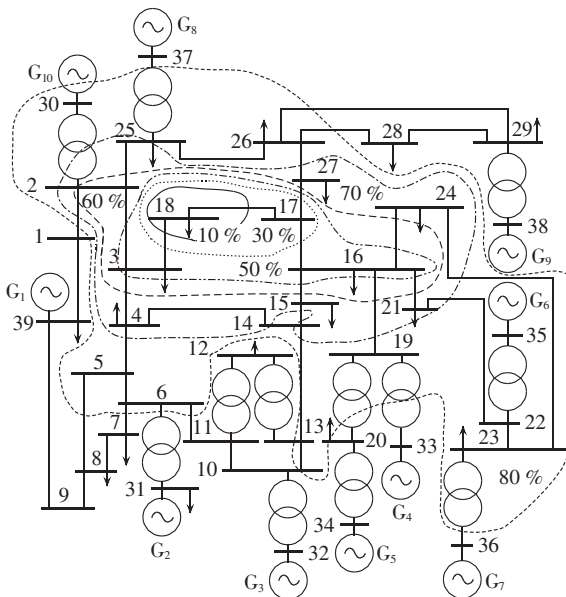


图 5 单相接地故障时节点 18 的凹陷域示意图

Fig.5 Vulnerable area of bus 18 due to single-phase grounding fault

由图 5 可知: 故障点离节点 18 越近, 其电压凹陷程度越深; 低电压等级处发生故障对节点 18 的电压暂降影响较小。

同时得到节点 18 电压暂降幅值(标么值)与每条传输线故障距离的关系曲线, 任取 6 条线路 L_{1-2} 、 L_{2-3} 、 L_{3-18} 、 L_{14-15} 、 L_{16-19} 、 L_{17-27} , 如图 6 所示。

由图 6 可见, 某些电压暂降幅值与传输线故障

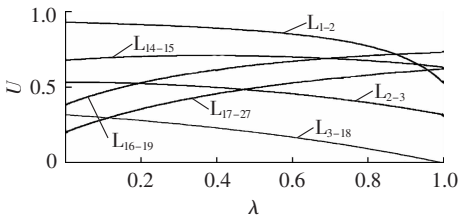


图 6 电压暂降幅值与故障距离的关系曲线
Fig.6 Relation between voltage-sag magnitude and fault distance

距离的关系曲线是非单调的,这时该输电线在某特定电压限值对应的凹陷域内可能有 2 段。如传输线 L_{14-15} 在电压限值为 70 % 时对应的凹陷域内有 2 段,表 1 中有更明确的体现。

为验证算法精确性,本文同时利用传统的故障点法确定节点 18 的凹陷域。由上文所述可知,故障点法每条线路设置的故障点数目和位置不同,得到的结果精度不同,每条传输线故障点数 n 分别设为 1、9 和 99(设故障点在传输线上均匀分布)。

由不同方法得到的结果进行比较,只给出上述 6 条线路在电压限值为 70 % 时对应的凹陷域内的区段,如表 1 所示。表 1 中把每条传输线用 0 到 1 的坐标轴表示, $[0,1]$ 表示整条线路在该电压限值对应的凹陷域内; $[0.9,1]$ 表示传输线坐标轴上 0.9~1 的区间在凹陷域内。

表 1 解析法与故障点法的结果比较

Tab.1 Comparison between analytical approach and fault position method

线路	解析法	故障点法(每条传输线故障点数为 n)		
		$n=1$	$n=9$	$n=99$
L_{1-2}	$[0.9,1]$	$[0.8,1]$	$[0.86,1]$	$[0.89,1]$
L_{2-3}	$[0,1]$	$[0,1]$	$[0,1]$	$[0,1]$
L_{3-18}	$[0,1]$	$[0,1]$	$[0,1]$	$[0,1]$
L_{14-15}	$[0,0.11], [0.66,1]$	$[0,0.2], [0.7,1]$	$[0,0.17], [0.68,1]$	$[0,0.12], [0.66,1]$
L_{16-19}	$[0,0.74]$	$[0,0.7]$	$[0,0.7]$	$[0,0.71]$
L_{17-27}	$[0,1]$	$[0,1]$	$[0,1]$	$[0,1]$

由表 1 可见,每条传输线上设置的故障点越多,故障点法得到的结果越接近解析法得到的结果,从而证明了解析法的精确性。

4 对凹陷域的修正

为了方便阐述计算方法,上述计算假设正常运行时系统各节点电压均为 1 p.u.,无疑将对电压暂降计算造成误差。因此,对实际电力系统进行电压暂降凹陷域分析时,应该先由潮流计算得到各节点的实际电压,再根据上述算法确定凹陷域,以提高计算结果的精确度。

由电压暂降幅值确定各电压限值对应的凹陷域后,还要考虑电压暂降持续时间、相位跳变等特征量的影响,对凹陷域进行修正。

4.1 电压暂降持续时间

电压暂降凹陷域与敏感负荷对电压暂降的承受

能力密切相关。由敏感负荷的 CBEMA(ITIC)曲线可见,负荷敏感度受电压暂降幅值和持续时间的共同影响,不同的持续时间敏感负荷所能承受的电压暂降幅值不同。

不考虑保护的误动作、拒动作及重合闸等因素的影响,电压暂降持续时间即为故障切除时间,由系统开关设备、保护设备的固有动作时间及保护整定时设置的延迟时间决定。由系统的保护信息,可得到系统各处发生故障时的电压暂降持续时间。

算例中,假设由节点 18 处敏感负荷的 ITIC 曲线,得到其对电压暂降的敏感度为电压暂降幅值 80 % 持续时间至少 100 ms 才会导致敏感负荷不能正常工作。假设由系统保护信息,图 5 中线路 L_{22-23} 故障切除时间为 80 ms,则该线路任何区段发生故障都不影响敏感负荷的正常工作,故应将其从凹陷域中去除。这样通过将每条线路各点故障切除时间与敏感负荷对电压暂降的敏感度进行比较,判断该线路各点是否在凹陷域内,即可实现对凹陷域的修正。

4.2 相位跳变

系统电抗与电阻的比值不同,或不平衡暂降向低压系统传递时,电压暂降往往还伴随有相位跳变。上述算例中,由电压暂降相位跳变对故障距离的解析式,计算可得电网各处发生短路故障时敏感负荷的相位跳变情况。图 7 给出算例中上述 6 条线路发生单相接地短路故障时,节点 18 电压暂降相位跳变 δ 与传输线故障距离 λ 的关系曲线。

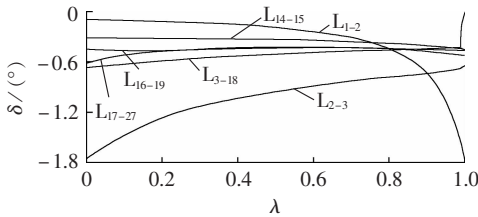


图 7 相位跳变与故障距离的关系曲线
Fig.7 Relation between phase-angle jump and fault distance

算例中,假设节点 18 接入对相位跳变敏感的负荷(如某些以相角为触发信号的电力电子设备),其所能承受的相位跳变临界值为 θ 。当节点 18 的电压相位跳变 $\delta > \theta$ 时,将导致敏感负荷不能正常工作,则其对应的故障发生点需要叠加到电压暂降凹陷域内。

5 结论

本文提出一种精确确定电压暂降凹陷域的算法,克服了传统电压暂降随机预估法的局限性,对任何规模、结构电网的各种短路故障情况都适用。并在此基础上考虑电压暂降持续时间、相位跳变的影响,对先前凹陷域进行修正,从而更精确地确定凹陷域。但本文没有考虑重合闸等对电压暂降持续时间的影响,需要进一步深入分析。

参考文献:

- [1] 肖湘宁,徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术,2001,25(3): 66-69.
XIAO Xiangning,XU Yonghai. Power quality analysis and its development[J]. Power System Technology,2001,25(3):66-69.
- [2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动化设备,2003,23(12):1-4.
YANG Honggeng,XIAO Xianyong,LIU Junyong. Issues and technology assessment on power quality part 3:voltage sags in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(12): 1-4.
- [3] 韩英铎,严干贵,姜齐荣,等. 信息电力与 FACTS 及 DFACTS 技术[J]. 电力系统自动化,2000,24(19):1-7.
HAN Yingduo,YAN Gangui,JIANG Qirong,et al. Electric power in information society and FACTS & DFACTS[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(19):1-7.
- [4] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004: 138-142.
- [5] 李妍,余欣梅,熊信良,等. 电力系统电压暂降分析计算方法综述[J]. 电网技术,2004,28(14):74-78.
LI Yan,YU Xinmei,XIONG Xingen,et al. A survey on calculation and analysis methods of voltage sag[J]. Power System Technology,2004,28(14):74-78.
- [6] DJOKIC S Z,DESMET J,VANALRNE G,et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):375-383.
- [7] DJOKIC S Z,STOCKMAN K,MILANOVIC J V,et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):494-505.
- [8] DJOKIC S Z,MILANOVIC J V,KIRSCHEN D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sag,short interruptions,and under-voltage transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(3):1299-1307.
- [9] BOLLEN M H J. Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,1998,145(1):70-76.
- [10] BOLLEN M H J. Fast assessment methods for voltage sags in distribution system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1996,32(6):1480-1487.
- [11] QADER M R,BOLLEN M H J,ALLAN R N. Stochastic prediction of voltage sags in a large transmission system[J]. IEEE Trans Ind Appl,1999,35(1):152-162.
- [12] AUNG M T,MILANOVIC J V,GUPTA C P. Propagation of asymmetrical sags and the influence of boundary crossing lines on voltage sag prediction[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2004,19(4):1819-1827.
- [13] SANINTA P,PREMRUDEEPPREECHACHARN S. Assessment and prediction of voltage sag in transmission system in northern area of Thailand[C]//Harmonics and Quality of Power,13th International Conference. Wollongong,Australia:[s.n.],2008:1-6.
- [14] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社,2004: 86-92.
- [15] IEEE Committee Report. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1977,96(5):1565-1572.

(编辑:李育燕)

作者简介:

常学飞(1984-),男,山东昌邑人,硕士研究生,主要从事电网电能质量分析与控制方面的研究(E-mail:changxuefei@mail.sdu.edu.cn);

田立军(1964-),男,山东高密人,教授,主要从事电力系统运行与控制、电网电能质量分析与控制等方面的研究;

秦英林(1976-),男,山东郯城人,博士研究生,主要从事电能质量分析与控制、信息处理技术在电力系统中的应用等方面的研究。

Method to accurately determine vulnerable areas of voltage sag

CHANG Xuefei,TIAN Lijun,QIN Yinglin

(School of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061,China)

Abstract: A method based on the impedance matrix is proposed to determine the vulnerable areas of voltage sag. According to the relation between the magnitude of voltage sag and the distance of transmission line fault, the critical point corresponding to each voltage limitation is calculated for different short-circuit faults. The vulnerable areas of voltage sag corresponding to each voltage limitation are determined for different short-circuit faults of power system with arbitrary network parameters. With the consideration of the voltage sag duration and the phase-angle jump, the vulnerable areas of voltage sag are revised more accurately. The proposed method is applied to IEEE 39-bus test system and the resulted vulnerable areas are compared with those by the fault position method, which shows its accuracy and applicability.

Key words: short-circuit; voltage sag; vulnerable area; vulnerable area revise