

考虑沿暂降域边界线故障分布的电压暂降 随机预估方法

张匡翼¹, 刘海涛^{1,2}, 马丙泰¹, 张埕瑜¹

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167)

摘要: 当前实际配电网线路沿线存在多种故障分布, 但现有电压暂降随机预估方法仅单一考虑均匀故障分布。针对沿线不同故障分布特性, 提出了考虑沿电压暂降域边界线故障分布的电压暂降随机预估方法。根据给定的电压暂降阈值, 通过求解发生故障时系统线路的临界点, 计算敏感负荷母线的电压暂降域。在确定的暂降域范围内分析边界线的分布情况, 沿边界线分别采用三类常见线路故障分布(指数分布、正态分布与均匀分布)计算敏感负荷母线的电压暂降频次, 并对预估结果进行对比。最后, 以IEEE30节点标准测试系统为算例, 验证了所提电压暂降随机预估方法的有效性。

关键词: 电压暂降; 随机预估; 边界线; 故障分布; 暂降域

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24153

Stochastic Assessment Method of Voltage Sag Considering the Influence of Fault Distribution Along Boundary Line of Vulnerable Area

ZHANG Kuangyi¹, LIU Haitao^{1,2}, MA Bingtai¹, ZHANG Chengyu¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

Abstract: There are many fault distributions along the actual distribution network lines, but the existing voltage sag stochastic assessment methods only consider the uniform fault distribution. According to the different fault distribution characteristics along the line, a stochastic assessment method of voltage sag was proposed, which considers the influence of fault distribution along boundary line of vulnerable area. The critical points of system lines were calculated according to the given voltage sag threshold and the vulnerable area of bus which connected sensitivity load was formulated. The distribution of boundary lines was analyzed within the determined vulnerable area and three fault distribution (uniform distribution, exponential distribution and normal distribution) along the boundary line were simulated to assess the expected sag frequency. Finally, the proposed method was verified valid by taking the IEEE30 bus system as an example.

Key words: voltage sag; stochastic assessment; boundary line; fault distribution; vulnerable area

随着电力系统中电力电子设备的占比日益趋增, 电压暂降问题受到广泛关注^[1-3]。敏感设备易受电压暂降的影响, 因此准确评估敏感负荷用户侧电压暂降频次是合理制定电压暂降治理措施并减少经济损失的前提。

目前, 电压暂降评估方法主要包括实时监测

法和随机预估法^[4]。实时监测法通过监测装置直接获取电压暂降的所有信息^[5]。然而, 这种方法的缺点在于^[6-7]: 需要很长时间的监测才能得到较高的精度; 提取电压暂降相关特征量可能会十分困难且耗时极长; 难以评估当系统(网络结构、发电机运行方式、负载条件等)发生变化时带来的

基金项目: 国家自然科学基金(51777197); 2018江苏省高校重大项目(18KJA470002)

作者简介: 张匡翼(1996—), 男, 硕士, Email: 419430116@qq.com

通讯作者: 刘海涛(1972—), 女, 博士, 教授, Email: 13851424346@163.com

影响;在全网布置电压暂降监测装置的成本很高。

随机预估法是目前最常用的电压暂降评估方法,其中暂降域是电压暂降随机预估的前提与基础。电压暂降域指系统中的一个区域,在该区域内发生故障会导致敏感负荷节点电压低于某一阈值^[8]。暂降域识别方法主要包括临界距离法、故障点法和解析法。文献[9]提出的临界距离法根据电压分配器模型估计电压暂降幅值,但该方法只适用于简单辐射型网络,不能用于环网^[10]。文献[11]通过在线路上设置若干故障点,利用仿真得到相关节点的暂降特征。故障点法若要达到1%的精度,需要在线路上设置100个故障点,因此,该方法在大规模电网中的应用效率较低,并且如何合理设置故障点没有统一的标准,在故障点选取上具有盲目性。解析法的关键在于求解电压暂降幅值和故障位置的高阶非线性方程。文献[12]通过二次插值法和迭代法求解电压暂降幅值与故障位置的高阶非线性方程,实现全网暂降域的计算。文献[13]利用BP神经网络的非线性拟合特性,建立电压暂降幅值和故障位置的非线性模型,通过对该模型的求解识别暂降域。文献[14]通过判断敏感负荷节点电压曲线是否具有单调性将线路分为两类,并分别采用不同的方法进行求解。

在对暂降域进行准确识别的基础上,可以进一步对相关母线的电压暂降频次进行评估。文献[15]基于信息技术工业协会(information technology industry council, ITIC)曲线预估暂降域中所有母线的电压暂降频次。文献[16]基于电压暂降在网络中的传播特性,结合不同故障类型与线路故障率计算相应的电压暂降特征量。文献[17]通过考虑交叠效应的电压暂降域层级模型,实现了对配电网电压暂降脆弱区域的量化评估。

上述方法在预估电压暂降频次时只考虑沿线路故障均匀分布的情况,而在实际配电网中,由于受到多种外部因素的影响,输电线路沿线各处的故障概率可能并不相同。特别是在预估因部分位于电压暂降域内的边界线故障引起的电压暂降频次时,沿线不同故障概率分布对预估结果的影响较大。针对上述问题,本文提出一种考虑沿暂降域边界线故障分布的电压暂降随机预估方法。首先计算各敏感负荷的电压暂降域,并根据暂降域范围识别系统中所有边界线。然后沿边界线分别采用指数故障分布、正态故障分布

和均匀故障分布,结合故障类型、母线及线路故障率等数据,计算敏感负荷接入母线处的总预估暂降频次并将结果进行对比。最后,在Matlab中以IEEE30标准节点测试系统为算例,对文中方法进行验证。

1 电压暂降域分析

1.1 残余电压计算

短路计算是精确识别暂降域的基础,由故障引起的残余电压值可以通过建立三序阻抗矩阵来进行求解。图1为线路F—T发生故障示意图。

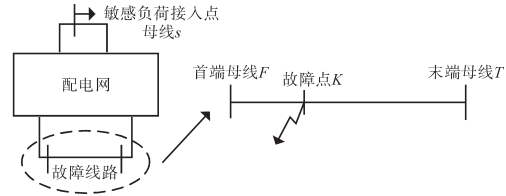


图1 线路F—T故障

Fig.1 Occurrence of fault on F—T

故障点K在线路上的位置用变量p表示,表达式如下:

$$p = \frac{l_{FK}}{l_{FT}} \quad (1)$$

式中: l_{FK} 为线路首端母线F与故障点K之间的距离; l_{FT} 为线路两端母线F和T之间的距离。

故障点K的各序自阻抗表达式如下:

$$Z_{KK}^{012} = (Z_{FF}^{012} + Z_{TT}^{012} - 2Z_{FT}^{012} - Z_C^{012})p^2 + [Z_C^{012} - 2(Z_{FF}^{012} - Z_{FT}^{012})]p + Z_{FF}^{012} \quad (2)$$

式中: Z_{FF}^{012} , Z_{TT}^{012} 分别为线路两端母线F和T的各序自阻抗; Z_{FT}^{012} 为母线F和母线T的各序互阻抗; Z_C^{012} 为线路F—T的各序阻抗。

故障点K与接入敏感负荷的母线s之间的各序互阻抗表达式如下:

$$Z_{sK}^{012} = Z_{sF}^{012} + (Z_{sT}^{012} - Z_{sF}^{012})p \quad (3)$$

式中: Z_{sF}^{012} 为母线s与母线F之间的各序互阻抗; Z_{sT}^{012} 为母线s与母线T之间的各序互阻抗。

故障点K故障前电压表达式如下:

$$V_F^{pf} = V_F^{pf} + (V_T^{pf} - V_F^{pf})p \quad (4)$$

式中: V_F^{pf} , V_T^{pf} 分别为母线F和母线T故障前电压。

文献[15]给出了四类故障时敏感负荷接入母线处的残余电压表达式,由于单相接地短路故障和三相短路故障分别为线路发生最频繁和最严重的短路故障,故文中以计算上述两类典型故障的A相暂降域为例。敏感负荷接入点残余电压的一般表达式为

$$V_{A,s}^f = V_{A,s}^{pf} + \Delta V_A \quad (5)$$

式中: $V_{A,s}^{pf}$ 为母线 s 故障前电压; ΔV_A 为发生不同类型故障时 A 相电压的变化量。

发生单相接地短路故障(A 相)时, ΔV_A 的表达式为

$$\Delta V_A = -\frac{Z_{sK}^0 + Z_{sK}^1 + Z_{sK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pf} \quad (6)$$

发生三相短路故障时, ΔV_A 的表达式为

$$\Delta V_A = -\frac{Z_{sK}^1}{Z_{KK}^1} V_K^{pf} \quad (7)$$

1.2 线路临界点计算

线路临界点是指在发生该点故障时敏感负荷所在母线的残余电压值等于给定电压阈值。因此,将所给电压阈值 V_{th} 替换式(5)中的 $V_{A,s}^f$,此时式(5)就转化为敏感负荷母线电压阈值与故障位置的高阶非线性方程,求解该方程就可以得到线路临界点的位置。在临界点计算中引入判别矩阵 BVI 和 LVI ,能够准确判断线路临界点的个数。由式(5)~式(7)可以计算出系统各母线故障时敏感负荷母线的残余电压幅值。母线残余电压幅值矩阵 V_{mag} 和残余电压差值矩阵 ΔV_{mag} 如下:

$$V_{mag} = \begin{bmatrix} V_s^{L,1} \\ \vdots \\ V_s^{L,i} \\ \vdots \\ V_s^{L,n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta V_{mag} = \begin{bmatrix} \Delta V_{mag,1} \\ \vdots \\ \Delta V_{mag,i} \\ \vdots \\ \Delta V_{mag,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s^{L,1} \\ \vdots \\ V_s^{L,i} \\ \vdots \\ V_s^{L,n} \end{bmatrix} - [V_{th}] \quad (9)$$

式中: $V_s^{L,i}$ 为母线 i 故障时母线 s 的残余电压值; n 为系统中的母线数。

可以根据 ΔV_{mag} 定义母线判别矩阵 BVI ,计算如下:

$$BVI = \begin{bmatrix} BVI_1 \\ \vdots \\ BVI_i \\ \vdots \\ BVI_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$BVI_i = \begin{cases} 1 & \Delta V_{mag,i} \leq 0 \\ 0 & \Delta V_{mag,i} > 0 \end{cases}$$

$BVI_i = 1$ 表示母线 i 位于暂降域内, $BVI_i = 0$ 表示母线 i 位于暂降域外。

由母线判别矩阵可以定义线路判别矩阵 LVI ,计算如下:

$$LVI = \begin{bmatrix} LVI_1 \\ \vdots \\ LVI_j \\ \vdots \\ LVI_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BVI_{F_1} \\ \vdots \\ BVI_{F_j} \\ \vdots \\ BVI_{F_m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BVI_{T_1} \\ \vdots \\ BVI_{T_j} \\ \vdots \\ BVI_{T_m} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: BVI_{F_j} , BVI_{T_j} 分别为线路 j 首端母线 F_j 和末端母线 T_j 的判别值 ($j = 1, 2, \dots, m$); m 为系统中的线路数。

准确计算线路临界点位置的过程如下:

1) 当 $LVI_j = 1$ 时,线路有 1 个临界点,采用插值法和二分法求取变量 p_1 的值,该值满足 $|V_s^f(p_1) - V_{th}| < \varepsilon$,其中 ε 为收敛阈值,则 p_1 为线路临界点的位置。

2) 当 $LVI_j = 2$ 时,首先求取敏感负荷母线残余电压的最大值 V_s^{\max} 。若 $V_s^{\max} \leq V_{th}$,则线路完全位于暂降域内;若 $V_s^{\max} > V_{th}$,则线路有 2 个临界点,采用插值法和二分法求取变量 p_2 和 p_3 的值,满足 $|V_s^f(p_2) - V_{th}| < \varepsilon$ 和 $|V_s^f(p_3) - V_{th}| < \varepsilon$,则 p_2 和 p_3 为线路两个临界点的位置。

2 考虑沿边界线故障分布的电压暂降频次分析

电压暂降域边界线为系统中存在临界点的线路,沿这些线路不同的故障分布将会导致敏感负荷母线的暂降频次发生变化。通常,恶劣的环境和天气条件会导致线路某一部分的故障率往往高于其他位置,这会对相关母线的电压暂降频次估计造成比较大的影响^[18-19]。

根据概率函数的定义,位于暂降域内的线路故障分布概率计算如下:

$$P(p_a \leq p \leq p_b) = \int_{p_a}^{p_b} g(p) dp \quad (12)$$

式中: $g(p)$ 为与沿线故障分布相关的概率密度函数; p_a, p_b 分别为线路暂降域内的任意两个故障点。

如图 2 所示,实际电网中常见 3 种线路故障分布,包括均匀分布、指数分布和正态分布^[20]。

均匀分布的概率密度函数表示为

$$g(p) = 1 \quad 0 < p < 1 \quad (13)$$

指数分布的概率密度函数表示为

$$g(p) = 2e^{-2p} \quad 0 < p < 1 \quad (14)$$

正态分布的概率密度函数表示为

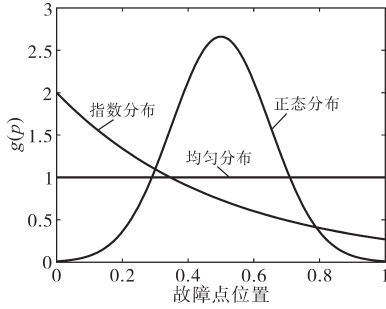


图2 三种故障分布

Fig.2 Three types of fault distribution

$$g(p) = \frac{1}{0.15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-0.5)^2}{0.045}} \quad 0 < p < 1 \quad (15)$$

由于整条线路的故障总数不受沿线故障分布的影响,因此完全位于暂降域内的线路故障,敏感负荷母线处预估暂降频次 ESF_{Cl} 计算如下:

$$ESF_{Cl} = lf_t \quad (16)$$

式中: t 为短路故障类型; f_t 为线路在第 t 类故障下的故障率; l 为线路长度。

对于只有1个临界点的边界线故障,敏感负荷母线处预估暂降频次 ESF_{P11} 计算如下:

$$ESF_{P11} = l_{P1} f_t [BVI_{PIF} \int_0^{p_1} g(p) dp + BVI_{PIT} \int_{p_1}^1 g(p) dp] \quad (17)$$

式中: l_{P1} 为边界线位于暂降域内部分的长度; BVI_{PIF}, BVI_{PIT} 分别为边界线首端母线 F 和末端母线 T 的母线判别值; p_1 为边界线的临界点。

对于有2个临界点的边界线故障,敏感负荷母线处预估暂降频次 ESF_{P12} 计算如下:

$$ESF_{P12} = f_t [l_{P12} \int_0^{p_2} g(p) dp + l_{P13} \int_{p_3}^1 g(p) dp] \quad (18)$$

式中: p_2, p_3 分别为边界线的2个临界点; l_{P12} 为线路首端母线至临界点 p_2 的距离; l_{P13} 为线路末端母线至临界点 p_3 的距离。

敏感负荷母线总预估暂降频次 ESF 为

$$ESF = ESF_{Cl} + ESF_{P11} + ESF_{P12} + \sum_{B=1}^M f_{Bt} \quad (19)$$

式中: M 为暂降域内母线总数; f_{Bt} 为母线 B 在第 t 类故障下的故障率。

分析沿边界线不同故障分布对电压暂降频次预估的影响,流程如图3所示,具体步骤如下:

1) 设置敏感负荷接入母线节点,根据式(5)~式(7)计算各母线故障时敏感负荷接入点的残余电压,根据式(8)~式(11)判断线路临界点的个数。

2) 根据线路临界点个数的不同,分别采用不同的方法对临界点进行求取,具体计算流程如图4所示。对于 $LVI_j = 1$ 的线路,采用插值法和二分

法计算线路临界点。对于 $LVI_j = 2$ 的线路,先计算敏感负荷接入点残余电压的最大值,然后与给定电压阈值比较,若残余电压最大值大于阈值,则采用插值法和二分法计算线路临界点;若小于阈值,说明整条线路位于暂降域内。

3) 遍历系统中的所有线路,得到最终的暂降域计算结果。

4) 对于完全位于暂降域内的线路,根据式(16)计算敏感负荷母线的暂降频次。选取暂降域内所有边界线,沿线分别选取指数故障分布、正态故障分布和均匀故障分布,结合线路及母线故障率,根据式(17)和式(18)计算敏感负荷母线的暂降频次。

5) 遍历暂降域内的所有线路,由式(19)得到敏感负荷母线总预估暂降频次。

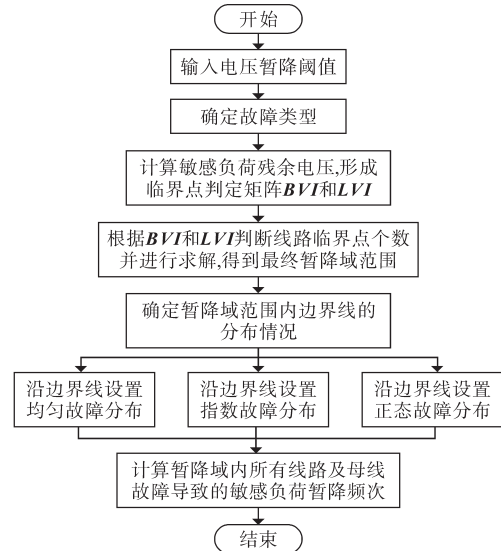


图3 电压暂降频次预估流程

Fig.3 The process of voltage sag estimation

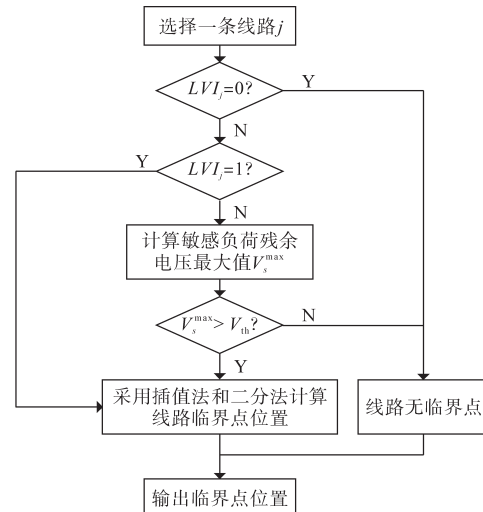


图4 步骤2)计算流程

Fig.4 The calculation process of step 2)

3 算例分析

采用IEEE30节点标准测试系统在Matlab中进行仿真验证。如图5所示,该系统包括6台发电机、4个变压器、30个节点母线和37条线路,其详细参数见文献[15]和文献[21]。假定节点母线21为敏感负荷接入点,以发生单相接地故障(A相)和三相短路故障为例,根据文中所提方法预估敏感负荷电压暂降频次。表1为线路或母线发生两类故障的概率^[15]。

表1 线路及母线故障概率

Tab.1 Failure rate for lines and buses

故障类型	母线故障率/(次·a ⁻¹)	线路故障率/(次·a ⁻¹)
单相接地故障	0.064	2.000
三相短路故障	0.003	0.100

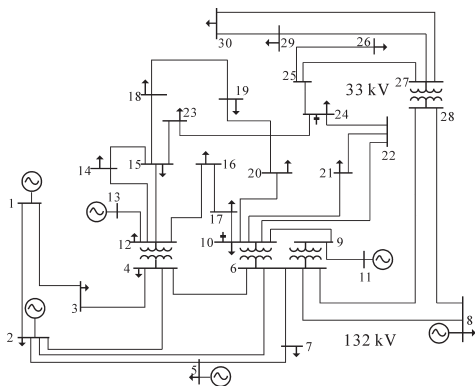


图5 IEEE30节点系统

Fig.5 IEEE30 bus test system

3.1 暂降域及边界线分析

敏感负荷电压暂降阈值(标么值)分别设为0.3,0.4,0.5,0.6,0.7与0.8。根据文中所提的暂降域计算方法,得到了敏感负荷在两类故障下各临界点位置。为方便表述,对系统中的所有线路进行编号,如表2所示。

此处仅给出敏感负荷暂降阈值为0.3和0.7

表2 系统线路编号

Tab.2 Number of system lines

线路编号	线路 F-T	线路编号	线路 F-T	线路编号	线路 F-T
1	1-2	14	12-14	27	15-23
2	1-3	15	12-15	28	22-24
3	2-4	16	12-16	29	23-24
4	3-4	17	14-15	30	24-25
5	2-5	18	16-17	31	25-26
6	2-6	19	15-18	32	25-27
7	4-6	20	18-19	33	27-29
8	5-7	21	19-20	34	27-30
9	6-7	22	10-20	35	29-30
10	6-8	23	10-17	36	8-28
11	9-11	24	10-21	37	6-28
12	9-10	25	10-22		
13	12-13	26	21-22		

时的单相接地故障和三相短路故障电压暂降域示意图,分别如图6和图7所示。

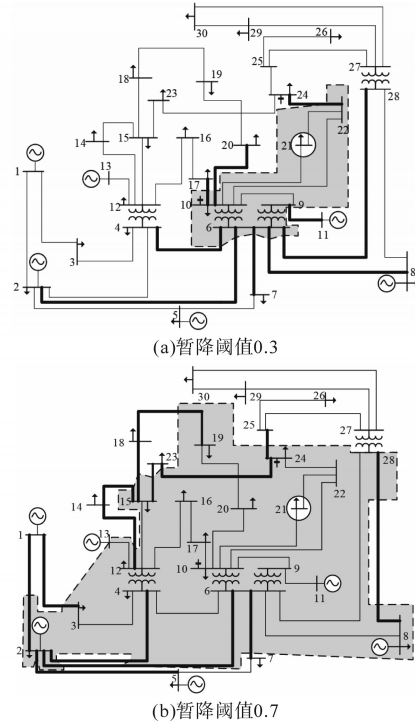


图6 单相接地故障时的电压暂降域

Fig.6 Vulnerable area under single line to ground faults

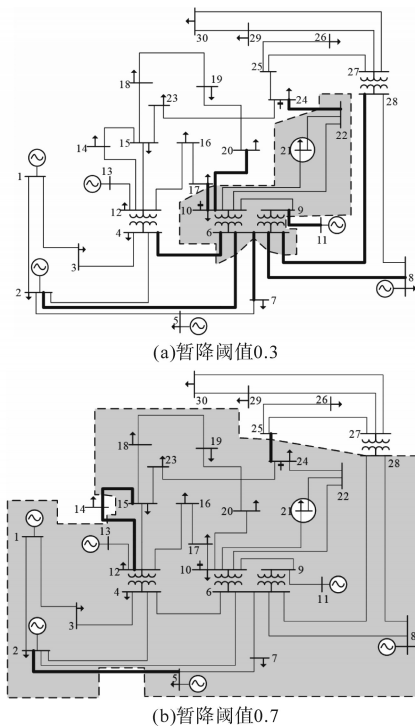


图7 三相短路故障时的电压暂降域

Fig.7 Vulnerable area under three phase faults

图中,阴影区域为敏感负荷电压暂降域范围,加粗线路为部分位于暂降域内的边界线。

从电压暂降域示意图中可以直观地看出系统所有边界线的分布。例如由图6a可知,系统中

共有9条边界线,分别为线路6,7,9,10,11,22,23,28与37。

表3为两类故障时各暂降阈值下系统所有边界线的分布情况。

表3 系统边界线分布

Tab.3 Distribution of system boundary lines

故障分布	敏感负荷暂降阈值 V_{th} (标么值)					
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
单相接地故障	6,7,9,10,11,12,23,28,37	6,7,9,11,23,22,28,36,37	3,4,6,9,11,18,22,28,36,37	1,3,4,6,9,11,13,14,15,16,18,22,29,30,36	1,2,3,5,6,9,14,17,19,20,27,29,30,36	5,14,17,31,33,34
三相短路故障	6,7,9,10,11,22,23,28,37	3,4,6,9,10,11,18,22,28,37	3,4,6,9,11,13,14,15,16,18,22,29,30,36	1,2,3,5,8,11,13,14,17,19,20,27,29,30,36	5,14,17,30	31,33,34

3.2 电压暂降频次计算

计算完全位于暂降域内的线路故障和各母线故障时敏感负荷处的暂降频次,结果如图8所示。结合图6~图8分析可知,随着电压暂降阈值的提高,暂降域范围逐渐增大,从而使得有更多的线路完全位于暂降域内,导致敏感负荷母线处的暂降频次增加。

结果差异较大。例如线路7仅末端位于暂降域内,且由于指数分布与正态分布线路末端故障概率较低,因此线路故障均匀分布时的暂降频次高于指数分布和正态分布。

表4 单相故障下敏感负荷阈值为0.3的暂降频次

Tab.4 Expected sag frequency under single line to ground faults when threshold is 0.3

线路编号	暂降频次/(次·a ⁻¹)		
	均匀分布	指数分布	正态分布
6	0.037	0.010	0.000
7	0.185	0.056	0.008
9	0.068	0.131	0.001
10	0.172	0.310	0.006
11	0.005	0.009	0.000
22	0.073	0.119	0.010
23	0.147	0.173	0.180
28	0.089	0.134	0.026
37	0.096	0.181	0.002
总计	0.872	1.124	0.233

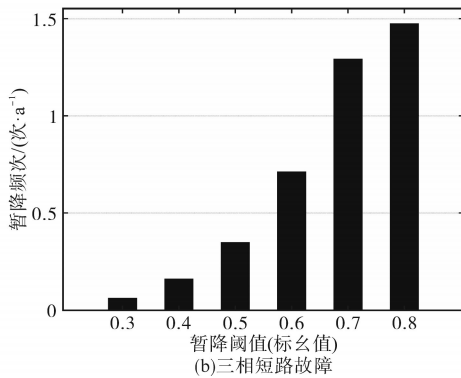
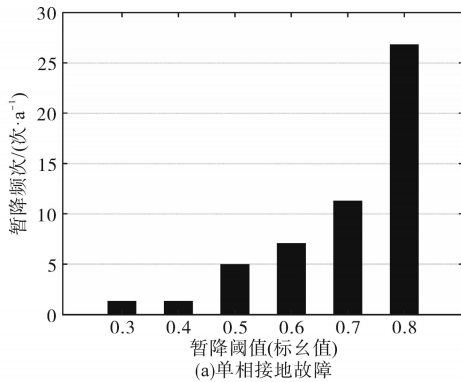


图8 暂降域内线路及母线故障时的暂降频次预估结果

Fig.8 Results of the expected sag frequency in case of lines and buses faults in the vulnerable area

假设沿边界线的故障分布为均匀分布、指数分布和正态分布,计算敏感负荷母线在不同故障分布下的暂降频次。表4为单相接地故障下敏感负荷暂降阈值为0.3时的暂降频次。由图6a和表4可知,各边界线位于暂降域内的位置及长度均不相同,从而导致在三种故障分布下频次的预估

图9为两种故障下敏感负荷不同阈值时的暂降频次。从图9的预估结果可以看出,沿边界线不同故障分布会显著影响敏感负荷母线处的暂降频次。结合表3和图9分析可知,系统中存在的边界线越多,故障分布对暂降频次的影响就越大。

图10为敏感负荷母线总暂降频次。从图中可以看出在各暂降阈值下,当线路故障为正态分布时,敏感负荷总暂降频次均为最小。例如当发生单相接地故障时,总电压暂降频次在线路故障为正态分布时分别为0.233,1.800,1.527,3.279,5.087,0.820,单位:次/a,均匀分布时分别为0.872,2.791,2.524,4.039,7.388,1.386,单位:次/a,指数分布时分别为1.124,3.014,2.668,3.469,6.305,1.448,单位:次/a。线路故障正态分布时的总暂降频次均为三种故障分布下的最小值,因此总暂降频次受正态分布的影响最小,主要受指数分布与

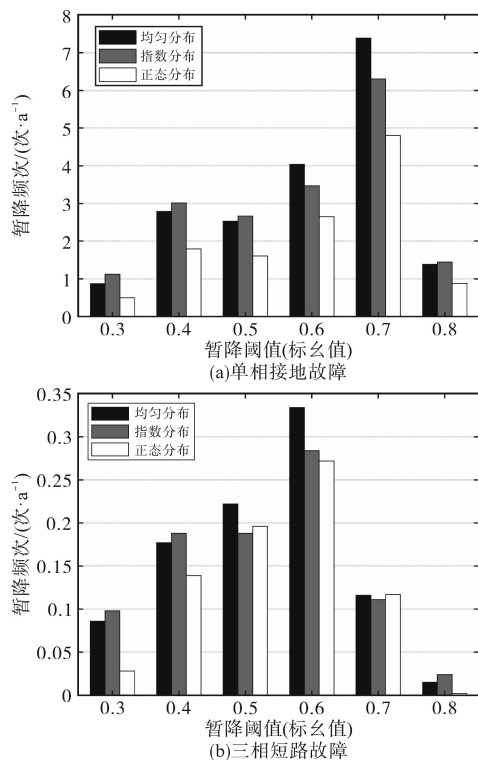


图9 不同故障分布下的暂降频次预估结果

Fig.9 Results of the expected sag frequency under different fault distribution

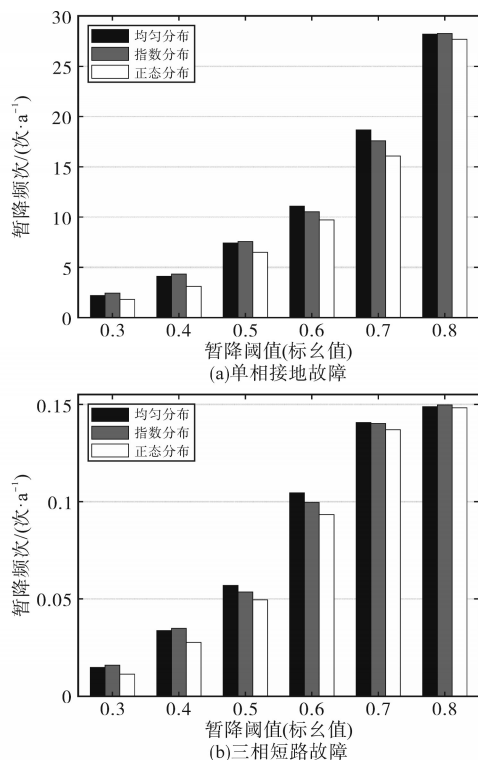


图10 总暂降频次预估结果

Fig.10 Results of the total expected sag frequency

均匀分布的影响。若采用传统随机预估方法,仅能计算出线路故障均匀分布的情况,若实际线路故障分布为指数分布或正态分布,将会使得最终的

频次预估结果产生误差,从而影响后续电压暂降的治理。因此,本文所提方法能够考虑沿线故障分布的影响并对敏感负荷电压暂降频次进行有效预估,弥补了传统随机预估方法仅考虑均匀故障分布的缺点。

4 结论

本文基于沿线不同故障分布特性,提出了一种考虑沿暂降域边界线故障分布的电压暂降随机预估方法。通过计算得到了不同电压暂降阈值下敏感负荷所在母线的暂降域。根据得到的暂降域范围确定了边界线分布,最后沿边界线设置指数故障分布、正态故障分布及均匀故障分布,分别对不同故障分布下敏感负荷母线的暂降频次进行了对比分析。

算例结果表明,不同暂降阈值或不同故障类型会形成不同的电压暂降域范围。在同一暂降域范围内,沿暂降域边界线不同故障分布特性会影响敏感负荷电压暂降频次。通过对暂降域边界线的识别,能够快速定位需考虑沿线故障分布特性的线路。针对传统电压暂降随机预估方法只适用于沿线故障均匀分布的问题,本文所提方法可根据实际线路故障分布特性对敏感负荷电压暂降频次进行预估,预估流程更具灵活性,计算结果更加准确,可为电压暂降治理提供参考。

参考文献

- [1] 徐悦,李博,孙建军,等.基于运行韧性评价的配电网电压暂降治理评估[J].电力系统自动化,2021,45(5):104-110.
XU Yue, LI Bo, SUN Jianjun, et al. Evaluation of voltage sag management in distribution network based on operation resilience assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 104-110.
- [2] 王建勋,张逸,陈晶腾,等.省级电网电压暂降评估与工业用户潜在供电点优选[J].电力自动化设备,2021,41(8):201-207,224.
WANG Jianxun, ZHANG Yi, CHEN Jingteng, et al. Evaluation of provincial power grid voltage sag and optimal selection of potential power supply points for industrial users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 201-207, 224.
- [3] 刘海涛,叶筱怡,吕干云,等.引入调节因子改进S变换电压暂降源识别[J].电气传动,2021,51(18):59-64.
LIU Haitao, YE Xiaoyi, LÜ Ganyun, et al. Modified S-transform voltage sag source identification by introducing regulation factor[J]. Electric Drive, 2021, 51(18): 59-64.
- [4] 胡文曦,肖先勇.电网结构对电压暂降传播的影响及其量化分析方法[J].电力自动化设备,2020,40(7):181-189.

- HU Wenxi, XIAO Xianyong. Influence of grid structure on voltage sag propagation and its quantitative analysis method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(7): 181-189.
- [5] LIAO H, MILANOVIĆ J V, RODRIGUES M, et al. Voltage sag estimation in sparsely monitored power systems based on deep learning and system area mapping[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(6): 3162-3172.
- [6] XAVIER Zambrano, ARACELI Hernandez, MOHAMED Izzeddine, et al. Estimation of voltage sags from a limited set of monitors in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(2): 656-665.
- [7] 浦雨婷, 杨洪耕, 马晓阳. 基于数据挖掘与改进灰靶的电压暂降严重度分析与评估[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 198-206.
- PU Yuting, YANG Honggeng, MA Xiaoyang. Analysis and evaluation of voltage sag severity based on data mining and improved grey target theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 198-206.
- [8] 郎福龙, 田立军, 王滕藤. 基于电压暂降监测点优化配置的同轴松弛凹陷域分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(18): 96-101.
- LANG Fulong, TIAN Lijun, WANG Tengting. An analysis to the concentric relaxation vulnerability area of voltage sag based on optimal allocation of voltage sag monitors[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(18): 96-101.
- [9] BOLLEN M. Understanding power quality problem: voltage sag and interruption[M]. NJ: IEEE Press, 2000.
- [10] 王晞, 唐权, 陈礼频, 等. 基于多种数值分析方法的电压暂降凹陷域快速算法[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(8): 35-40.
- WANG Xi, TANG Quan, CHEN Lipin, et al. Fast algorithm for vulnerable area of voltage sag based on multiple numerical analysis methods[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(8): 35-40.
- [11] CARAMIA P, DI Mambro E, VARILONE P, et al. Impact of distributed generation on the voltage sag performance of transmission systems[J]. *Energies*, 2017, 10(7): 959.
- [12] PARK C H, JANG G. Systematic method to identify an area of vulnerability to voltage sags[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(3): 1583-1591.
- [13] 甄超, 康健, 白天宇, 等. 基于BP神经网络的暂降域识别方法[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(13): 5161-5166.
- ZHEN Chao, KANG Jian, BAI Tianyu, et al. Method to identify voltage sag exposed area based on back propagation neural network[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(13): 5161-5166.
- [14] 王建波, 张艳丽, 刘长荣, 等. 基于电压曲线特征的电压暂降凹陷域快速计算[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2021, 42(4): 209-214.
- WANG Jianbo, ZHANG Yanli, LIU Changrong, et al. Fast calculation of voltage sag vulnerable area based on voltage curve characteristics[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2021, 42(4): 209-214.
- [15] PARK C H, JANG G. Stochastic estimation of voltage sags in a large meshed network[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(3): 1655-1664.
- [16] 谢伟伦, 薛峰, 黄志威. 基于网络传播特性的配电网电压暂降随机预估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(8): 163-171.
- XIE Weilun, XUE Feng, HUANG Zhiwei. Stochastic estimation method of voltage sags for a distribution network based on network propagation property[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(8): 163-171.
- [17] 冯澎湃, 肖楚鹏, 郭松, 等. 考虑含多敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 36-44.
- FENG Pengpai, XIAO Chupeng, GUO Song, et al. Voltage sag vulnerable area identification of a distribution grid with multiple sensitive loads[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(11): 36-44.
- [18] AUNG M T, MILANOVIĆ J V, GUPTA C P. Propagation of asymmetrical sags and the influence of boundary crossing lines on voltage sag prediction[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(4): 1819-1827.
- [19] ELISA Espinosa Juárez, ARACELI Hernández. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1493-1500.
- [20] MILANOVIĆ J V, AUNG Thu Myo, GUPTA C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(1): 278-285.
- [21] University of Washington Electrical Engineering. IEEE 30-bus test case[EB/OL]. [2021-12-30]. http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.html.

收稿日期:2021-12-30

修改稿日期:2022-03-01