

基于脱网负荷容量的电网薄弱环节识别方法

王 雪¹, 刘长荣¹, 刘兴杰², 舒一飞³, 金 航¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 宁夏大学物理与电子电气学院, 宁夏 银川 750021;
3. 国网宁夏电力有限公司营销服务中心, 宁夏 银川 750001)

摘 要:针对现有的配电网中薄弱环节识别方法的不足, 考虑电压暂降幅值和持续时间对敏感设备的影响, 提出了一种基于脱网负荷容量的电网薄弱环节识别方法。首先, 将幅值和持续时间划分为多个区间; 然后, 使用解析式法, 计算线路故障时节点电压幅值在各区间的概率, 拟合持续时间分布的概率密度函数, 计算电压暂降持续时间在各区间的概率, 由此得到线路故障时节点电压暂降的幅值和持续时间位于各区间的概率, 即电压暂降发生概率; 最后, 通过各区间内的电压暂降发生概率和敏感设备故障概率, 计算线路故障导致敏感设备故障的概率以及电网的总脱网负荷容量, 并将脱网负荷容量作为电网薄弱环节的识别指标。以 IEEE-39 节点系统为例做了验证分析, 并与其它方法进行对比, 结果表明了此方法的有效性。

关 键 词:电压暂降; 幅值; 持续时间; 脱网负荷容量

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.010 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2022)03-0085-09

Method for identifying weak links of power grid based on off-grid load capacity

WANG Xue¹, LIU Changrong¹, LIU Xingjie², SHU Yifei³, JIN Hang¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. School of Physics, Electronics and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
3. Marketing Service Center of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the existing weak link identification methods in the distribution network, a method for identifying weak links of the power grid based on off-grid load capacity was proposed, which considered the effect of the magnitude and duration of voltage sag on sensitive equipment. First, the magnitude and duration were divided into multiple intervals. Then, the analytical method was used to calculate the probability of the node voltage magnitude in each interval when the line failed; the probability density function of the duration distribution was fitted to calculate the probability of the voltage sag duration in each interval. From this, the probability of the magnitude and duration of node voltage sag in each interval was obtained when the line failed; that was the occurrence probability of voltage sag. Finally, based on the occurrence probability of voltage sag and the failure probability of sensitive equipment in each interval, the failure probability of sensitive equipment caused by line failure and the total off-grid load capacity of the power grid were calculated, and the off-grid load capacity was used as an indicator for i-

收稿日期:2020-06-14; 修回日期:2021-03-10

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5200-201924064A-0-0-00)

通信作者:刘长荣(1995-),女,硕士生,主要从事配电网安全稳定运行研究;E-mail:lcr657059780@163.com

identifying weak links of the power grid. Taking the IEEE-39 node system as an example for verification analysis and comparing it with other methods, the results showed the effectiveness of the proposed method.

Key words: voltage sag; magnitude; duration; off-grid load capacity

随着电力系统中电压暂降敏感设备的增多,电压暂降造成的经济损失也迅速增加,这使得电压暂降成为电能质量中最为突出的问题之一^[1-2]。电压暂降是指供电电压均方根值快速下降到0.1~0.9倍的额定电压、持续时间为0.5周波至1 min的电压变动现象。系统侧抑制电压暂降的有效措施包括提高线路绝缘化和电缆化水平,但是整改投资较大,需要有针对性地对线路进行改造。因此,准确评估线路故障造成的脱网负荷容量,找到配电网中的薄弱环节,能够为电压暂降治理提供依据,具有重要的现实意义。

目前,评估线路故障对敏感节点电压暂降影响的研究,已经取得了一些成果。文献[3]通过比较线路故障概率改变前后节点电压幅值期望值的变化,找到对节点影响最大的线路;文献[4]在文献[3]研究的基础上考虑线路故障的发生次数,定义了电网薄弱环节识别指标。然而,上述方法均未考虑节点的电压暂降限值。文献[5]计算每条线路故障时对节点总暂降频次的贡献度,对线路进行严重程度排序;文献[6]将线路等距分段,计算各故障点的综合严重度系数,再将线路上各故障点的系数取均值,作为该线路的综合严重度系数。但以一个固定的暂降限值表示节点的电压暂降耐受能力是不合适的。在实际电网中,随着高度自动化的制造业逐年增多,各类敏感设备不断地融入生产过程中,广泛存在一个节点连接多种敏感设备的情况。各敏感设备的电压暂降耐受能力不同,且电压耐受曲线中含有不确定区域,这导致发生幅值和持续时间相同的暂降事件时,同一节点处各敏感设备的状态可能是不同的。同时,上述文献只考虑了电压暂降的幅值对敏感节点的影响,实际中节点处敏感设备是否故障与幅值和持续时间都是相关的。

为解决上述问题,本文提出一种基于脱网负荷容量的电网薄弱环节识别方法。所提方法考虑线路故障时电压暂降的幅值和持续时间这2个特征量的分布情况,相比只考虑电压暂降幅值的方法更加严

谨。当节点处连接不同电压暂降耐受能力的敏感设备时,该方法计算线路故障造成敏感设备故障的概率,结合敏感设备故障后造成的负荷脱网情况,可以方便计算线路故障造成的总脱网负荷容量,并找到电网的薄弱环节。

1 基于脱网负荷容量的识别方法基本方案

短路故障是引起电压暂降最主要的原因之一,因此,本文针对线路短路故障引起的电压暂降进行分析。

基于目前在评估线路故障对节点电压暂降影响时未考虑持续时间这一特征量以及节点连接多种敏感设备的情况,本文考虑了电压暂降的幅值和持续时间对节点处敏感设备的影响以及不同敏感设备电压耐受能力的差异性,提出了一种基于脱网负荷容量的电网薄弱环节识别方法,基本方案如下。

1)将幅值与持续时间划分为多个区间。

2)计算某线路故障时节点电压幅值位于各区间的概率。通过凹陷域分析的解析式法,计算线路发生不同类型的故障时,节点各相电压的幅值在各区间的概率。

3)计算电压暂降的持续时间位于各区间的概率。拟合持续时间分布的概率密度函数,并使用粒子群算法求解函数参数,得到不同电压暂降幅值对应的持续时间分布情况,据此计算持续时间在各区间的概率。

4)通过步骤2、3,计算线路故障时节点电压暂降的幅值和持续时间位于各区间的概率,即电压暂降发生概率。

5)根据敏感设备的故障概率密度函数,计算各区间的敏感设备故障概率。

6)由步骤4、5计算各区间内线路故障导致节点处敏感设备故障的概率并求和。

7)计算线路故障造成的总脱网负荷容量,作为

电网薄弱环节的识别指标。

该方案的重点是引入电压暂降发生概率这一概念,只有得知线路故障时节点电压暂降的幅值和持续时间的分布情况,才能进一步计算线路故障时节点处敏感设备的故障概率。

2 电压暂降发生概率

敏感设备故障概率随着电压暂降幅值和持续时间变化。而线路故障造成节点电压暂降时,其幅值和持续时间为确定值的概率是无法计算的。因此,将幅值和持续时间划分为多个区间,计算线路故障时节点电压暂降的幅值和持续时间位于各区间的概率。

2.1 电压暂降幅值

使用凹陷域分析的解析式法,计算某线路故障时节点电压暂降的幅值位于各区间的概率。

凹陷域是指导致电网中节点电压低于某一限值的故障点所在区域,其分析方法包括临界距离法、故障点法和解析式法^[7-9]。近年来,解析式法得到了广泛应用,该方法根据节点电压幅值与线路上故障位置的解析关系式^[10],计算各种短路故障情况下暂降限值对应的临界故障点,将临界故障点连接起来得到凹陷域。

由于篇幅所限,本文仅以三相故障为例进行分析。首先利用支路追加法得到节点阻抗矩阵,然后应用叠加原理将系统分解为正常和故障分量 2 个网络。经计算得到节点电压的表达式为

$$U_m = U'_m - \frac{Z_{mf(1)}}{Z_{ff(1)} + Z_g} U'_f \quad (1)$$

式中 m 为节点序号; f 为线路上的故障点; U_m 为节点 m 故障后的电压; U'_m 为节点 m 故障前的电压; U'_f 为故障点 f 故障前的电压; Z_g 为故障电阻; $Z_{mf(1)}$ 为节点 m 与故障点 f 间的正序互阻抗; $Z_{ff(1)}$ 为故障点的正序自阻抗。

故障网络的节点阻抗矩阵元素随故障点的变化而变化,无法直接用于计算分析,因此用正常网络的节点阻抗矩阵元素表示为

$$Z_{mf(1,2,0)} = (Z_{mw(1,2,0)} - Z_{ms(1,2,0)})d + Z_{ms(1,2,0)} \quad (2)$$

$$Z_{ff(1,2,0)} =$$

$$(Z_{ss(1,2,0)} + Z_{ww(1,2,0)} - 2Z_{sw(1,2,0)} - z_{sw(1,2,0)})d^2 + (2Z_{sw(1,2,0)} - 2Z_{ss(1,2,0)} + z_{sw(1,2,0)})d + Z_{ss(1,2,0)} \quad (3)$$

式(2)、(3)中 d 为故障位置,即故障点到线路首端的距离与线路总长度的比值,取值范围为 0 到 1;1、2、0 分别表示正、负、零序分量; s 、 w 为故障点所在线路的首、尾端序号; z_{sw} 为线路 s - w 的阻抗。

将式(2)、(3)代入式(1),得到三相故障时节点电压幅值关于故障位置的解析关系式。

设定暂降限值分别为幅值区间的 2 个边界,计算节点的凹陷域。计算时假设正常运行情况下系统各节点电压的标么值均为 1。

某线路位于 2 个凹陷域边界内的长度与线路全长的比,为该线路故障导致节点电压位于这一幅值区间的概率,记为 P_{mag} ,计算公式为

$$P_{\text{mag}}(L, m, j, r, h) = |l_{\text{area}}(L, m, j, r, U_{h1}) - l_{\text{area}}(L, m, j, r, U_{h2})| \quad (4)$$

式中 L 为线路序号; $j=1,2,3$ 分别为 A、B、C 相; $r=1,2,3,4$ 分别为三相短路、单相接地短路、两相相间短路、两相接地短路故障; h 为幅值区间序号; U_{h1} 、 U_{h2} 为第 h 个幅值区间的 2 个边界值; $l_{\text{area}}(L, m, j, r, U_{h1})$ 、 $l_{\text{area}}(L, m, j, r, U_{h2})$ 分别为暂降限值为 U_{h1} 、 U_{h2} 时凹陷域内的线路长度。

2.2 电压暂降持续时间

基于 IEC 61000-2-8 统计表格的电压暂降实测数据,可以体现持续时间在不同区间的分布情况。由于持续时间区间的跨度较大,需要细化其分布规律。为此,拟合电压暂降持续时间分布的概率密度函数,根据拟合函数方便地计算持续时间分布在任意跨度区间的概率。

根据中国某供电公司在 2018—2019 年监测的电压暂降数据,使用 IEC 61000-2-8 统计表格将幅值分成 8 个区间、持续时间分成 7 个区间,在每个幅值区间内,统计不同持续时间暂降事件的发生概率,结果如图 1 所示。由图 1 可知,电压暂降的幅值位于不同区间时,持续时间的分布情况是不同的。

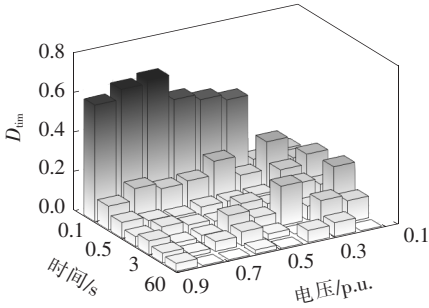


图1 各幅值区间内不同持续时间区间
暂降事件的发生概率

Figure 1 Occurrence probability of sag events in different duration intervals within each magnitude interval

定义持续时间分布的概率密度函数,表示电压暂降幅值一定时持续时间为 T 的概率密度,记为 $P_{D_{\text{lim}}}$ 。使用韦伯分布拟合该函数,即

$$P_{D_{\text{lim}}}(x, T) = a_x b_x T^{b_x - 1} \exp(-a_x T^{b_x}) \quad (5)$$

式中 x 为图1中幅值区间的序号; a_x 、 b_x 均为函数的参数。

使用粒子群算法求解函数参数,以符合图1中概率分布为目标函数,即

$$f(x) = \min \sum_{y=1}^7 \left| \int_{T_{y1}}^{T_{y2}} P_{D_{\text{lim}}}(x, T) dT - P_{xy} \right| \quad (6)$$

式中 y 为图1中持续时间区间的序号; T_{y1} 、 T_{y2} 为第 y 个持续时间区间的边界值; P_{xy} 为第 x 个幅值区间、第 y 个持续时间区间内的概率值。函数参数的计算结果如表1所示。

以幅值在 0.8~0.9 p.u. 区间为例,绘制图2所示的拟合函数曲线,由于持续时间较大时概率密度值很小,图中仅展示 0~100 ms 内的函数曲线。由图2可知,概率密度随着持续时间的增大而减小。

表1 持续时间分布的概率密度函数的参数

Table 1 Parameters of the probability density function of duration distribution 10^{-1}

x	a_x	b_x
1	1.78	3.50
2	0.90	5.27
3	1.33	4.54
4	1.43	3.61
5	0.52	5.64
6	1.00	4.00
7	0.03	9.89
8	0.10	6.76

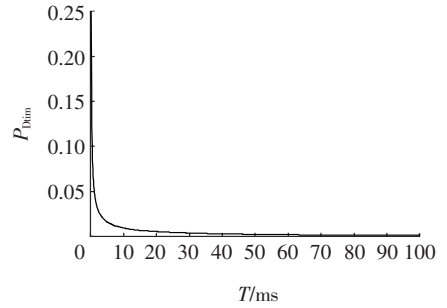


图2 持续时间分布的概率密度函数曲线

Figure 2 Curve of the probability density function of duration distribution

首先,判断拟合函数在各持续时间区间的拟合效果。绘制由拟合函数计算得到的概率柱状图,如图3所示。由图1、3可知,当持续时间较小时,拟合函数计算得到的概率与图1中概率较为接近,说明拟合函数能够很好地体现持续时间的分布情况。当持续时间较大时,拟合函数计算得到的概率与图1中概率存在偏差,但此时概率数值很小,且持续时间区间的跨度显著增大,可达几秒至几十秒,因此拟合函数产生的误差对最终结果的影响也很小。

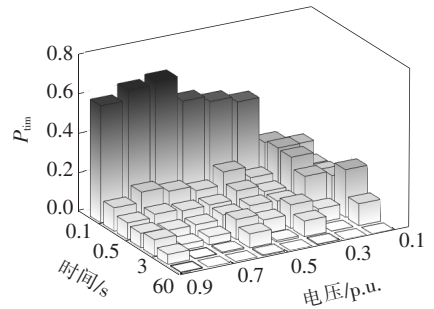


图3 拟合函数计算得到的概率柱状图

Figure 3 The probability histogram calculated by the fitting functions

然后,判断拟合函数在 0~60 s 的整体拟合效果。在不同幅值区间内,拟合函数在 0~60 s 的积分如表2所示。由表2可知,拟合误差最大为 4.3% 在可以接受的范围内。

根据持续时间分布的概率密度函数,计算电压暂降幅值一定时持续时间位于任一区间的概率,记为 P_{tim} ,即

$$P_{\text{tim}}(x, i) = \int_{T_{i1}}^{T_{i2}} P_{D_{\text{lim}}}(x, T) dT \quad (7)$$

式中 i 为持续时间区间的序号; T_{i1} 、 T_{i2} 为第 i 个持续时间区间的边界值。

表 2 拟合函数在 0~60 s 的积分

Table 2 Integrals of fitting functions in 0~60 s

<i>x</i>	积分/10 ⁻¹	误差/%
1	9.89	1.1
2	9.92	0.8
3	9.90	1.0
4	9.61	3.9
5	9.91	0.9
6	9.68	3.2
7	9.82	1.8
8	9.57	4.3

2.3 电压暂降发生概率

当电压暂降的幅值位于图 1 中某幅值区间时,持续时间的取值服从这一幅值区间对应的持续时间分布概率密度函数。计算线路故障时某节点电压暂降的幅值和持续时间位于各区间的概率,即电压暂降发生概率,记为 P_{line} ,即

$$P_{line}(L, m, j, r, h, i) = P_{mag}(L, m, j, r, h) \cdot P_{tim}(x, i), U_{h1} \geq U_{x1}, U_{h2} \leq U_{x2} \quad (8)$$

式中 U_{x1}, U_{x2} 为图 1 中第 x 个幅值区间的边界值。

3 敏感设备故障概率

不同敏感设备的电压耐受能力不同,根据其耐受能力计算敏感设备在各区间的故障概率。

电压耐受曲线能够描述敏感设备的电压耐受能力,可编程序逻辑控制器(programmable logic controllers, PLC)、交流调速器(adjustable speed drives, ASD)和计算机(personal computers, PC)等典型敏感设备的电压耐受曲线都由一个矩形表示,且具有不确定区域,如图 4 所示^[11]。图 4 中,区域 A、B、C 为不确定区域; $U_{min,k}, U_{max,k}, T_{min,k}, T_{max,k}$ 分别为第 k 类敏感设备的电压耐受曲线的幅值阈值和持续时间阈值。PLC、ASD 和 PC 的阈值如表 3 所示^[12]。

建立敏感设备在不确定区域 A、B 的正态分布故障概率密度函数 $f_k(T)$ 和 $f_k(U)$, C 区的故障概率密度函数是二者的乘积^[13],计算敏感设备在各区间的故障概率 P_{dev} ,即

$$P_{dev}(k, h, i) = \begin{cases} \int_{T_{min,k}}^{(T_{i1}+T_{i2})/2} f_k(T) dT, U_{h2} \leq U_{min,k}, \\ T_{i1} \geq T_{min,k}, T_{i2} \leq T_{max,k} \\ \int_{(U_{h1}+U_{h2})/2}^{U_{max,k}} f_k(U) dU, U_{h1} \geq U_{min,k}, \\ U_{h2} \leq U_{max,k}, T_{i1} \geq T_{min,k} \\ \int_{T_{min,k}}^{(T_{i1}+T_{i2})/2} \int_{(U_{h1}+U_{h2})/2}^{U_{max,k}} (f_k(U) \cdot f_k(T)) dU dT, \\ U_{h1} \geq U_{min,k}, U_{h2} \leq U_{max,k}, T_{i1} \geq T_{min,k}, \\ T_{i2} \leq T_{max,k} \\ 1, & U_{h2} \leq U_{min,k}, T_{i1} \geq T_{max,k} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

以幅值和持续时间为区间中点时的敏感设备故障概率,代表该区间内的故障概率。

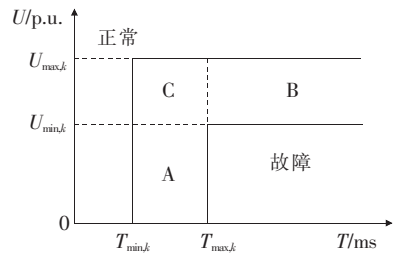


图 4 典型敏感设备的电压耐受曲线
Figure 4 Voltage tolerance curve of typical sensitive equipment

表 3 PLC、ASD 和 PC 的电压耐受曲线的幅值阈值和持续时间阈值

Table 3 The amplitude thresholds and duration thresholds of the voltage tolerance curves of PLC, ASD and PC

敏感设备类型	$U_{min,k}/p.u.$	$U_{max,k}/p.u.$	$T_{min,k}/ms$	$T_{max,k}/ms$
$k=1$ (PLC)	0.30	0.90	20	400
$k=2$ (ASD)	0.59	0.71	15	175
$k=3$ (PC)	0.46	0.63	40	205

4 薄弱环节识别指标计算

假设节点连接的敏感设备为单相负荷,计算线路故障时敏感设备的故障概率以及电网的总脱网负

荷容量,将脱网负荷容量作为电网薄弱环节的识别指标。

首先合理选择持续时间和幅值区间的步长。暂降事件持续时间分布的概率密度函数随时间的增大而减小,敏感设备的故障概率密度函数 $f_k(T)$ 随时间的增大先增大后减小,且不同敏感设备的函数最大值点不同。理想情况下应随着概率密度函数的变化率调整区间长度,但上述函数的变化是不一致的,因此将区间设置为等间隔。幅值区间亦设置为等间隔。考虑到区间的步长过大,导致计算误差变大;而区间的步长过小,导致程序运行时间过长。因此,经过比较后选择持续时间和幅值区间的步长为 5 ms 和 0.01 p. u.。

根据各区间内的电压暂降发生概率和敏感设备故障概率,计算任一线路故障导致敏感设备故障的概率,记为 $P_{\text{line-dev}}$,即

$$P_{\text{line-dev}}(L, m, k, j, r) = \sum_i^{S_T} \sum_h^{S_U} P_{\text{dev}}(k, h, i) \cdot P_{\text{line}}(L, m, j, r, h, i) \quad (10)$$

式中 S_U 、 S_T 分别为幅值和持续时间区间的总数。

结合线路的故障频次,计算该线路故障导致敏感设备故障的频次,记为 $F_{\text{line-dev}}$,即

$$F_{\text{line-dev}}(L, m, k) = \left[\sum_{r=1}^4 \sum_{j=1}^3 (l(L) \cdot \delta(r) \cdot P_{\text{line-dev}}(L, m, k, j, r)) \right] / 3 \quad (11)$$

式中 $l(L)$ 为线路 L 的长度; $\delta(r)$ 为单位长度线路一年中发生第 r 类故障的频次。

敏感设备容量或其控制的负荷容量 C_L 可通过统计获得。电压暂降发生时,敏感设备运行与否会直接影响脱网负荷的大小。若敏感设备处于非工作时段,电压暂降不会造成负荷脱网。由于电压暂降的发生时间具有随机性,因此定义敏感设备运行因子 F_r ,表示一年中该设备的工作时间占全年时长的比,通过对用户调研获得。

电网中含有多个敏感节点,假设各节点都连接了多种敏感设备且类型相同。计算线路发生故障造

成的总脱网负荷容量,也就是电网薄弱环节的识别指标,即

$$C_{\text{sum}}(L) = \sum_m^{S_m} \sum_k^{S_k} \cdot [F_{\text{line-dev}}(L, m, k) \times C_L(m, k) \times F_r(m, k)] \quad (12)$$

式中 S_m 为敏感节点总数; S_k 为敏感设备类型数。

根据线路故障后造成的脱网负荷容量大小,对线路进行排序,排名最靠前的线路就是电网最薄弱环节。

5 算例分析

本文以 IEEE-39 节点系统为例进行分析,该系统包括 10 个电源、12 个变压器、39 条母线和 34 条输电线路^[14],如图 5 所示。假设系统中有 4 个敏感节点,在图中以黑色圆点标识。节点处连接了 PLC、ASD 和 PC 这 3 种敏感设备,敏感设备容量或其控制的负荷容量以及敏感设备运行因子如表 4 所示。

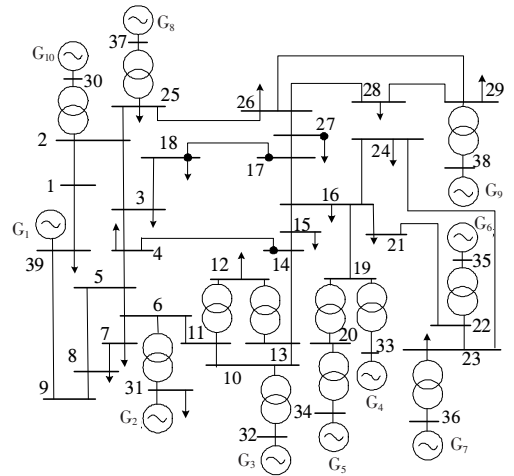


图 5 IEEE-39 节点系统

Figure 5 IEEE-39 node system

线路上的故障为均匀分布且线路故障频次为 4.2 次/(100 km·a)^[5]。各类故障的比例为三相短路 5%、单相接地短路 70%、两相相间短路 15%和两相接地短路 10%,可知线路上这 4 类故障的发生频次分别为 0.21、2.94、0.63、0.42 次/(100 km·a)。同时,假设故障电阻为 0 Ω。

表 4 不同节点处敏感设备容量或其控制的负荷容量 C_L 和敏感设备运行因子 F_r

Table 4 Capacity of sensitive equipment or its controlled load capacity C_L and running factor F_r of sensitive equipment

节点	不同敏感设备的 $C_L(\text{kW})/F_r$		
	PLC	ASD	PC
14	112/0.63	150/0.61	39/0.33
17	211/0.71	250/0.52	77/0.35
18	190/0.65	184/0.50	50/0.30
27	223/0.78	170/0.63	100/0.29

5.1 电压暂降发生概率

采用本文方法计算各区间内的电压暂降发生概率。以线路 4-14 发生单相接地故障为例,绘制的节点 18 的电压暂降发生概率如图 6 所示。由图 6 可知,由于节点电压表达式的函数曲线开口向下,随着幅值区间取值的增大,故障时导致电压位于该区间的线路长度也逐渐增大。因此,随着幅值的增大,电压暂降发生概率不断增大;随着持续时间的增大,其概率密度函数值逐渐减小,所以电压暂降发生概率不断减小。

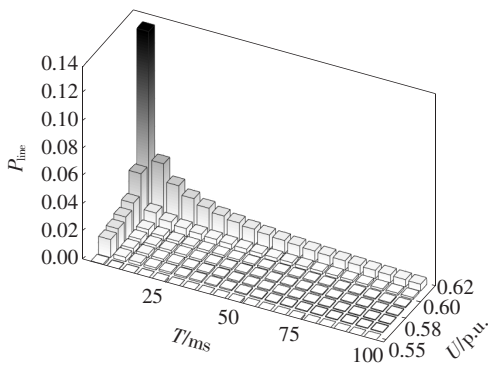


图 6 电压暂降发生概率

Figure 6 The occurrence probability of voltage sag

5.2 敏感设备故障概率

以 ASD 为例,绘制如图 7 所示的敏感设备故障概率。由图 7 可知,若电压暂降的幅值大于 0.71 p. u. 或持续时间小于 15 ms, ASD 的故障概率为 0,可正常工作;若电压暂降的幅值小于 0.59 p. u.,且持续时间大于 175 ms, ASD 的故障概率为 1,必然发生故障;若电压暂降的幅值和持续时间不属于以上 2 种情况,随着幅值的减小和持续时间的增大,ASD 的故障概率逐渐增大,并趋近于 1。

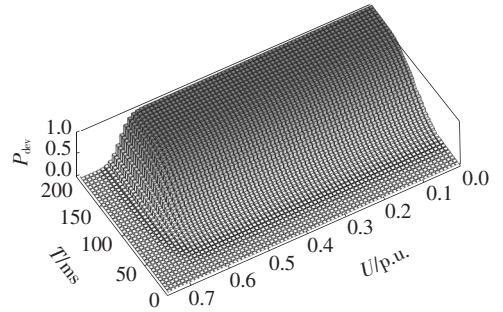


图 7 ASD 故障概率

Figure 7 The failure probability of ASD

5.3 电网薄弱环节识别

计算各线路故障造成的总脱网负荷容量,结果如表 5 所示。计算过程中,假设不同故障类型下持续时间分布的概率密度函数是相同的。由表 5 可知,线路 3-4、27-17、25-26 造成的脱网负荷容量排名前 3,这些线路长度较长,且由系统图可以看出其位于敏感节点附近,所以故障后对负荷的影响很大。但是仅根据线路的长度和距离敏感节点的远近,无法直接观察出线路的排序结果。例如线路 16-21 与线路 21-22 相比长度较短,但其故障后造成的脱网负荷容量更大;线路 26-29 与线路 26-27 相比距离敏感节点较远,但故障后造成的脱网负荷容量更大。而本文指标能够很好地量化并比较各线路故障后对负荷的影响。针对排名靠前的线路,可采取增加线路的绝缘等级、提高线路的继电保护等级等措施抑制电压暂降。

表 5 线路故障造成的脱网负荷容量

Table 5 Total off-grid load capacity caused by line fault

线路	容量/kW	线路	容量/kW	线路	容量/kW
3-4	461.6	27-17	440.3	25-26	409.9
15-14	375.3	18-3	365.8	16-19	362.9
2-3	356.8	26-29	299.5	26-27	297.7
16-21	294.1	26-28	273.6	17-16	262.9
16-15	258.7	17-18	232.2	23-24	206.5
4-14	203.3	2-25	201.0	16-24	159.4
4-5	158.1	13-14	113.9	21-22	110.5
2-1	109.8	5-8	69.9	6-11	63.6
6-7	58.3	22-23	38.0	8-9	37.9
10-13	34.7	10-11	32.6	28-29	25.2
5-6	24.4	7-8	24.0		
9-39	0.5	1-39	0.5		

将本文方法与已有的评估线路故障对节点暂降影响的方法进行比较。文献[5]只考虑电压暂降幅值对敏感节点的影响,通过线路上不同故障类型的发生频次与该故障类型下凹陷域内的线路长度,计算线路故障时所有敏感节点的暂降频次,以此寻找薄弱环节,当节点的限值取3种敏感设备 U_{\min} 的均值0.45 p. u.时,结果如表6所示。由表6可知,线路排序与表5相比发生了较大的变化。线路27-17发生故障时敏感节点的暂降频次最多,超过了线路3-4,是系统最薄弱的环节。

表6 各线路故障时敏感节点的暂降频次

Table 6 Sag frequency of sensitive nodes caused by line fault

线路	暂降频次	线路	暂降频次	线路	暂降频次
27-17	1.96	3-4	1.74	18-3	1.36
15-14	1.23	17-16	1.22	4-14	1.17
4-5	1.16	17-18	1.12	13-14	0.92
6-11	0.75	26-27	0.67	16-15	0.61
2-3	0.58	25-26	0.56	16-19	0.55
16-21	0.49	5-8	0.47	16-24	0.44
6-7	0.42	10-13	0.39	10-11	0.39
26-29	0.37	26-28	0.36	5-6	0.24
7-8	0.03	23-24	0.01	8-9	0.01
2-25	0.00	9-39	0.00	2-1	0.00
1-39	0.00	28-29	0.00		
21-22	0.00	22-23	0.00		

对负荷分布变化后的薄弱环节进行识别。假设各节点处敏感设备容量或其控制的负荷容量分别增长为原来的3倍,使用本文方法重新寻找电网中最薄弱的环节,结果如表7所示。由表7可知,当敏感设备容量或其控制的负荷容量变化时,电网中最薄弱的环节也可能发生改变。

表7 节点处负荷分布变化后的电网最薄弱环节

Table 7 The weakest link of the power grid after the load distribution at the node changes

变化的节点	最薄弱环节
14	3-4
17	27-17
18	3-4
27	25-26

使用文献[5]方法寻找电网的薄弱环节时,没有考虑各节点处敏感设备容量或其控制的负荷容量,导致电网薄弱环节诊断结果不会随着负荷分布变化而发生改变。而本文方法能够明确线路故障造成的脱网负荷容量,当负荷分布变化时,薄弱环节诊断结果也随之改变,因此该方法更具有工程应用价值。

6 结语

本文将幅值和持续时间划分成多个区间,计算了各区间内的电压暂降发生概率和敏感设备故障概率。在此基础上计算线路故障造成电网的总脱网负荷容量,对线路排序找到配电网中的薄弱环节。与已有的评估线路故障对节点暂降影响的方法相比,本文方法进一步考虑了持续时间对节点处敏感设备的影响以及各敏感设备电压耐受能力的差异性,适用于有多个敏感节点且节点连接了多种敏感设备的电网,具有较高的工程应用价值。文中方法能够为采取电压暂降抑制措施提供参考依据,进而有针对性地对线路进行改造,提高供电系统的可靠性。

参考文献:

- [1] 陈韵竹,刘阳,黄聃喆,等. 电压暂降损失风险规避机制与保险方案研究[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(2):97-105.
CHEN Yunzhu,LIU Yang,HUANG Yanzhe,et al. Research of loss risk evading mechanism and insurance scheme caused by voltage sags[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(2):97-105.
- [2] 李飞,郑志宇,张昭丞,等. 考虑电压暂降影响的交直流配网优选[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(3):120-126.
LI Fei,ZHENG Zhiyu,ZHANG Zhaocheng,et al. Optimization scheme of AC/DC distribution network considering voltage sags[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(3):120-126.
- [3] 易杨,张尧,钟庆. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. 电网技术,2008,32(6):57-60.
YI Yang,ZHANG Yao,ZHONG Qing. Assessment of voltage sags in large power consumer based on monte carlo method[J]. Power System Technology,2008,32

- (6):57-60.
- [4] 钟庆,林凌雪,易杨,等. 电压暂降评估指标(I)—电网薄弱环节指标[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(1):110-114.
ZHONG Qing, LIN Lingxue, YI Yang, et al. Study on the evaluation index of voltage sags I: unsubstantial location index[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(1):110-114.
- [5] 熊杰锋,程桂林. 电力系统谐波溯源方法综述[J]. 电测与仪表,2021,58(1):1-10.
XIONG Jiefeng, CHENG Guilin. Review of harmonics source traceability methods in power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(1):1-10.
- [6] 王沛. 基于大数据技术的输电线路运行故障诊断关键技术[J]. 电测与仪表,2021,58(5):182-189.
WANG Pei. Key technologies for transmission line operation fault diagnosis based on big data technology[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021, 58(5):182-189.
- [7] 欧阳森,陈义森. 一种可提取受波动干扰的电压暂降特征的信号处理方法[J]. 高压电器,2020,56(8):17-22.
OUYANG Sen, CHEN Yisen. Signal processing method for extracting the voltage sag feature with voltage fluctuation interference[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):17-22.
- [8] 胡长青,曹爱民,黄研利,等. 基于实测数据的陕西电网电压暂降特征分布分析[J]. 智慧电力,2020,48(9):69-74.
HU Changqing, CAO Aimin, HUANG Yanli, et al. Analysis of Voltage Sag Characteristic Distribution in Shaanxi power grid based on measured data[J]. Smart Power, 2020, 48(9):69-74.
- [9] 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.
- [10] 钟庆,姚蔚琳,许中,等. 基于平均点线距的电压暂降系数评估方法[J]. 中国电力,2020,53(11):9-14.
ZHONG Qing, YAO Weilin, XU Zhong, et al. A system assessment method for voltage sag severity based on average point-to-line distance index [J]. Electric Power, 2020, 53(11):9-14.
- [11] 付松林,何光华,徐骏,等. 大段长高压电缆护层保护器暂态特性分析与参数优化设计[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1):32-41.
FU Songlin, HE Guanghua, XU Jun, et al. Transient characteristic analysis and parameter optimization of sheath protector for large-length high voltage cable [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1):32-41.
- [12] 汪颖,邵彬,肖先勇. 一种考虑冗余度的电压暂降工业过程中断概率评估方法[J]. 电测与仪表,2020,57(7):8-15.
WANG Ying, SHAO Bin, XIAO Xianyong. A method for estimating industrial process interruption probability caused by voltage sag considering redundancy[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7):8-15.
- [13] 乐乐,马智远,莫文雄,等. 考虑不同敏感设备耐受特性的用户侧电压暂降严重程度区间评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(2):140-148.
LUAN Le, MA Zhiyuan, MO Wenxiong, et al. Voltage sag severity interval assessment method for user side considering tolerance characteristics of equipment of differing sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2):140-148.
- [14] 张嫣,林涌艺,邵振国. 电压暂降可观约束下的定位监测点多目标优化配置[J]. 电工技术学报,2019,34(11):2375-2383.
ZHANG Yan, LIN Yongyi, SHAO Zhenguo. Multi-objective optimal allocation of monitors for voltage sag location under observability constraint [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11):2375-2383.