

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221734

基于改进层次分析法的多级电压暂降严重程度评估

马莉, 陈应雨, 田钉荣, 娄景辉, 李宇, 张彦虎

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 准确评估多级电压暂降的严重程度对敏感设备的稳定运行及电压暂降治理具有重要意义。提出了一种基于改进层次分析法的多级电压暂降严重程度评估方法。首先, 分析了瞬时性故障和永久性故障下重合闸相应动作过程的多级电压暂降波形。然后, 运用权值函数法求出各级暂降的严重程度。基于过程免疫时间的特性, 刻画出敏感设备的多级电压暂降过程免疫时间(process immunity time, PIT)特性曲线。利用各级暂降的关联性和严重程度指标值对层次分析法进行改进, 确定了各级暂降的权重, 实现了多级电压暂降严重程度的量化评估。最后, 采用改造后的 IEEE30 节点系统进行仿真验证。结果表明, 所提方法合理且有效, 减少了评估结果的主观性, 为敏感设备多级电压暂降的评估和治理提供依据。

关键词: 多级电压暂降; 短路故障; 重合闸; 严重程度评估; 层次分析法; PIT 曲线

Severity evaluation of multistage voltage sag based on an improved analytic hierarchy process

MA Li, CHEN Yingyu, TIAN Dingrong, LOU Jinghui, LI Yu, ZHANG Yanhu

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: It is important to accurately evaluate the severity of multistage voltage sag for the stable operation of sensitive devices and the governance of voltage sag. This paper presents a method for evaluating the severity of multistage voltage sag based on an improved analytic hierarchy process. First, the multistage voltage sag waveform of the reclosing process under transient and permanent faults is analyzed. Then, the voltage sag evaluation by the weight function method is used to calculate the severity of each stage sag. Based on the time characteristic of process immunity, the multistage voltage sag PIT characteristic curve of a sensitive device is described. Taking advantage of the correlation and severity index value of each stage sag, the weight of each stage sag is determined. The multistage voltage sag severity can be evaluated quantitatively. Finally, the modified IEEE-30 system is used for simulation verification. The results show that the proposed method is reasonable and effective. It reduces the subjectivity of the evaluation results and provides a basis for the evaluation and governance of multistage voltage sag of a sensitive device.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777166).

Key words: multistage voltage sag; short circuit fault; reclosing; severity assessment; AHP; PIT curve

0 引言

近几年来, 随着计算机及各种半导体技术的迅速发展, 大量新型敏感设备在工业生产中得到广泛应用, 电压暂降已经成为影响工业用户电能质量的最主要因素^[1-2]。当线路发生短路故障时, 重合闸动作可能会使电网节点出现多级电压暂降的情况, 这会对敏感设备造成多次影响, 甚至导致系统瘫痪, 带来巨大的经济损失^[3-5]。因此准确评估多级电压暂

降的严重程度对提高供电可靠性、减少经济损失具有重要的理论价值和现实意义。

电压暂降幅值和持续时间是评估电压暂降严重程度的重要特征量^[6], 大多数评估指标都是基于这两个特征量拓展而来的。文献[7]指出仅用电压暂降特征量无法有效反映设备受电压暂降的影响程度, 还需要考虑设备的耐受能力。因此, 基于敏感设备耐受能力对电压暂降严重程度进行评估尤为重要。文献[8]提出了一种自动测试敏感设备电压暂降耐受能力的方法, 并通过改进二分法提升了测试速度。文献[9]基于设备的电压暂降耐受能力, 用负荷损失

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777166)

率来衡量电压暂降对工业过程造成的影响。文献[10]基于敏感设备耐受特性曲线的不确定区域,采用区间数理论对严重程度指标进行修正,最后通过仿射算法实现了对4种典型敏感设备的区间评估。文献[11]运用熵权法将层次分析法的电压暂降影响度指标和权值函数法的电压暂降影响度指标相结合,统筹考虑了主客观因素对电压暂降严重程度进行评估。文献[12]综合考虑敏感设备耐受曲线,对权值函数法进行了改进,并通过多个暂降阈值和持续时间序列的描述方法解决了电压暂降过评估的问题。

上述文献的电压暂降严重程度评估都是基于单级电压暂降进行的,目前对于重合闸引起的多级电压暂降的分析与评估较少。文献[13-14]分析了重合闸不同动作过程下的多级电压暂降波形,提出了减小电压暂降严重程度的重合闸时序方案,但对于包含多处敏感负荷的系统,该方案确定的某些线路的重合时序会存在互相矛盾的情况。文献[15]分析了环网中短路故障引起的多级电压暂降波形,并对不同保护时限特性下的电压暂降频次进行了评估。上述文献虽然分析了多级电压暂降波形,但没有对短路故障下重合闸动作引起的多级电压暂降的严重程度进行评估。

针对上述问题,本文首先分析了重合闸动作下敏感设备的多级电压暂降波形,运用权值函数法求得每一级暂降的严重程度。基于过程免疫时间的特性,考虑每级暂降初始过程参数及过程免疫能力的不同,刻画出多级电压暂降的过程免疫时间(process immunity time, PIT)特性曲线。然后利用各级暂降的关联性和严重程度指标值对层次分析法进行改进,确定了各级暂降的权重,进而提出了一种多级电压暂降严重程度评估方法。最后通过仿真验证本文方法能够对多级电压暂降严重程度进行合理地量化评估,为多级电压暂降的治理提供依据。

1 短路故障重合闸动作引起的多级电压暂降分析

短路故障是引起电压暂降的主要原因之一,虽然线路故障大多为单相接地故障,但三相短路故障引起的电压暂降危害更为严重^[16],因此本文对三相短路故障下的电压暂降波形进行研究。配电网中的主保护一般为阶段式保护,如图1所示。阶段式保护的I段保护覆盖线路全长的80%,线路末端的故障由保护II段延时切除。发生短路故障时,电压暂降的持续时间由线路保护清除故障的时间决定。故障位置、电网拓扑结构不同,电压暂降的持续时间也会不同。发生三相短路故障时,三相断路器跳开,

重合闸动作将断路器重合,当重合闸重合于瞬时性故障时,若故障消失则重合成功;若故障未消失则重合失败,重合闸进入闭锁状态;当重合闸重合于永久性故障时,断路器跳开,重合闸进入闭锁状态。

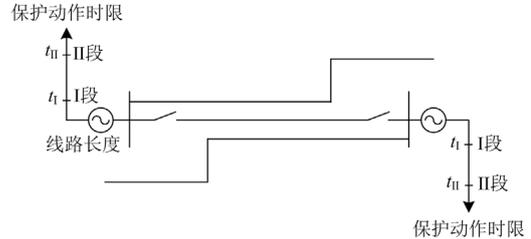


图1 阶段式保护时限特性

Fig. 1 Time characteristic of stepped protection

1.1 环网中瞬时性故障重合闸动作引起的多级电压暂降分析

本节对环网中瞬时性故障下的多级电压暂降波形进行了分析,瞬时性故障持续时间一般为几个毫秒到数秒不等,具有不确定性,根据故障消失的时间是在重合闸一次重合之前还是一次重合之后,多级电压暂降波形会出现以下两种情况。

1) 瞬时性故障重合闸动作引起的两级电压暂降

以改造后的IEEE30节点系统(图10所示)为例,设定节点30为敏感设备节点,利用PSCAD进行线路故障及重合过程的仿真。当故障消失时间为重合闸一次重合之前时,仿真结果如图2所示。

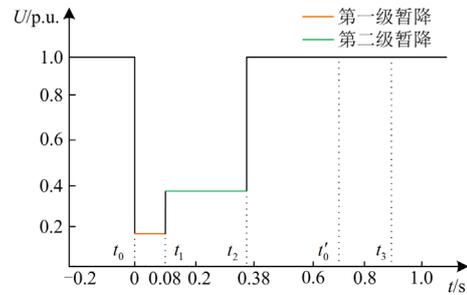


图2 环网中瞬时性故障下的两级电压暂降波形

Fig. 2 Two-stage voltage sag waveform under transient fault in meshed network

图2中, t₀时刻, 6-28线路距首节点10%位置处发生三相瞬时性故障,节点30的电压下降到0.159 p.u.,此时发生第一级暂降。t₁时刻,节点6侧I段保护动作,断路器跳开,节点30的电压恢复到0.394 p.u.,此时发生第二级暂降。t₂时刻,节点28侧断路器跳开,故障切除,节点30的电压恢复正常。t'₀时刻,故障消失。t₃时刻,节点6侧重合闸先进行重合,之后节点28侧重合闸重合,重合成功。

功, 电网恢复到正常运行状况。

2) 瞬时性故障重合闸动作引起的三级电压暂降

故障类型和位置设定以及 $t_0 \sim t_2$ 时间内断路器的动作过程同图 2。当故障消失时间为重合闸一次重合之后时, 仿真结果如图 3 所示。

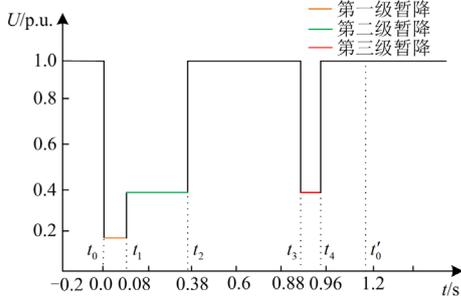


图 3 环网中瞬时性故障下的三级电压暂降波形

Fig. 3 Three-stage voltage sag waveform under transient fault in meshed network

图 3 中, 节点 6 侧重合闸经过整定延时在 t_3 时刻重合, 节点 30 的电压下降到 0.404 p.u., 此时发生第三级暂降。由于节点 6 侧重合闸重合于故障, 节点 28 侧重合闸不再重合(本文考虑的是先重合闸重合于故障且保护动作跳开三相断路器后, 后重合侧不再重合^[14]), t_4 时刻节点 6 侧断路器再次跳开, 重合闸进入闭锁状态, 节点 30 的电压恢复正常。

1.2 环网中永久性故障重合闸动作引起的多级电压暂降分析

t_0 时刻, 6-28 线路距首节点 10% 位置处发生三相永久性故障, 仿真结果如图 4 所示。

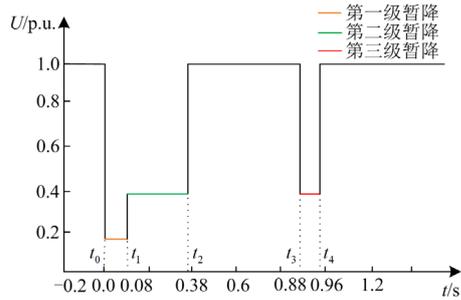


图 4 环网中永久性故障下的三级电压暂降波形

Fig. 4 Three-stage voltage sag waveform under permanent fault in meshed network

图 4 中, $t_0 \sim t_2$ 时间内断路器的动作过程同图 2, 经过整定延时, t_3 时刻节点 6 侧重合闸重合, 节点 30 的电压下降到 0.404 p.u., 此时节点 6 侧重合闸重合于故障, 节点 28 侧重合闸不再重合, t_4 时刻节点 6 侧断路器再次跳开, 重合闸进入闭锁状态不再动作, 故障切除, 节点 30 的电压恢复正常。

1.3 辐射型电网中短路故障重合闸动作引起的多级电压暂降分析

辐射型电网具有单一潮流方向, 当瞬时性故障在重合闸一次重合之前消失时, 敏感设备只会发生单级电压暂降; 当瞬时性故障在重合闸一次重合之后消失时, 重合闸动作会引起幅值相同的两级电压暂降, 仿真结果如图 5 所示。

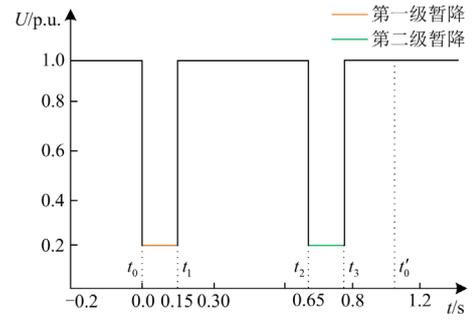


图 5 辐射网中的两级电压暂降波形

Fig. 5 Two-stage voltage sag waveform in radiation network

图 5 中, t_0 时刻 25-27 线路中点发生三相瞬时性故障, 节点 30 的电压下降到 0.195 p.u., t_1 时刻节点 25 侧 I 段保护动作, 断路器跳开, 节点 30 的电压恢复正常。 t_2 时刻节点 25 侧重合闸重合于故障, 节点 30 的电压下降到 0.195 p.u., t_3 时刻节点 25 侧断路器再次跳开, 重合闸进入闭锁状态, 节点 30 的电压恢复正常。当 t_0 时刻 25-27 线路中点发生永久性故障时, 重合闸动作会引起和图 5 波形相同的两级电压暂降, 动作过程同上。

2 敏感设备的多级电压暂降 PIT 特性曲线

多级电压暂降发生时, 各级暂降下设备的工业过程都不相同, 确定多级电压暂降事件对设备造成的影响, 需要对各级暂降工业过程之间的关系进行合理的刻画。因此本节将过程免疫时间应用于多级电压暂降的综合评估中。利用过程免疫时间反映的过程参数变化规律, 分析工业过程的运行状态, 可有效衡量不同工业过程的电压暂降响应特性^[17]。PIT 定义为在遭受给定幅值的电压暂降后, 过程参数超过允许限制值的时间, 如图 6 所示。

图 6 中: P_{nom} 和 P_{limit} 分别是过程参数额定值和临界值; t_0 、 $t_0 + \Delta t$ 、 t_{limit} 分别为过程经受电压暂降的起始时刻、过程参数偏离额定值的时刻以及超出临界值的时刻; T_{PI} 为过程免疫时间^[18]。当暂降持续时间 $T < \Delta t$ 时, 过程参数不会发生变化, 过程处于正常状态; 当暂降持续时间 $\Delta t < T < T_{PI}$ 时, 过程

参数处于下降趋势，过程可自动恢复到正常状态；当 $T > T_{PI}$ 时，过程中断。因此， T_{PI} 越长，过程免疫力越强^[19]。

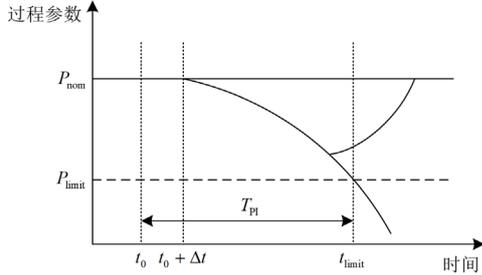


图 6 过程免疫时间曲线
Fig. 6 Curve of PIT

由于设备状态的不确定性^[20]，敏感设备受电压暂降的影响程度不仅与电压暂降特征量有关，还与设备过程参数相关。为了更准确地对多级电压暂降严重程度进行评估，分析了多级电压暂降下敏感设备的过程免疫时间，以环网中永久性故障下的三级电压暂降(图 4 所示)为例，对其 PIT 特性曲线进行刻画，结果如图 7 所示。

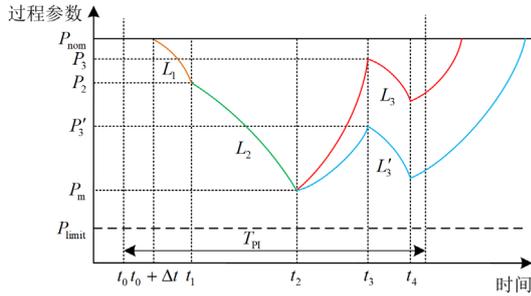


图 7 环网中永久性故障下的三级电压暂降 PIT 曲线
Fig. 7 Three-stage voltage sag PIT curve under permanent fault in meshed network

图 7 中， t_0 为第一段电压暂降的发生时刻， L_1 是第一级暂降的 PIT 特性曲线，其初始过程参数为 P_{nom} 。 t_1 为第二段暂降的发生时刻， L_2 是第二级暂降的 PIT 特性曲线，其初始过程参数为 P_2 ，结束过程参数为 P_m 。 $t_2 \sim t_3$ 是敏感设备过程参数的恢复时间，由于其恢复程度是不确定的，根据过程参数恢复的大小不同(以 P_2 为界)，第三级暂降的 PIT 特性曲线会出现 L_3 和 L'_3 两种情况，初始过程参数分别为 P_3 和 P'_3 。 t_4 时刻故障切除，过程逐渐恢复到正常状态。上述分析表明第二级暂降受第一级暂降的影响，第三级暂降受第一、二级暂降的共同影响，本文将这种影响关系称为各级暂降的关联性。

3 多级电压暂降严重程度评估

3.1 基于权值函数法的单级电压暂降严重程度评估

基于权值函数法对电压暂降严重程度进行评估时，首先构造影响度函数 D ，用其量化电压暂降的严重程度，影响度函数值越大，说明电压暂降越严重。

$$D = F(C), 0 < D < 1 \quad (1)$$

式中： $F(\cdot)$ 为映射函数； C 为电压暂降的暂降幅值和持续时间。

图 8 所示为敏感设备广义耐受曲线。从图 8 可以看出，电压暂降幅值与持续时间对设备的影响度函数应具有两端变换比较平缓、中间变化较快的特性。而式(2)所示的逻辑斯蒂函数满足这一特征，可将其作为电压暂降幅值与持续时间的影响度函数^[11]。

$$y = \frac{1}{1 + e^{-a-bx}} \quad (2)$$

式中， a 、 b 为控制参数。

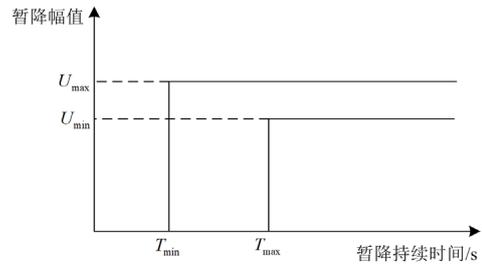


图 8 敏感设备广义耐受曲线

Fig. 8 Generalized tolerance curve for sensitive devices

依照文献[12]所述，可以得到基于权值函数法的电压暂降幅值影响度 D_M 、持续时间影响度 D_T 及综合影响度 S ，分别如式(3)一式(5)所示。

$$D_M = \frac{1}{1 + e^{-4+7U}} \quad (3)$$

$$D_T = \frac{1}{1 + e^{3-10T}} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{D_T^2 + D_M^2}{2}} \quad (5)$$

式中， U 、 T 分别为电压暂降幅值和持续时间。

应用式(3)一式(5)可分别求得单级电压暂降幅值的影响度、持续时间的影响度及单级电压暂降的综合影响度。 S 越大，单级电压暂降程度越严重。

3.2 基于改进层次分析法的多级电压暂降严重程度评估

通过对多级电压暂降下敏感设备的工业过程分析可知，多级电压暂降的严重程度评估不能认为是各级暂降的简单相加，需要充分考虑各级暂降之间的关联性，合理确定各级暂降的重要程度占比，使

得评估结果更接近真实情况。

层次分析法是一种权值计算方法^[21], 通过比较各因素间的相对重要程度, 建立成对比较矩阵, 计算其最大特征值所对应的特征向量, 从而得到能够反映各因素的相对重要程度^[22-23]。应用层次分析法的 1-9 等级的专家打分构造各级暂降的成对比较矩阵, 会使评估的主观性过强, 难以真实反映出各级暂降的重要程度占比。

本文考虑了敏感设备的 PIT 曲线特性, 对层次分析法的专家打分进行了改进。基于第 2 节的分析结果可知, 各级暂降之间存在关联性, 在对各级暂降进行专家打分时可以将 1-9 等级的主观印象换成与各级暂降指标相关的客观赋值, 以此降低层次分析法的主观性。

由于目前对 PIT 曲线中过程参数的研究大多还处于定性分析的状态^[17-18], 本文根据各级暂降的关联性, 对各级暂降初始过程参数的大小进行定性比较, 以此来衡量各级暂降的相对重要程度。第一级暂降越严重, 其暂降指标 S_1 越大, 第二级暂降的初始过程参数 P_2 就会越小, 则第二级暂降对第一级暂降的相对重要程度越大且大于 1, 而式 $1/(1-S_1)$ 满足这一特性, 可用其量化第二级暂降相对第一级暂降的重要程度。因此两级电压暂降的成对比较矩阵用 A 矩阵表示。

$$A = \begin{matrix} & S_1 & S_2 \\ S_1 & \begin{bmatrix} 1 & 1-S_1 \\ 1/(1-S_1) & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

式中, S_1 和 S_2 分别为第一、二级暂降的综合影响度指标。

对于三级电压暂降, 当第三级暂降的初始过程参数 P_3 大于第二级暂降的初始过程参数 P_2 时 (L_3 特性曲线), 第二级暂降越严重, 其暂降指标 S_2 越大, P_3 就会越小, 第二、三级暂降的相对重要程度也会越接近, 那么第三级暂降对第二级暂降的相对重要程度应随着第二级暂降严重程度的增大而增大, 且小于 1, 可用 S_2 进行量化。第三级暂降相对第一级暂降的重要程度受第一、二级暂降的共同影响, 第二级暂降相对第一级暂降的重要程度为 $1/(1-S_1)$, 第三级暂降相对第二级暂降的重要程度为 S_2 , 由此可得第三级暂降相对第一级暂降的重要程度为 $S_2/(1-S_1)$, 且其符合 S_1 或 S_2 越大, 第三级暂降相对第一级暂降重要程度越大的特征, 因此 L_3 特性曲线对应的三级电压暂降的成对比较矩阵可用 B 矩阵表示。

$$B = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 \\ S_1 & \begin{bmatrix} 1 & 1-S_1 & (1-S_1)/S_2 \\ 1/(1-S_1) & 1 & 1/S_2 \\ S_2/(1-S_1) & S_2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

式中, S_3 为第三级暂降的综合影响度指标。

当第三级暂降的初始过程参数 P_3' 小于第二级暂降的初始过程参数 P_2 时 (L_3' 特性曲线), 第二级暂降越严重, 暂降指标 S_2 越大, P_3' 就会越小, 第三级暂降对第二级暂降的相对重要程度会越大且大于 1, 可用式 $1/(1-S_2)$ 量化第三级暂降相对第二级暂降的重要程度。而第二级暂降相对第一级暂降的重要程度为 $1/(1-S_1)$, 由此可得第三级暂降相对第一级暂降的重要程度为 $1/(1-S_1)(1-S_2)$, 且其符合 S_1 或 S_2 越大, 第三级暂降相对第一级暂降重要程度越大的特征, 但相较于 L_3 特性曲线, 其重要程度变大的速度会更快, 因此 L_3' 特性曲线对应的三级电压暂降的成对比较矩阵用 C 矩阵表示。

$$C = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 \\ S_1 & \begin{bmatrix} 1 & 1-S_1 & (1-S_1)(1-S_2) \\ 1/(1-S_1) & 1 & 1-S_2 \\ 1/(1-S_1)(1-S_2) & 1/(1-S_2) & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

成对比较矩阵 A 、 B 、 C 为正互反矩阵且都满足式(9), 因此 A 、 B 、 C 矩阵皆为一致性矩阵, 满足一致性检验^[24]。

$$a_{ij} = a_{ik}a_{kj} \quad (9)$$

式中: a_{ij} 、 a_{ik} 、 a_{kj} 分别为矩阵中第 i 行第 j 列、第 i 行第 k 列、第 k 行第 j 列的元素; i 、 j 、 k 的取值范围为 $[1, n]$, n 为矩阵阶数。

本文分析了各级暂降的初始过程参数, 利用各级暂降的关联性和严重程度指标对层次分析法进行改进, 构造了各级暂降的成对比较矩阵, 因此所构造矩阵最大特征值对应的特征向量 ω_i , 能够反映每一级暂降在多级电压暂降评估中的重要程度占比, 并且 ω_2 和 ω_3 均大于 ω_1 。若以第一级暂降为基准, 设其权重系数为 1, 则第二、三级暂降的权重系数都应该大于 1, 可以将 ω_2/ω_1 作为第二级暂降的权重系数, ω_3/ω_1 作为第三级暂降的权重系数, 符合第二、三级暂降在多级电压暂降评估中对设备的影响程度。因此多级电压暂降严重程度评估指标 S_D 如式(10)所示。

$$S_D = S_1 + \frac{\omega_2}{\omega_1} S_2 + \frac{\omega_3}{\omega_1} S_3 \quad (10)$$

基于改进层次分析法的多级电压暂降严重程度

评估流程如图 9 所示。

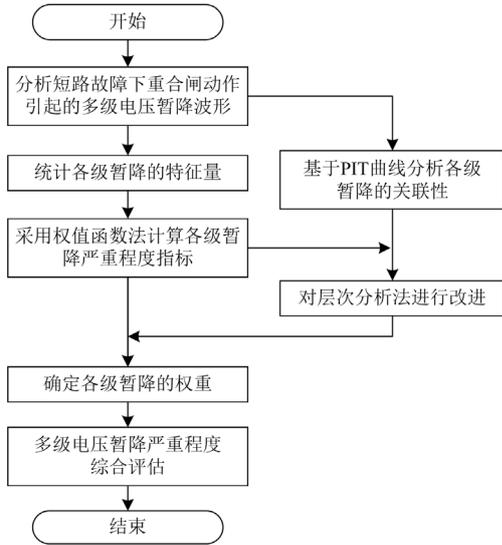


图 9 基于改进层次分析法的多级电压暂降严重程度评估流程图

Fig. 9 Flow chart of severity evaluation of multistage voltage sag based on improved analytic hierarchy process

4 算例分析

应用本文所提评估方法，以 IEEE30 节点系统为例进行仿真。IEEE30 节点系统为环网结构，由 30 条母线、37 条线路、6 台发电机组以及 4 台变压器组成，含 132 kV 和 33 kV 两个电压等级。假设所有变压器为 Y0/Y0 接线方式。为了验证辐射网络中本文所提出的评估方法，在 IEEE30 节点系统的基础上将节点 24 和 25 之间的线路断开，构造出部分辐射型网络。设节点 30 为敏感设备节点，改造后的 IEEE30 节点系统如图 10 所示。

改造后的 IEEE30 节点系统的线路配置阶段式保护。线路保护时限特性如图 1 所示，I 段保护覆盖线路全长的 80%，I、II 段保护动作时限如表 1 所示^[15]。依照本文配置的线路保护，结合前文对多级电压暂降的分析，可以得到 IEEE30 节点系统两个电压等级下电压暂降的持续时间。根据 IEC61000-2-8 标准，将持续时间映射到(0,1)区间^[11]，然后计算出持续时间的影响度，结果如表 2 所示。

表 3 瞬时性故障下节点 30 所接敏感设备的多级电压暂降严重程度评估

Table 3 Evaluation of multistage voltage sag severity of sensitive device of node 30 under transient fault

故障位置	第一级暂降				第二级暂降				S_D	S_m
	D_{M1}	D_{T1}	S_1	α_1	D_{M2}	S_2	α_2			
10%	0.947	0.113	0.674	0.246	0.776	0.438	0.630	0.754	2.605	1.304
50%	0.929	0.113	0.662	—	—	—	—	—	0.662	0.662
90%	0.935	0.113	0.666	0.250	0.347	0.438	0.395	0.750	1.851	1.061

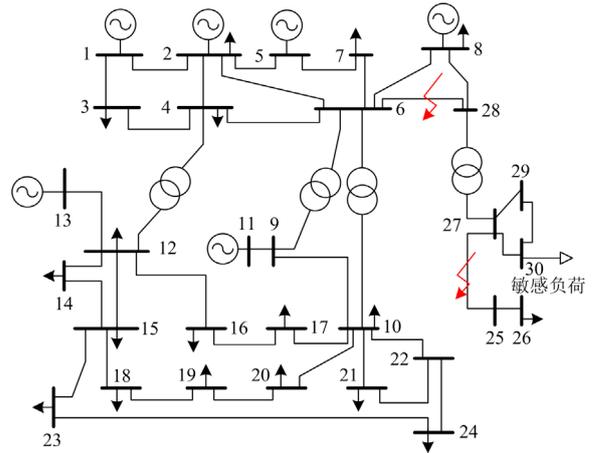


图 10 改造后的 IEEE30 节点系统
Fig. 10 Modified IEEE30 bus system

表 1 阶段式保护的时限特性

Table 1 Time limit characteristic of staged protection

电压等级/kV	保护动作时限/ms	
	I 段保护	II 段保护
132	80	380
33	150	550

表 2 持续时间的区间映射及影响度

Table 2 Interval mapping and impact of duration

持续时间/s	映射时间/s	持续时间影响度
0.08	0.0938	0.113
0.3	0.275	0.438
0.15	0.1667	0.209
0.55	0.3875	0.706

4.1 环网中的多级电压暂降评估

改造后的 IEEE30 节点系统中，在 6-28 线路距首节点不同位置处设置三相瞬时性故障(故障在重合闸一次重合之前或之后消失)和永久性故障。根据本文方法，可以得到节点 30 所接敏感设备的多级电压暂降严重程度评估结果，如表 3—表 5 所示。

表 3 为瞬时性故障在重合闸一次重合之前消失时敏感设备的多级电压暂降评估结果。表 4 和表 5 为永久性故障下敏感设备的多级电压暂降评估结果。根据本文分析可知，在重合闸一次重合之后消失的三相瞬时性故障与三相永久性故障引起的三级

表 4 永久性故障下节点 30 所接敏感设备的多级电压暂降严重程度评估 ($\omega_2 > \omega_3$)Table 4 Evaluation of multistage voltage sag severity of sensitive device of node 30 under permanent fault ($\omega_2 > \omega_3$)

故障位置	第一级暂降				第二级暂降				第三级暂降				S_D	S_m
	D_{M1}	D_{T1}	S_1	ω_1	D_{M2}	D_{T2}	S_2	ω_2	D_{M3}	D_{T3}	S_3	ω_3		
10%	0.947	0.113	0.674	0.167	0.776	0.438	0.630	0.511	0.764	0.113	0.546	0.322	3.654	1.850
50%	0.929	0.113	0.662	0.253	0.833	0.438	0.594	0.747	—	—	—	—	2.416	1.256
90%	0.935	0.113	0.666	0.194	0.347	0.438	0.395	0.578	0.891	0.113	0.635	0.228	2.589	1.696

表 5 永久性故障下节点 30 所接敏感设备的多级电压暂降严重程度评估 ($\omega_2 < \omega_3$)Table 5 Evaluation of multistage voltage sag severity of sensitive device of node 30 under permanent fault ($\omega_2 < \omega_3$)

故障位置	第一级暂降				第二级暂降				第三级暂降				S_D	S_m
	D_{M1}	D_{T1}	S_1	ω_1	D_{M2}	D_{T2}	S_2	ω_2	D_{M3}	D_{T3}	S_3	ω_3		
10%	0.947	0.113	0.674	0.081	0.776	0.438	0.630	0.248	0.764	0.113	0.546	0.671	7.126	1.850
50%	0.929	0.113	0.662	0.253	0.833	0.438	0.594	0.747	—	—	—	—	2.416	1.256
90%	0.935	0.113	0.666	0.112	0.347	0.438	0.395	0.335	0.891	0.113	0.635	0.553	4.983	1.696

(注: “—” 表示无数据; D_{M1} 、 D_{M2} 、 D_{M3} 分别表示第一、二、三级暂降幅值的影响度; D_{T1} 、 D_{T2} 、 D_{T3} 分别表示第一、二、三级暂降持续时

间的影响度; $S_m = \sum_{i=1}^n S_i$, n 为暂降级数)

电压暂降波形和严重程度均相同, 因此表 4 和表 5 也能反映三相瞬时性故障(故障在一次重合之后消失)下敏感设备的多级电压暂降评估结果。由于本文采用的是阶段式保护, 表 3 中 50%故障位置处, 线路两端的 I 段保护动作时间相同, 此时敏感设备会发生单级电压暂降。同理表 4 和表 5 的 50%故障位置处, 两侧断路器同时跳开, 敏感设备出现两级电压暂降。

通过比较表 3 和表 4 的评估结果可知, 瞬时性故障消失时间为重合闸一次重合之前, 且故障位置相同的情况下, 永久性故障下的多级电压暂降评估指标比瞬时性故障下的指标大, 由此可见永久性故障下的多级电压暂降对设备造成的影响更为严重。说明本文方法能正确反映重合闸动作特性对敏感设备电压暂降严重程度的影响。

在永久性故障中, 由于敏感设备状态的不确定性, 第三级暂降的初始过程参数会不相同, 敏感设备可能出现表 4 和表 5 两种严重程度的电压暂降。以 10%故障位置为例, 第三级暂降的重要程度占比大于第二级暂降的重要程度占比时($\omega_2 < \omega_3$), 此种情况对应曲线 L'_3 , 应用本文方法求得综合影响度为 7.126; 第三级暂降的重要程度占比小于第二级暂降的重要程度占比时($\omega_2 > \omega_3$), 此种情况对应曲线 L_3 , 求得综合影响度为 3.654。可以看出敏感设备在曲线 L'_3 情况下的暂降严重程度更大, 这是由于在 L'_3 曲线下的第三级暂降初始过程参数比 L_3 曲线下的更低, 过程免疫能力更弱, 电压暂降对敏感设备的影响也就更为严重。反映了本文利用各级暂降指标构造成对比较矩阵对层次分析法改进的合理性。

但如果仅将各级暂降评估指标简单求和, 暂降综合影响度 S_m 为 1.85。与本文方法相比, 简单求和方式的评估结果显然偏小, 这是因为简单求和方式下的评估是将各级暂降独立看待, 未考虑实际过程中各级暂降的关联性, 其认为第二、三级暂降的初始过程参数为正常值, 但实际上第二、三级暂降的初始过程参数是低于正常值的, 此时敏感设备的过程免疫能力会减弱, 暂降对设备造成的影响会更为严重。因此简单求和方式下的评估结果无法反映真实情况, 造成欠评估。同时也说明本文所得多级暂降严重程度评估结果能较好地反映敏感设备的实际物理特性。

4.2 辐射网中的多级电压暂降评估

改造后的 IEEE-30 节点系统中, 在 25-27 线路距首节点不同位置处设置三相永久性故障。根据本文分析可知, 在重合闸一次重合之后消失的三相瞬时性故障与永久性故障引起的两级电压暂降波形和严重程度均相同, 因此只需要计算出三相永久性故障下节点 30 所接敏感设备的两级电压暂降严重程度评估的数据即可, 结果如表 6 所示。

考虑到保护时限特性, 不同故障位置下电压暂降的持续时间不同。虽然 50%故障位置下暂降深度较 90%故障位置下的深度大, 但由于其持续时间较短, 综合评估后 90%故障位置下的暂降严重程度更大。说明电压暂降的严重程度是由暂降幅值、持续时间共同作用的结果。本文的综合评估结果 S_D 均大于对应的 S_m , 验证了本文方法所得评估结果的适用性和合理性。

综上所述, 基于改进层次分析法的多级电压暂降严重程度评估方法既能够合理地量化敏感设备的

表 6 辐射网中节点 30 所接敏感设备的两级电压暂降严重程度评估

Table 6 Evaluation of two-stage voltage sag severity of sensitive device of node 30 in radiation network

故障位置	第一级暂降				第二级暂降				S_D	S_m
	D_{M1}	D_{T1}	S_1	ω_1	D_{M2}	D_{T2}	S_2	ω_2		
50%	0.933	0.209	0.676	0.245	0.933	0.209	0.676	0.755	2.759	1.352
90%	0.867	0.706	0.791	0.173	0.867	0.706	0.791	0.827	4.572	1.582

多级电压暂降严重程度,也避免了简单求和方式下欠评估的现象。

5 结论

1) 本文分析了短路故障下重合闸动作引起的多级电压暂降波形,基于敏感设备的过程免疫时间,合理刻画了多级电压暂降下敏感设备的工业过程。

2) 利用各级暂降的关联性和严重程度指标值来反映各级暂降的相对重要程度,并对层次分析法进行改进,合理地量化了各级暂降的权重,提出了多级电压暂降严重程度评估方法,避免了将各级暂降评估指标简单求和造成的欠评估,为多级电压暂降的评估和治理提供依据。

3) 对改造后的 IEEE30 节点系统设置不同场景进行仿真,验证了本文提出的多级电压暂降严重程度评估方法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 辛峰, 尤向阳, 葛笑寒, 等. 基于空间相量模型的三相电压暂降扰动特征提取与分类[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 59-64.
XIN Feng, YOU Xiangyang, GE Xiaohan, et al. Feature extraction and classification of three-phase voltage dips based on a space phasor model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 59-64.
- [2] 王璐, 肖先勇, 汪颖, 等. 基于深度神经网络的电压暂降经济损失评估模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 156-162.
WANG Lu, XIAO Xianyong, WANG Ying, et al. DNN-based estimation model of economic loss caused by voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 156-162.
- [3] 吴国诚, 叶樊, 梁帅伟, 等. 基于电压持续曲线的多次电压暂降严重程度评估方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 182-200.
WU Guocheng, YE Fan, LIANG Shuaiwei, et al. Evaluation method of multiple voltage sag severity based on voltage duration curves[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 182-200.
- [4] 刘旭娜, 肖先勇, 汪颖. 电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 644-658.
LIU Xuna, XIAO Xianyong, WANG Ying. Voltage sag severity and its measure and uncertainty evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 644-658.
- [5] 吕金炳, 卢文清, 刘创华, 等. 基于能量指标的电压暂降严重程度评估方法研究[J]. 现代电力, 2019, 36(1): 79-87.
LÜ Jinbing, LU Wenqing, LIU Chuanghua, et al. Research on evaluation method of voltage sag severity based on energy index[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(1): 79-87.
- [6] 徐悦, 孙建军, 丁凯, 等. 基于场景构建的电压暂降特征量随机评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 105-112.
XU Yue, SUN Jianjun, DING Kai, et al. Random evaluation method of voltage sag characteristics based on scenario construction[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 105-112.
- [7] 胡文曦, 肖先勇, 李成鑫. 考虑多维特征刻画的电压暂降严重程度评估方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 331-338.
HU Wenxi, XIAO Xianyong, LI Chengxin. Voltage sag severity assessment method considering multi-dimension characterization[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 331-338.
- [8] 何英杰, 支文浩, 张义坤, 等. 典型敏感设备电压暂降耐受能力自动测试系统研究[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1956-1964.
HE Yingjie, ZHI Wenhao, ZHANG Yikun, et al. Research on automatic test system for voltage sag tolerance of typical sensitive equipment[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1956-1964.
- [9] 李天楚, 伍智鹏, 方铭, 等. 基于 Larsen 推理的电压暂降下工业过程负荷损失率评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 145-153.
LI Tianchu, WU Zhipeng, FANG Ming, et al. Load loss rate evaluation method of an industrial process under voltage sag based on Larsen reasoning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 145-153.
- [10] 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.
- [11] 杨家莉, 刘书铭, 徐永海, 等. 基于熵权法的电压暂降严重程度综合评估方法[J]. 现代电力, 2017, 34(4): 40-49. YANG Jiali, LIU Shuming, XU Yonghai, et al. Comprehensive evaluation method of voltage sag severity based on entropy coefficient method[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(4): 40-49.
- [12] 卢文清, 常乾坤, 贾东强, 等. 设备侧电压暂降严重程度评估方法研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 175-182. LU Wenqing, CHANG Qiankun, JIA Dongqiang, et al. Research on evaluation methods of voltage sag severity for equipment side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 175-182.
- [13] 梁振锋, 张清, 张惠智, 等. 减小电压暂降深度的三相重合闸时序研究[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1781-1786. LIANG Zhenfeng, ZHANG Qing, ZHANG Huizhi, et al. Study on three-phase reclosing sequence to reduce voltage sag depth[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1781-1786.
- [14] 梁振锋, 张清, 宋国兵, 等. 减小电压暂降深度及持续时间的单相重合闸时序方案[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 165-170. LIANG Zhenfeng, ZHANG Qing, SONG Guobing, et al. Single-phase reclosing sequence for reducing voltage sag depth and duration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 165-170.
- [15] 陈礼频, 肖先勇, 张志, 等. 考虑保护时限特性的电压暂降频次评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 113-119. CHEN Lipin, XIAO Xianyong, ZHANG Zhi, et al. Voltage sags frequency assessment considering the time characteristic of protection system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 113-119.
- [16] XU Yonghai, FAN Xingguan, DENG Siying, et al. A voltage sag severity evaluation method for the system side which considers the influence of the voltage tolerance curve and sag type[J]. Energies, 2021, 14: 5065.
- [17] 李丹丹, 肖先勇, 刘阳, 等. 利用过程免疫时间优化保护的电压暂降减缓方案[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 95-100. LI Dandan, XIAO Xianyong, LIU Yang, et al. Voltage sag mitigation scheme using protection optimization with process immunity time[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 95-100.
- [18] 肖先勇, 谭秀美, 汪颖, 等. 基于电气特性-物理属性-感知损失的电压暂降经济损失评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 105-110. XIAO Xianyong, TAN Xiumei, WANG Ying, et al. Voltage sag economic losses assessment based on electrical characteristic-physical attribute-perceived loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 105-110.
- [19] 李春海, 李华强, 刘勃江. 基于过程免疫不确定性的工业用户电压暂降经济损失风险评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 136-142. LI Chunhai, LI Huaqiang, LIU Bojiang. Risk assessment based on process immunity uncertainty for industrial customers' financial losses due to voltage sags[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 136-142.
- [20] 肖先勇, 陈武, 杨洪耕. 敏感设备电压暂降故障水平的多不确定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 36-42. XIAO Xianyong, CHEN Wu, YANG Honggeng. Multi-uncertainty assessment for failure level of sensitive equipment caused by voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 36-42.
- [21] 季玉琦, 潘超, 肖晗, 等. 分布式电源电压支撑能力层次分析评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 163-171. JI Yuqi, PAN Chao, XIAO Han, et al. Hierarchical analysis and evaluation of the voltage support capability of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 163-171.
- [22] 刘颖英, 冯丹丹, 林才华, 等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176. LIU Yingying, FENG Dandan, LIN Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [23] GUO Xiaohan, LI Yong, WANG Shaoyang, et al. A comprehensive weight-based severity evaluation method of voltage sag in distribution networks[J]. Energies, 2021, 14, 6434.
- [24] DONG Yunxia. Evaluation method of voltage sag severity in distribution networks[J]. International Journal of Energy and Power Engineering, 2021, 10(6): 135-140.

收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2023-01-29

作者简介:

马莉(1974—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量、供电安全和配电自动化等; E-mail: 710849937@qq.com

陈应雨(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压暂降评估以及治理。E-mail: 1755670719@qq.com

(编辑 魏小丽)