

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221860

变电站二次电缆瞬态电磁骚扰的特征统计方法与 不确定度分析

叶海¹, 李彩云², 任旭超³, 章耀耀¹, 肖迈⁴, 韩学军¹, 张卫东⁵

(1. 国网华东分部电力调度控制中心, 上海 200120; 2. 保定电力职业技术学院(国网冀北电力有限公司技能培训中心), 河北 保定 071051; 3. 国网江苏省电力有限公司电力调度控制中心, 江苏 南京 210000; 4. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司, 江苏 南京 210000; 5. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对瞬态电磁骚扰数据样本量小和分散性强的特点, 结合自助统计法, 提出了偏差修正的自助置信区间估计法和多次测量不确定度的 B 类评估方法。首先在变电站测量了开关操作时二次电缆端口的瞬态电磁骚扰, 其次应用基于自助法的随机加权原理和偏差修正的自助置信区间估计法, 得到特征参数的统计均值和置信区间。然后应用瞬态电磁骚扰多次测量不确定度的 B 类评估方法, 得到了特征参数的不确定度。最后评估标准波形特征参数与实测波形的符合性。分析结果表明: 多次测量骚扰电压峰峰值的分散性是产生不确定度的主要因素; 100~300 kHz 区间实测骚扰电压的上升时间显著长于 100 kHz 慢速阻尼振荡波; 6.5~10 MHz 区间实测骚扰电压的上升时间显著长于快速阻尼振荡波; 实测骚扰电压波形随区间频率的增加, 持续时间缩短。

关键词: 二次电缆; 瞬态电磁骚扰; 统计方法; 不确定度; 抗扰度

Statistical analysis method and uncertainty of transient electromagnetic disturbance measured on secondary cables in substations

YE Hai¹, LI Caiyun², REN Xuchao³, ZHANG Yaoyao¹, XIAO Mai⁴, HAN Xuejun¹, ZHANG Weidong⁵

(1. Dispatching Control Center, East Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China; 2. Baoding Electric Power Vocational and Technical College (State Grid Jibei Electric Power Company Limited Skills Training Center), Baoding 071051, China; 3. Dispatching Control Center, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China; 4. EHV Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China; 5. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Because of the characteristics of transient electromagnetic disturbance characteristics like small sample and large dispersion, and combined with Bootstrap method, a bias-corrected bootstrap confidence interval estimation method and the B-type uncertainty evaluation method for multiple measurements are proposed. First, the transient electromagnetic disturbance of the secondary cable port during a switching operation is measured in the substation. Then, a random weighting method based on the Bootstrap and a self-confidence interval estimation method for deviation correction are applied to obtain the statistical mean and confidence interval of the characteristic parameters. Then the B-type uncertainty evaluation method for multiple measurements is applied to obtain the uncertainty of the characteristic parameters. Finally, the compliance between the standard waveform characteristic parameters and the measured waveform is evaluated. The results show that the dispersion of the peak-to-peak disturbance voltage from multiple measurements is the major factor in the uncertainty; the rise time of the measured disturbance voltage in the 100~300 kHz range is significantly longer than that of the 100 kHz slow damping oscillation wave; the rise time of the measured disturbance voltage in the 6.5~10 MHz range is significantly longer than that of the fast damping oscillating wave; the duration of measured disturbance voltage waveform decreases with increasing frequency of the interval.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900900).

Key words: secondary cable; transient electromagnetic disturbance; statistical method; uncertainty; immunity

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900900)

0 引言

随着智能变电站、特高压变电站(换流站)建设的不断推进,截至2021年,110 kV及以上智能变电站预计达到总体变电站的73%,在十三五期间,新建了7700座智能变电站并有大量常规站改造^[1]。新型智能变电站不仅包括工频电场、工频磁场等稳态电磁骚扰^[2],还包括雷击、开关操作产生的瞬态电磁骚扰。站内电磁环境的复杂性、电压等级的提高和站内新型化布局使得部分电磁骚扰的特征也发生了变化^[3-6]。站内二次设备的运行状态直接关系到智能变电站的安全和稳定^[7],二次设备在进入变电站安装运行前均要通过电磁兼容抗扰度试验(例如浪涌(冲击)抗扰度试验等),而由于开关操作、雷击或短路故障产生的瞬态电磁骚扰干扰二次设备正常工作,因此时常发生一次系统稳定运行事故^[8-15],是因为一些二次设备电磁兼容抗扰度要求可能不再适用。因此为了使抗扰度试验波形与实际瞬态电磁骚扰波形更符合,本文在两座500 kV变电站开展二次设备端口的瞬态骚扰电压测量工作,探究其对保护、测量等二次设备的影响,掌握瞬态电磁骚扰特征,评估二次设备瞬态抗扰度标准。

目前,现场测量仍然是获得瞬态电磁骚扰特征最直接有效的技术手段。以往现场的测量大多是针对现有运行二次设备端口的瞬态电磁骚扰,电缆的接地方式已固定,无法对比不同接地方式对瞬态电磁骚扰的影响。为此,本文组织开展了变电站开关操作时二次电缆端口瞬态电磁骚扰的测量工作,专门布设了与工作电缆同路径敷设的4条二次电缆,以研究二次电缆不同接地方式与瞬态电磁骚扰之间的关系。

受开关操作次数的限制,现场测量获得的电磁骚扰样本量小,又受到系统相位、开关位置和操作速度的影响,瞬态电磁骚扰具有较强的随机性,特征参数分散性大,因此需要采取科学的数理统计方法来量化分析瞬态骚扰的特征^[16]。现场测量得到的数据样本分布形式往往偏离正态分布,因此本文采用基于自助法的随机加权统计原理得到瞬态电磁骚扰均值的估计值,该方法不必考虑数据样本的分布形式且适用于小样本统计。在此基础上比较了4种基于自助法的置信区间估计法,择优选取适用于瞬态电磁骚扰特征分析的置信区间估计法,并提出针对实测瞬态电磁骚扰的不确定度评估方法。最后,对变电站开关操作时在二次电缆端口检测到的单脉冲衰减振荡波进行特征参数的统计分析和不确定度评定,将统计结果应用于二次设备瞬态抗扰度标准

的符合度评估,为抗扰度试验标准的修订提供数据参考。

1 瞬态电磁骚扰的统计分析方法

通过对现场测量得到的多个单脉冲波形进行初步分析,可获得波形上升时间、持续时间、峰峰值等多个特征量的样本值。如何由一组样本值对总体的特征进行统计推断是需要研究解决的问题。解决这类问题的数理统计方法通常先确定研究对象的数学模型(即服从何种分布形式),再对测量数据进行参数估计^[17]。因此采用传统的参数统计方法时,样本的分布检验是必不可少的。虽然研究表明当测量较大时,一般服从正态分布,但受限于开关操作次数少且开关位置分散,现场测量的电磁骚扰数据样本量有限,往往会偏离正态分布,因此传统的参数统计方法将不再适用。随着计算机技术的发展,利用计算机模拟抽样的非参数统计方法解决了这一问题。例如随机加权法在自助法的基础上将服从狄利克雷分布的随机向量加在原始样本上,获得加权平均值,并通过计算机算法实现模拟抽样,最后得到统计量的估计值。相比传统参数统计法,该方法最大的优势在于不必对样本的总体作正态分布假设。但是这个统计量估计值相对于真实值的可信度是未知的,还需要采用区间估计的方法,求得包含一定可信度的置信区间。

1.1 基于自助法的随机加权统计原理

计算统计量的估计值采用基于自助法的随机加权统计原理,即在自助法的基础上用一组随机向量对样本进行合理的加权处理,相比自助法更适用于小样本。该方法的核心思想是,将新样本与原始样本类比于样本与总体,新样本模拟了原始样本的分布,用重新抽取的 N 个新样本去推断原始样本的未知参数^[18]。 N 个新样本增大了样本容量,强化了样本统计值,增强了样本的分布趋势。文献[19]详细介绍了基于自助法的随机加权统计原理,其数学描述不再赘述。

在自助法的基础上应用随机加权统计原理,获得了样本区间内不同于原始数据的其他值,丰富了再生样本区间范围内的取值,有效模拟了真实分布为连续分布时非样本观测点处的分布特性,获得更加精确的小样本统计量估计^[20]。

1.2 置信区间估计法

传统参数法的区间估计通常由样本观察值得到的统计量和标准分布的分位数表来估计置信区间。以均值 μ 为中心、置信水平为 $1-\alpha$ 的置信区间可解释为样本服从一定的分布形式下,能以 $1-\alpha$ 的可信

度确定置信区间所包含参数的真实值。然而，当无法确定样本的分布形式时，传统区间估计法不再适用，因此可以采用自助抽样分布来建立包含一定概率的置信区间。文献[21]介绍了基于自助法的 4 种置信区间估计法，分别是正态近似法、百分位法、偏差校正法和百分位 t 法，其对比如表 1 所示。

表 1 4 种自助置信区间估计法的对比

Table 1 Comparison of four Bootstrap confidence interval estimation methods

方法	优点	局限性
正态近似法	适用于正态分布的参数估计值 $\hat{\theta}$ ；计算量最少	未能利用整个 $F_n^*(\hat{\theta})$ ；需要有关 $F_n^*(\hat{\theta})$ 的参数假设
百分位法	使用整个 $F_n^*(\hat{\theta})$ ；允许 $F_n^*(\hat{\theta})$ 是非对称的；不受变换的影响	小样本可能导致参数估计值精度低；假设 $F_n^*(\hat{\theta})$ 是无偏的
偏差校正法	适用于所有百分位法；允许 $F_n^*(\hat{\theta})$ 存在偏差；能根据 $F_n^*(\hat{\theta})$ 计算得到	需要有限的参数假设
百分位 t 法	第一类错误水平低；能处理有偏的 $F_n^*(\hat{\theta})$	受变换的影响；双重自助的计算量非常大

由于现场测量的瞬态电磁骚扰往往偏离正态分布，且新样本的经验分布函数 $F_n^*(\hat{\theta})$ 也未必无偏，因此正态近似法和百分位法不适用于本文。偏差校正法和百分位 t 法较适用于瞬态电磁骚扰样本量小、分散性强的样本。由于偏差校正参数假设的要求低，且百分位 t 法易受变换影响，计算量大，因此计算统计量估计值的置信区间采用偏差校正法更为合适。

偏差校正法是对百分位 t 法求置信区间的一种矫正方法。百分位法的原理较简单，首先采用随机加权法得到统计量的抽样分布值，然后由小到大对抽样分布值进行排序，最后根据置信水平找到相应百分位点的分布值。例如，置信水平为 $1-\alpha$ 的置信区间包括估计值经验分布函数 $F(\hat{\theta})$ 的第 $\alpha/2$ 和 $(1-\alpha/2)$ 百分位值之间的所有新样本参数估计值 $\hat{\theta}(F_n^*)$ 。百分位法的局限性在于需要假设 $F_n^*(\hat{\theta})$ 是原始样本经验分布函数 $F_n(\theta)$ 的无偏估计，而偏差校正法，在百分位法的基础上进行了改进，不受 $F_n^*(\hat{\theta})$ 无偏性的约束。通过求取正态分布随机变量 z_0 ，对置信区间的两个端点进行调整，如式(1)所示。

$$z_0 = \Phi^{-1}\{P(\hat{\theta}^* \leq \hat{\theta})\} \quad (1)$$

式中： Φ 是标准正态分布函数； $P(\cdot)$ 是概率函数。

偏差校正置信区间的低端点 $\hat{\theta}_d$ 为新样本参数估计值 $\hat{\theta}^*$ 在 $\{\Phi(2z_0 + z_{\alpha/2})\} \times 100\}$ 百分位上的值。偏差校正置信区间的高端点 $\hat{\theta}_u$ 为 $\hat{\theta}^*$ 在 $\{\Phi(2z_0 +$

$z_{1-\alpha/2})\} \times 100\}$ 百分位上的值， $[\hat{\theta}_d, \hat{\theta}_u]$ 为 $\hat{\theta}$ 的置信区间。

经过偏差校正法的调整，统计量的自助抽样分布以 θ 为中心。其局限性在于需要有限的参数假设。首先需假设参数估计值 $\hat{\theta}$ 和真实值 θ 分别满足式(2)、式(3)的单调变换 $\hat{\phi}$ 、 ϕ 。

$$\hat{\phi} - \phi \sim N(z_0\sigma, \sigma^2) \quad (2)$$

$$\hat{\phi}^* - \hat{\phi} \sim N(z_0\sigma, \sigma^2) \quad (3)$$

式中： σ 为样本的标准差； σ^2 为样本方差； $\hat{\phi}^*$ 为新样本参数估计值满足的单调变换； $N(z_0\sigma, \sigma^2)$ 代表以 $z_0\sigma$ 为均值、 σ^2 为方差的正态分布。

相比于百分位 t 法，采用偏差校正法的原因在于自助分布 $F_n^*(\hat{\theta})$ 不受变换的影响，即只需知道存在这样的变换，而无需知道变换的具体过程。

2 瞬态电磁骚扰的不确定度评定方法

不确定度表示测量结果在某个区域内以一定的概率分布，是表征测量结果分散性的参数。不确定度越小，表明测量结果距真值的偏离范围就越小，反之，不确定度越大，测量结果距真值的偏离范围就越大。组成标准不确定度的分量很多，根据不同的不确定度分量数值评估方法可分为两类，A 类不确定度 u_A 和 B 类不确定度 u_B [22]。

2.1 瞬态骚扰电压峰峰值的不确定度分析

骚扰电压峰峰值单次测量的影响因素主要有示波器电压测量误差 u_{B1} 、电压分辨率的不确定度 u_{B2} 以及电压探头衰减误差 u_{B3} ，均采用 B 类不确定度评估方法评定 [23-24]。与一般物理量的重复测量不同，骚扰电压峰峰值的多次测量不确定度采用 B 类不确定度评估方法评定。

1) 示波器电压测量的不确定度

根据电压测量所使用的日本横河示波器 DLM2000 用户指南，示波器电压轴精度为 $\pm(8 \text{ div 的 } 1.5\%)$ ，区间服从均匀分布，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，若设定测量量程为 20 V/div ，则区间半宽度 a 为 2.4 V ，则标准不确定度为

$$u_{B1} = a/k = 2.4/\sqrt{3} = 1.3856 \text{ V} \quad (4)$$

2) 电压分辨率的不确定度

示波器的分辨率为 8 bit，相当于有 256 个电压测量差级，若设定测量量程为 20 V/div ，则电压最小分度值为 625 mV ，读数误差通常为最小分度值的十分之一 [25]，在区间服从均匀分布，区间半宽度为 31.25 mV ，则标准不确定度为

$$u_{B2} = a/k = 31.25/\sqrt{3} = 0.0180 \text{ V} \quad (5)$$

3) 探头衰减的不确定度

泰克 P6100 电压探头衰减精确度为 $\pm 2\%$,服从均匀分布,区间半宽度为测量值的 2% ,当测量值为 m 时,则标准不确定度为

$$u_{B3} = a/k = m \times 2\% / \sqrt{3} \quad (6)$$

4) 多次测量的不确定度

由于瞬态电磁骚扰在多次测量中存在随机效应,因此采用 B 类不确定度评估方法进行评定。文献[22]指出,测量估计值 x_i 的不确定度不一定由标准差的倍数给出,可以通过将该不确定度除以对应的包含因子得到。结合偏差校正法得到的统计均值 95% 置信区间 $[x_-, x_+]$,可由式(7)计算得到电压均值的标准不确定度。

$$u_{B4} = [(x_+ - x_-) / 2] / k \quad (7)$$

5) 合成标准不确定度与扩展不确定度

计算合成标准不确定度时考虑到各影响因素相互独立,灵敏系数 $c_i = 1$,则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^4 u_{Bi}^2} \quad (8)$$

合成标准不确定度 u_c 可以表示测量结果的不确定度,但在涉及到安全可靠性的实际应用中有必要提供不确定度量,即测量结果值的区间,并希望有一定的安全裕度,而扩展不确定度则满足了这样的需求。扩展不确定度的计算表达式为

$$U = k u_c \quad (9)$$

在一些评定测量不确定度的文献中常取 $k = t_p(v_{\text{eff}})$,其中 $t_p(v_{\text{eff}})$ 是根据有效自由度 v_{eff} 和 t 分布确定的因子。

$$v_{\text{eff}} = u_c^4 / \sum_{i=1}^M (u_{Bi}^4 / v_i) \quad (10)$$

式中: v_i 代表 t 分布的自由度参数; u_{Bi} 代表每项标准不确定度^[22]; M 代表标准不确定度的数量。

虽然这一方法是确定包含因子 k 、计算扩展不确定度的优选方法,但由于多次测量的不确定度是瞬态电磁骚扰量不确定度的主要影响因素,且不确定度评定均采用 B 类方法,除多次测量的均值近似服从正态分布外,其他不确定度服从均匀分布(自由度为无穷大)。因此不采用根据自由度和 t 分布确定的 t_p 因子,而是按照工程中的常用规定取置信水平 95% , $k = 2$ 。

由此,若骚扰电压特征参数由 Y 表示,则测量结果可表示为 $Y = y \pm U$,或以百分数的形式表示为 $Y = y \times (1 \pm n\%)$,其中: y 代表统计均值; n 为满足

$U = y \times n\%$ 的任意数值。

2.2 瞬态骚扰电压上升(持续)时间的不确定度分析

上升(持续)时间的不确定度影响因素主要有示波器时间测量误差、示波器和高压探头带宽的固有上升时间以及多次测量的随机性^[26]。

1) 数字示波器时间测量精度引入误差

示波器时间测量精度为 $\pm(0.002\% + 50 \text{ ps} + 1 \text{ 个采样周期})$,若设定采样周期为 4 ns ,且一条骚扰电压的上升时间是 t_1 (单位为 μs),则半宽度 a (单位为 ns)为

$$a = 0.002\% \times t_1 \times 103 + 50 \times 10^{-3} + 4 \quad (11)$$

误差在区间均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,此项的标准不确定度为

$$u_{Br1} = a / \sqrt{3} \quad (12)$$

由于上升时间是 10% 峰值点至 90% 峰值点的时间差,因此示波器时间测量引入的不确定度按两次计算。

2) 数字示波器带宽引入误差

根据 DLM2054 示波器技术手册, 500 MHz 带宽引起的固有上升时间 $t = 0.35 / (500 \times 10^6) = 0.7 \text{ ns}$,半宽度为 0.7 ns ,服从均匀分布,则标准不确定度 $u_{Br2} = 0.7 / \sqrt{3} = 0.4041 \text{ ns}$ 。

3) 电压探头带宽引入误差

泰克 P6100 电压探头带宽为 100 MHz ,固有上升时间为 3.5 ns ,则该项因素的标准不确定度 $u_{Br3} = 3.5 / \sqrt{3} = 2.0208 \text{ ns}$ 。

多次测量引入的不确定度分析及合成标准不确定度、扩展不确定度的计算方法,与电压幅度的不确定度评定程序相同。

3 实测瞬态骚扰的特征统计及不确定度分析

3.1 现场试验

本文测量了两座 500 kV 变电站开关操作时二次电缆端口的瞬态骚扰电压,以其中 A 变电站的测试为例给出测量方案的说明,其目的是对比分析变电站二次电缆铠甲层和屏蔽层不同接地方式的抗干扰效果。在就地端子箱和保护屏柜之间沿二次电缆沟道并列敷设 4 根同型铠装屏蔽电缆,电缆型号选择 KVVP2/22-0.45/0.75, 4×4 ,即 4 芯 4 mm^2 的铠装屏蔽控制电缆。为方便测录和对比,考虑让试验的二次电缆受到尽量大的干扰,其敷设路径选择了临近操作开关设备区。敷设起点为 5032 开关汇控柜,终点为 1 号主变保护 A 屏,电缆在 500 kV 设

各区迂回，并经过 1 号主变，从而在投切空载线路和主变时，二次电缆均能受到干扰，敷设路径如图 1 所示。

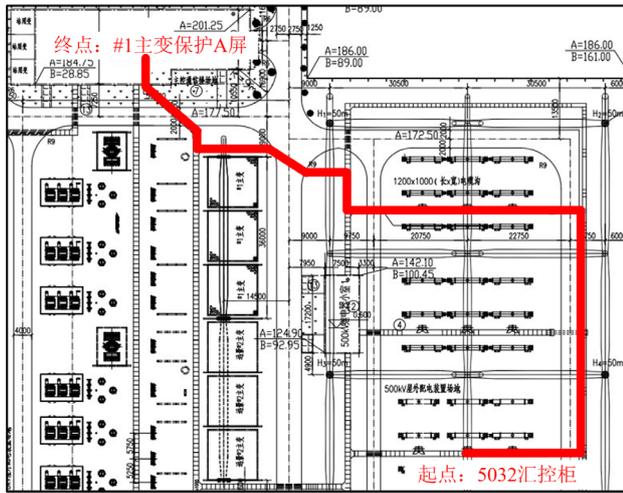


图 1 试验电缆路径图

Fig. 1 Path diagram of the test cable

试验以启动过程中的刀闸或断路器开关操作作为干扰源，采用 DLM2054 示波器测录 4 根电缆中同一编号的芯线在保护屏处对屏内二次地网铜排的电压。试验过程中，通过改变二次电缆在保护小室和现场汇控柜的屏蔽层、铠甲层接地方式，可以实现二次电缆 16 种接地方式的对比，分别测录不同接地方式下保护小室内二次电缆同一芯线对地骚扰电压，从而评估电缆铠甲层及屏蔽层接地方式。接地方式分组情况如表 2 所示，电缆铠甲层和屏蔽层双端接地方式如图 2 所示，保护小室芯线骚扰电压测试接线如图 3 所示。

3.2 开关操作典型单脉冲波形的时域、频域特征

试验共获得 26 次隔离开关或断路器操作时的有效波形数据，所测到的波形是持续时间为数十毫秒的脉冲群，如图 4 所示。展开后的单脉冲波形主要为衰减振荡波，如图 5 所示，图中 P_{k1} 、 P_{k2} 、 P_{k3} 、 P_{k4} 、 P_{k5} 、 P_{k10} 分别代表衰减振荡波的第 1、2、3、4、5、10 个峰值。大量研究表明，刀闸分合闸、断路器分合闸等不同的操作形式只对脉冲群的幅值、变化趋势、持续时间间隔和脉冲个数有影响，本文重点分析了单脉冲波形的特征参数。单脉冲骚扰电压的时域、频域特征定义如下所述。

1) 峰峰值 V_{pp} ：衰减振荡波为双极性波，因而需要考虑峰峰值对二次设备的影响，即瞬态波的正峰值与负峰值之差。

表 2 电缆铠甲层、屏蔽层接地方式分组情况

Table 2 Cable armor layer and shielding layer grounding method grouping

组号	电缆编号	屏蔽层接地状态	铠甲层接地状态
I	1	双端接地	双端接地
	2	保护屏单端接地	双端接地
	3	汇控柜单端接地	双端接地
	4	双端悬浮	双端接地
II	1	双端接地	保护屏单端接地
	2	保护屏单端接地	保护屏单端接地
	3	汇控柜单端接地	保护屏单端接地
	4	双端悬浮	保护屏单端接地
III	1	双端接地	汇控柜单端接地
	2	保护屏单端接地	汇控柜单端接地
	3	汇控柜单端接地	汇控柜单端接地
	4	双端悬浮	汇控柜单端接地
IV	1	双端接地	双端悬浮
	2	保护屏单端接地	双端悬浮
	3	汇控柜单端接地	双端悬浮
	4	双端悬浮	双端悬浮
V	1	双端接地	双端接地
	2	双端接地	保护屏单端接地
	3	双端接地	汇控柜单端接地
	4	双端接地	双端悬浮

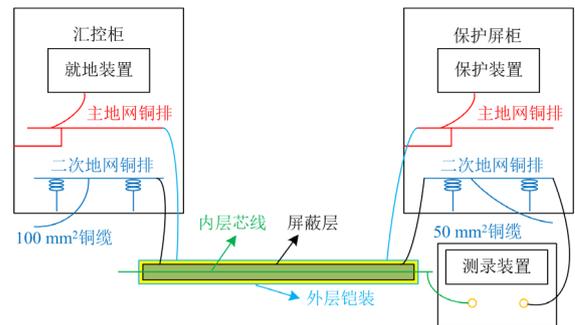


图 2 铠甲层和屏蔽层双端接地方式

Fig. 2 Double-ended grounding of armor layer and shielding layer



图 3 保护小室芯线骚扰电压测试接线图

Fig. 3 Wiring diagram of protection chamber core wire disturbance voltage test

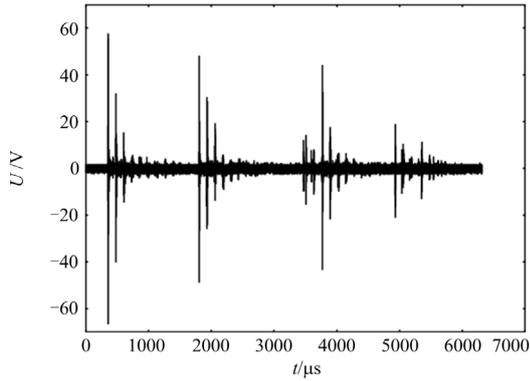


图 4 脉冲群骚扰电压时域波形

Fig. 4 Burst disturbance voltage time domain waveform

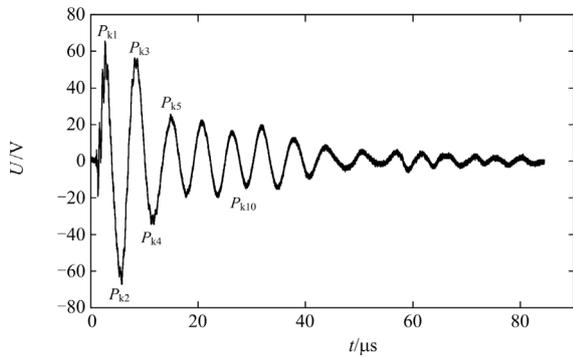


图 5 单脉冲骚扰电压时域波形

Fig. 5 Waveform of single-pulse disturbance voltage time domain

2) 上升时间 t_r : 标准阻尼振荡波的上升时间定义为脉冲瞬时值首次从峰值的 10% 上升到 90% 的时间间隔。

3) 持续时间 t_d : 单脉冲从起始到结束的时间。

4) 主频分布(dominant frequency, DF): 主要频

率分量峰值点所对应的频点分布, 最大频谱密度对应的频率称为主振频率, 如图 6 所示。

5) 频带范围(band width, BW): 本文采用相对判断, 即将高于示波器背景噪声水平的频率列入频带范围。

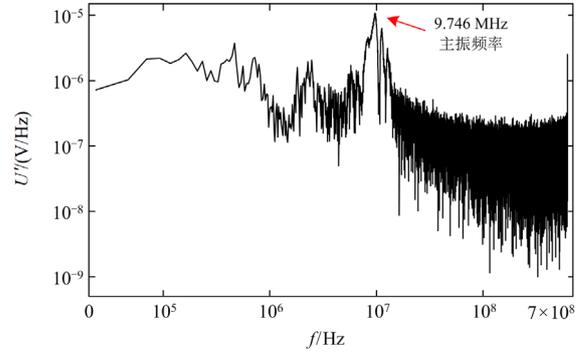


图 6 单脉冲骚扰电压的频谱密度

Fig. 6 Spectral density of the single-pulse disturbance voltage

3.3 单脉冲骚扰电压的特征统计及不确定度分析

以 A 变电站数据为例, 采用基于自助法的随机加权统计原理和偏差矫正法得到各组接地方式下骚扰电压的统计均值和置信区间, 如表 3 所示。由表 3 可得, IV-3 组接地方式下骚扰电压的统计均值最大, 统计均值的不确定度结果及计算过程值如表 4 所示。IV-3 组骚扰电压的均值为 $m_s = (323 \pm 124) \text{ V}$, 其中 323 V 是修正值, 124 V 为统计均值扩展不确定度 $U_n = ku_c(y)$ 的数值, U_n 是由标准不确定度 ($u_c = 62 \text{ V}$) 和包含因子 ($k = 2$) 确定的, k 是基于正态分布得到的。确定区间估计具有约 95% 的置信水平, 用百分数表示为 $m_s = 323 \times (1 \pm 38\%) \text{ V}$ 。

表 3 A 变电站保护小室骚扰电压峰峰值的统计均值和置信区间

Table 3 Statistical mean and confidence interval of the peak-to-peak disturbance voltage in substation A protective chamber

V_{pp}/V		1	2	3	4
I	统计均值	14.7446	18.4182	36.9135	22.9146
	置信区间	[10.7261,17.7119]	[13.9749,22.5376]	[16.3391,48.4910]	[16.9882,27.5149]
II	统计均值	15.5361	17.7277	45.0645	21.0015
	置信区间	[12.0514,18.6093]	[14.5202,20.9573]	[12.6762,61.4568]	[16.9209,24.9764]
III	统计均值	20.0509	23.2235	218.9937	298.6384
	置信区间	[15.6024,24.8367]	[16.7571,29.3125]	[147.8413,287.1318]	[189.2219,407.7112]
IV	统计均值	19.8288	21.8262	319.6657	132.6958
	置信区间	[14.9208,24.7365]	[15.9040,28.1457]	[202.4850,442.6837]	[103.9084,163.0533]
V	统计均值	15.5105	28.5440	18.3216	27.6834
	置信区间	[12.3298,17.4339]	[22.6272,33.6069]	[14.0412,21.2919]	[5.3584,33.5698]

表 4 A 变电站保护小室骚扰电压均值的不确定度(IV-3)

Table 4 Uncertainty of the average disturbance voltage of the protective chamber in A substation (IV-3)

影响因素	误差范围/V	概率密度	包含因子	$u(x_i)/V$	c_i	$u_i(y)/V$	u_c/V	U/V
示波器电压轴精度	2.4	均匀分布	$\sqrt{3}$	1.3856	1	1.3856	62	124
示波器电压分辨率	0.031 25	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.0180	1	0.0180		
探头衰减准确度	6.3933	均匀分布	$\sqrt{3}$	3.6912	1	3.6912		
多次测量	120.0994	正态分布	1.96	61.2752	1	61.2752		

同理分析 B 变电站实测数据, 保护小室侧试验电缆端口最大骚扰电压统计均值为 $42 \times (1 \pm 67\%) V$ 。由于开关操作位置不同、相位不同和速度差异等导致的多次测量骚扰电压峰峰值的分散性是产生不确定度的主要因素, 不确定度的范围在均值的 $\pm 50\%$ 左右。因此考虑实际中二次设备可能受到电磁干扰最恶劣的情况, 试验电压等级的制定应该取骚扰电压不确定度的上限值, 即至少高于统计均值的 50% , 这也是计算骚扰电压不确定度的意义之一。

通过分析 A 变电站 356 个单脉冲骚扰电压的频域得到主振频率在 100~200 kHz、200~300 kHz、9~10 MHz 区间骚扰电压上升时间、持续时间的统计结果及扩展不确定度, 并与标准阻尼振荡波抗扰度试验波形的时域参数进行对比评估, 如表 5 所示。限于篇幅, 表 5 中以百分数的表达形式直接给出各频率段骚扰电压上升时间、持续时间的统计均值及扩展不确定度的结果。由表 5 中可知: 100~200 kHz 和 200~300 kHz 两个区间段的实测骚扰电压上升时间约为 $1 \mu s$, 显著长于 100 kHz 慢速阻尼振荡波的上升时间(75 ns); 主振频率 9~10 MHz 频段的骚扰

电压上升时间约为 $18.4 \times (1 \pm 39\%) ns$, 是快速阻尼振荡波上升时间(5 ns)的 3.68 倍。对比骚扰电压各频段的持续时间, 100~200 kHz 的持续时间略长于 200~300 kHz, 9~10 MHz 的持续时间最短, 约为 $2 \mu s$, 符合骚扰电压振荡频率越高、持续时间越短的实际测量规律。

通过分析 B 变电站 160 个单脉冲骚扰电压时域、频域得到上升时间、持续时间的统计结果及不确定度, 并与标准阻尼振荡波抗扰度试验波形的时域参数进行对比评估, 如表 6 所示。由表 6 可知, 上升时间均值随频率升高依次略有增加, 但从不确定度范围来看, 总体上 3 个区间段的上升时间相近。说明在 6 MHz 以上的高频范围内, 虽然频率有 1 MHz 的差别, 但其上升时间却无明显差别。与快速阻尼振荡波的上升时间相比, 6.5~9 MHz 范围内实测骚扰电压的上升时间均值是快速阻尼振荡波上升时间均值的两倍以上。对比各频段单脉冲骚扰电压的持续时间, 随区间频率的增加, 持续时间缩短, 与 A 变电站的规律相同。

表 5 实测波形(100~300 kHz、9~10 MHz)与标准波形的参数对比

Table 5 Parameter comparison between measured waveforms (100~300 kHz and 9~10 MHz) and standard waveforms

类别	频率	上升时间	持续时间
阻尼振荡波	慢速(100 kHz、1 MHz)	$75 \times (1 \pm 20\%) ns$	—
	快速(3 MHz、10 MHz、30 MHz)	$5 \times (1 \pm 30\%) ns$	—
实测波形	$100 \leq f < 200 kHz$	$1.10 \times (1 \pm 15\%) \mu s$	$36.0 \times (1 \pm 14\%) \mu s$
	$200 \leq f \leq 300 kHz$	$1.00 \times (1 \pm 24\%) \mu s$	$23.0 \times (1 \pm 23\%) \mu s$
	$9 \leq f \leq 10 MHz$	$18.4 \times (1 \pm 43\%) ns$	$2.08 \times (1 \pm 25\%) \mu s$

表 6 实测波形(6.5~9 MHz)与标准波形的参数对比

Table 6 Parameter comparison between measured waveforms (6.5~9 MHz) and standard waveforms

类别	频率	上升时间	持续时间
阻尼振荡波	慢速(100 kHz、1 MHz)	$75 \times (1 \pm 20\%) ns$	—
	快速(3 MHz、10 MHz、30 MHz)	$5 \times (1 \pm 30\%) ns$	—
实测波形	$6.5 \leq f < 7.5 MHz$	$13.4 \times (1 \pm 71\%) ns$	$2.68 \times (1 \pm 16\%) \mu s$
	$7.5 \leq f < 8.5 MHz$	$15.2 \times (1 \pm 59\%) ns$	$1.85 \times (1 \pm 16\%) \mu s$
	$8.5 \leq f \leq 9 MHz$	$19.3 \times (1 \pm 49\%) ns$	$1.72 \times (1 \pm 13\%) \mu s$

4 结论

1) 在以往变电站的二次骚扰电压测量试验中,工作电缆接地方式固定,因此获得的骚扰电压特征参数对比不足,本文为了对比分析变电站二次电缆铠甲层和屏蔽层不同接地方式的抗干扰效果,在变电站内敷设了4根同型号二次电缆并测量了开关操作时的电磁骚扰。针对瞬态电磁骚扰数据样本量小和分散性强的特点,在应用随机加权统计原理的基础上提出了偏差矫正的自助置信区间法。应用该方法获得了试验瞬态电磁骚扰特征参数的统计均值及置信区间。

2) 针对多次测量造成瞬态电磁骚扰特征参数分散性强的特点,本文结合自助统计法提出了瞬态电磁骚扰多次测量不确定度的B类评估方法,以 $Y = y \pm U$ 和 $Y = y \times (1 \pm n\%)$ 两种形式给出了实测瞬态电磁骚扰统计特征参数的不确定度,完善了瞬态电磁骚扰统计结果的表达形式。结果表明,多次测量骚扰电压峰峰值的分散性是产生不确定度的主要因素,反映了在不同接地方式下二次电缆端口瞬态电磁骚扰的总体宏观特征,相比于以往的研究,更能反映瞬态电磁骚扰数据的一般规律。

3) 基于统计分析结果,对GB/T 17626.18 阻尼振荡波抗扰度试验波形参数与实测骚扰统计特征的符合度进行了评估。结果表明,在100~200 kHz和200~300 kHz两个频段的实测骚扰电压的上升时间显著长于100 kHz 慢速阻尼振荡波的上升时间;6.5~9 MHz 频段实测骚扰电压上升时间的均值是快速阻尼振荡波上升时间均值两倍以上;9~10 MHz 频段的骚扰电压上升时间是快速阻尼振荡波上升时间的3.68倍。各频率区间单脉冲骚扰电压的持续时间随频率的增加而缩短。

此次对两座500 kV 变电站二次电缆端口瞬态骚扰电压的特征统计,为评估二次设备瞬态抗扰度标准积累了数据,为继电保护设计人员提供了参考。

参考文献

- [1] 吴建宇,唐志军,晁武杰,等. 智能变电站二次设备即插即用理论模型与应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 163-171.
WU Jianyu, TANG Zhijun, CHAO Wujie, et al. A plug and play theory model and application of secondary equipment in a smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 163-171.
- [2] 张露,王永勤,贺家慧,等. 特高压变电站工频电磁场对避雷器在线监测装置测量准确度影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 164-169.
ZHANG Lu, WANG Yongqin, HE Jiahui, et al. Accuracy examination of linkage current online measurement of surge arresters under power frequency interference of electric field and magnetic field in the ultra-high voltage substations[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 164-169.
- [3] 陈维江,赵军,边凯,等. GIS 变电站开关操作瞬态电磁骚扰研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4935-4948, 4996.
CHEN Weijiang, ZHAO Jun, BIAN Kai, et al. Research progress on transient electromagnetic disturbance due to switching operations in GIS substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4935-4948, 4996.
- [4] 张卫东,崔翔. 变电站和换流站电磁骚扰的测量与特征分析[J]. 广东输电与变电技术, 2009, 11(1): 1-9.
ZHANG Weidong, CUI Xiang. Measurement and analysis of electromagnetic disturbances in substations and converter stations[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2009, 11(1): 1-9.
- [5] Working group 36.04. No.124 guide on EMC in power plants and substation[S]. Paris, France: CIGRE, 1997.
- [6] Working group C4.208. TB 535 EMC within power plants and substations[S]. Paris, France: CIGRE, 2013.
- [7] 叶远波,黄太贵,谢民,等. 基于多模型融合集成学习的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 148-157.
YE Yuanbo, HUANG Taigui, XIE Min, et al. A state assessment method for intelligent substation secondary equipment based on multi-model ensemble learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 148-157.
- [8] 孙哲,李彦斌,张兆华,等. 特高压换流站直流分压器二次侧过电压保护[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2601-2609.
SUN Zhe, LI Yanbin, ZHANG Zhaohua, et al. Study on surge protection of DC divider secondary side in UHV converter station[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2601-2609.
- [9] 李沐,赵鹏程,刘骁繁. 500 kV 智能变电站电磁暂态的测量与分析[J]. 电气应用, 2017, 36(5): 16-21.
LI Mu, ZHAO Pengcheng, LIU Xiaofan. Measurement and analysis of electromagnetic transient in 500 kV smart substation[J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(5): 16-21.
- [10] 孙绍哲. 复杂电磁环境下变电站电子式互感器抗扰度特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
SUN Shaozhe. Research on immunity characteristics of electronic transformer in complex electromagnetic environment of substation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong

- University, 2020.
- [11] 郝辉. 特高压换流站二次系统浪涌保护措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
HAO Hui. Research on UHV DC converter secondary system surge protection measures[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [12] 闫磊. 基于场耦合的控保设备抗扰度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
YAN Lei. Research on immunity of controlling and protective devices on the basis of field-coupling[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [13] 齐磊, 崔翔, 赵志斌. 复杂接地系统冲击接地特性的数值计算及试验[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 66-69, 80.
QI Lei, CUI Xiang, ZHAO Zhibin. Numerical calculation and experimental research of impulse grounding performance of complex grounding system[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 66-69, 80.
- [14] 单节杉, 任敏, 田鑫萃, 等. MMC 换流站阀侧交流接地故障电流解析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 36-48.
SHAN Jieshan, REN Min, TIAN Xincui, et al. Analysis of grounding fault current at the AC valve side of an MMC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 36-48.
- [15] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [16] 张卫东, 高飞, 崔翔. 高压直流换流站瞬态电磁骚扰特征的小样本统计方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 11-15.
ZHANG Weidong, GAO Fei, CUI Xiang. Small sample statistics for transient electromagnetic disturbance characteristics of HVDC converter stations[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 11-15.
- [17] 金大永, 徐勇, 李景和, 等. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [18] 戴邵武, 高华明, 肖支才. 基于自助法的小样本数据分析方法研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(1): 27-30.
DAI Shaowu, GAO Huaming, XIAO Zhicai. Research on data analysis of small sample based on bootstrap method[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(1): 27-30.
- [19] 李彩云, 张卫东, 嵇建飞, 等. 冲击电流作用下二次系统骚扰电压统计特性及与抗扰度试验符合性研究[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1605-1612.
LI Caiyun, ZHANG Weidong, JI Jianfei, et al. Disturbance voltage statistical characteristics of secondary system under impulse current and its consistency with immunity test[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1605-1612.
- [20] 郑忠国. 随机加权法[J]. 应用数学学报, 1987(2): 247-253.
ZHENG Zhongguo. Random weighting method[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1987(2): 247-253.
- [21] MOONEY C Z, DUVAL R D. 自助法: 一种统计推断的非参数估计法[M]. 李兰, 译. 上海: 上海人民出版社, 2017.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 测量不确定度评定和表示: GB/T 27418—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guide to the evaluation and expression of uncertainty in measurement: GB/T 27418—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [23] 史永彬, 于蒙, 李迪. 示波器测量脉冲信号测量结果的不确定度分析与评定[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(3): 50-53.
SHI Yongbin, YU Meng, LI Di. Analysis and evaluation of uncertainty of pulse signal measurement result by oscilloscope[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(3): 50-53.
- [24] 邢荣欣. 集成电路静电放电模拟器校准与测量不确定度[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(6): 528-532.
XING Rongxin. Calibration of microcircuits ESD pulse simulator[J]. Journal of electronic measurement and instrument, 2011, 25(6): 528-532.
- [25] 赵军, 陈维江, 张建功, 等. 基于磁感应原理的自积分式冲击电流测量系统校准[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3007-3013.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jianguo, et al. Calibration of self-integrated impulse current measurement system based on magnetic induction principle[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 3007-3013.
- [26] 张卫华, 陈庆雄, 宋颖超. 电浪涌发生器校准方法及不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(11): 93-95, 97.
ZHANG Weihua, CHEN Qingxiong, SONG Yingchao. Calibration method and uncertainty analysis of electric surge generator[J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44(11): 93-95, 97.

收稿日期: 2022-11-26 修回日期: 2023-02-09

作者简介:

叶海(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度和继电保护; E-mail: yeahhi100@aliyun.com

李彩云(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电磁兼容。E-mail: 18222721971@163.com

(编辑 姜新丽)