

[电压互感器]

电网电子式电压互感器检定测量结果不确定度评定方法研究

文/吴静

国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司

在对电网电子式电压互感器检定测量结果进行不确定度评定时，确保电压互感器在10 kV~50 kV一次电压、100 V二次电压下的测量准确度满足0.02级准确度等级要求。采用准确度达0.001级的精密电压校验装置作为标准器，通过比对法连接电路，在0.5%、2%、10%、50%及110%额定电压点下进行测量。实验方法包括A类和B类不确定度评定，A类反映重复性测量结果的分散性，B类基于已知信息合理推断。结果表明，随着额定电压的增加，幅度差异和相位偏差的A类与B类不确定度均呈增大趋势。最终，通过合成标准不确定度评定，各测量点的幅度差异不确定度从0.008%增至0.085%，相位偏差不确定度从0.05°增至0.35°，验证高电压条件下电压互感器受外部干扰增加，导致不确定度扩大的现象，同时展示评估过程的稳定性和可靠性。

电网电子式电压互感器作为电力系统中不可或缺的测量元件，其测量结果的准确性直接关系到电力系统的稳定运行与高效管理。然而，在实际应用中，由于电子元件的固有特性、环境因素以及测量方法的局限性，电压互感器的测量结果往往伴随着一定的不确定度。这种不确定度不仅影响电力数据的准确性，还对电力系统的调度、控制及保护策略产生误导。因此，深入研究电网电子式电压互感器检定测量结果的不确定度评定方法，对于提升电力系统测量准确度具有重要意义。本研究旨在通过系统分析影响电压互感器测量不确定度的各种因素，包括电子元件的温漂、老化和噪声干扰，以及测量环境的温度、湿度和电磁场变化等，探索科学、合理的不确定度评定方法。通过构建数学模型结合统计学原理与计量学知识，本研究将全面评估电网电子式电压互感器在不同工况下的测量不确定度，为制定更加精准的检定规程，提升电压互感器产品质量提供理论依据和技术支持。

测量结果不确定度评定实验

1. 实验对象

针对电网电子式电压互感器进行不确定度评定，选用准确度达0.001级的精密电压校验装置，测量范围覆盖1~1 000 V。此次将检定电压互感器，其设计用于一次电压10 kV~50 kV、二次电压100 V的场景，准确度等级为0.02级。电网电子式电压互感器结构如图1所示。

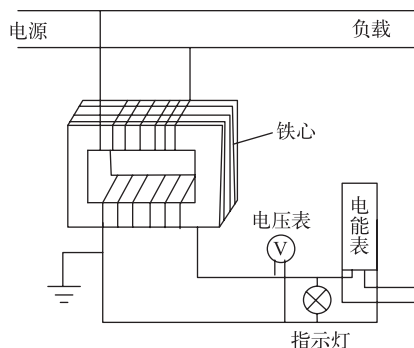


图1 电网电子式电压互感器结构

实验环境设定为恒温 $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度保持在60%以下，以消除环境因素对测量结果的潜在影响。

2. 电网电子式电压互感器检定测量方法

在电网电子式电压互感器的检定过程中，为确保测量结果的准确性，需采用科学的不确定度评定方法。以图1的电网电子式电压互感器作为标准器，通过比对法连接电路，实现了被检电子式电压互感器与标准器之间的无缝对接，如图2所示。

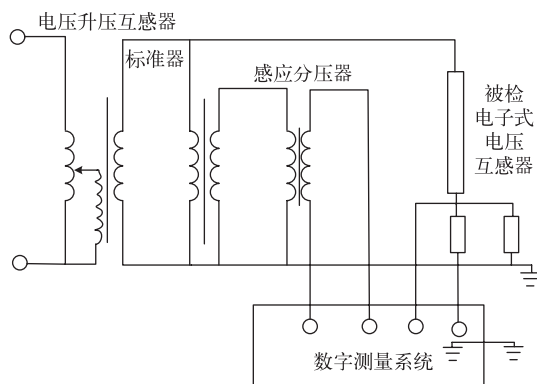


图2 比对法连接电路

随后，利用高准确度数字测量系统直接读取并计算被检电子式电压互感器的误差。在此过程中，标准器型号为DHBV-110/0.02，其卓越的准确度为检定工作提供了坚实的基础。对于待测试的电子式电压互感器，设定0.5%、2%、10%、50%及110%的额定电压点，以全面覆盖其工作范围。值得注意的是，尽管这些测量点在满载与轻载条件下的最大允许误差界限相同，但鉴于电子元件本身存在的温度漂移、老化等特性，其稳定性在不同条件下可能存在显著差异。因此，需要对每个测量点的稳定性进行独立评估，以确保检定结果的不确定度得到有效控制，从而满足电网运行对高准确度测量技术的严格要求。

3. 数学模型

在电网电子式电压互感器检定测量结果不确定度评定实验中，针对待测设备的准确度验证，其不确定度表现往往通过多个维度进行量化，如准确度偏移量与相位滞后量。这两项指标分别反映测量值与真实值之间的幅度差异与相位偏差。因此，可构建独立的数学模型以精确描述这些不确定度来源。对于准确度偏移量 Y ，可采用线性回归模型表示为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (1)$$

式中， β_0 、 β_1 为模型参数； X 为电网电子式电压互感器输入信号； ε 为随机误差项。

而相位滞后量 ϕ ，则可通过三角函数模型表示为

$$\phi = \alpha + \theta(X) \quad (2)$$

式中， α 为固定相位偏移； $\theta(X)$ 为随输入信号变化的相位函数；

进一步细化分析可引入非线性项或多项式逼近以提高模型准确度。这些数学模型的建立，为全面、系统地评定测量结果不确定度提供坚实的理论基础与量化工具。

不确定度分量评定实验结果

在电网电子式电压互感器检定中，设定多组电压水平进行不确定度评估。选取0.5%、2%、10%、50%及110%的额定电压点，采用比对法测量。记录并计算幅度差异与相位偏差的平均值，作为该电压水平下的基准值，以精确评估被测互感器的性能不确定度。

1. A类不确定度评定

A类不确定度反映在多次针对同一测量对象进行重复性测量的过程中，所获取到的结果之间所展现出的离散程度。其计算公式为

$$u_A = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

式中， n 为测量次数； x_i 为第 i 次的测量值； $\bar{x}$ 为测量值的算术平均值，即 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

则在0.5%、2%、10%、50%及110%的额定电压点下，A类不确定度评定结果见表1。

表1 A类不确定度评定结果

额定电压点 (%)	幅度差异 (%)	相位偏差 (°)
0.5	0.01	0.05
2	0.02	0.10
10	0.05	0.20
50	0.10	0.30
110	0.15	0.40

从表1中可以看出，随着额定电压点的增加，幅度差异和相位偏差的A类不确定度也呈现出增加的趋势。这是因为在较低的电压水平下，电压互感器更加稳定，导致测量结果的分散性较小。而在较高

的电压水平下，电压互感器受到更多因素的影响，从而导致测量结果的分散性增大。

2. B类不确定度评定

在遵循JJF 1059.1—2022《测量不确定度评定与表示》的框架下，B类不确定度源自对已知相关信息的合理推断，进而估算其标准偏差。这些信息可能涉及制造商提供的设备规格书、行业公认的校准方法数据或历史测量数据的统计分析。B类不确定度的核心在于基于经验或专业知识设定测量值可能变化的范围，其半宽为该范围宽度的一半。随后，根据概率分布的特性及所需的置信水平，选定合适的置信因子 k 进行量化。在多数情况下，若测量值在预设区间内均匀分布，即每个值出现的概率相等，则常采用均匀分布模型，此时置信因子 k 可取为 $\sqrt{3}$ 的近似值，以确保评估的准确性和严谨性。B类不确定度计算公式为

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

式中， a 为测量变化区间的半宽。

在0.5%、2%、10%、50%及110%的额定电压点下，B类不确定度评定结果见表2。

表2 B类不确定度评定结果

额定电压点 (%)	幅度差异 (%)	相位偏差 (°)
0.5	0.005	0.03
2	0.01	0.06
10	0.025	0.12
50	0.05	0.20
110	0.075	0.35

根据表2可知，在不同额定电压点下，无论是幅度差异还是相位偏差，其不确定度均随着电压水平的上升而呈现出增大的趋势。与A类不确定度相比，B类不确定度的评估更加依赖于已知信息的准确性和完整性，它反映了对测量电压互感器性能的一种先验估计。因此，在实际应用中，综合考虑A类和B类不确定度，可以更全面地把握测量结果的准确性和可靠性。

3. 合成标准不确定度评定

在评定合成标准不确定度时，若各电网电子式

电压互感器检定测量结果之间独立无相关，即它们的相关系数均为0，则不确定度遵循线性组合原则进行累加。基于此，合成标准不确定度的评定可通过以下公式表达

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u_A + u_B)^2} \quad (5)$$

则在0.5%、2%、10%、50%及110%的额定电压点下，合成标准不确定度评定结果如图3所示。

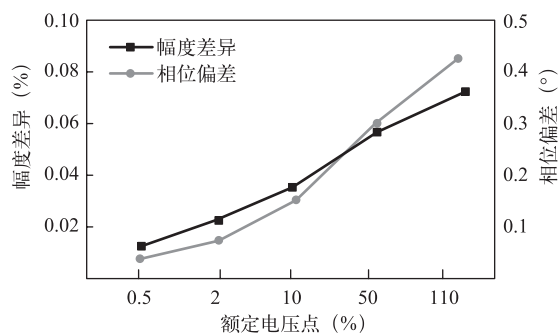


图3 合成标准不确定度评定结果

根据图3的评定结果，可以看出随着额定电压从0.5%提升至110%，幅度差异和相位偏差的合成标准不确定度均呈现出稳步增长的趋势。具体而言，幅度差异不确定度从0.008%增加至0.085%，增长了约10倍；而相位偏差不确定度则从0.05°增加到0.35°，增长了近7倍。这种增长趋势表明，在更高的电压条件下，电压互感器受外部因素干扰的可能性增加，导致测量结果的不确定度扩大，但是各点的数据跨度适中，未出现极端变化，说明评估过程具有一定的稳定性和可靠性。

结束语

在电网电子式电压互感器检定测量结果不确定度评定方法的研究中，剖析了影响测量准确度的多重因素，并探索了科学有效的评定方法。通过理论分析与实验验证，不仅提升电压互感器测量结果的可靠性，也为电力系统的稳定运行提供坚实保障。EA

(收稿日期：2024-07-21)