

# MOA 测试仪校准方法及校准结果的不确定度评定

史三省 张欲晓 石 菡 高利明 赵 岩

(国网河南省电力公司电力科学研究院 郑州 450052)

**摘 要:**为了保证氧化锌避雷器(metal oxide arrester, MOA)测试仪量值的准确可靠,需定期对其进行校准和不确定度评定。在简要阐述 MOA 特性及测试方法的基础上,介绍了 MOA 测试仪的标准信号发生器法校准方法,详细分析和评定了 MOA 测试仪校准结果的不确定度,通过采用传递比较法与国家高电压计量站提供的校准结果进行比对,验证了校准结果的可信度和不确定度的合理性。为 MOA 测试仪的校准和不确定度评定提供了方法,有助于提高 MOA 测试仪量值传递的准确性和一致性。

**关键词:**氧化锌避雷器;测试仪;校准方法;不确定度;验证

**中图分类号:** TM933 TN98 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Calibration method of MOA tester and uncertainty evaluation of calibration results

Shi Sansheng Zhang Yuxiao Shi Han Gao Liming Zhao Yan

(State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In order to ensure the accuracy and reliability of the measurement value of the metal oxide arrester (MOA) tester, it is necessary to calibrate it and evaluate its uncertainty regularly. The standard signal generator calibration method of MOA tester is introduced, based on the description of the characteristics of MOA and testing method. The uncertainty of calibration results of the MOA tester is analyzed and evaluated in detail. The reliability of calibration results and the rationality of uncertainty are verified by using transfer comparison method through the comparison with the calibration results provided by National High Voltage Metrological Station. This paper provides a method for the calibration and uncertainty evaluation of the MOA tester, which is helpful to improve the accuracy and consistency of the value transfer of the MOA tester.

**Keywords:** metal oxide arrester; tester; calibration method; uncertainty; validation

### 1 引 言

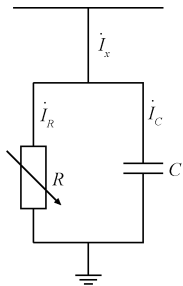
氧化锌避雷器(MOA)是电力系统重要设备之一,在电力系统中大量使用。但由于 MOA 工作环境恶劣,容易老化,其泄漏电流特别是阻性泄露电流增大,会引起热崩溃甚至发生爆炸。因此在绝缘预防性试验中,通常使用 MOA 测试仪检查 MOA 的实际性能<sup>[1-2]</sup>。目前电力行业使用的 MOA 测试仪型号多种多样,主要用于测量基波及各次谐波下的全电流、阻性电流、容性电流等参数,其测量方法各不相同,测量准确度也参差不齐。如果该类测试仪在实际使用中,测试不准确,可能会导致对 MOA 运行工况的误判断,从而造成不必要的损失。因此对 MOA 测试仪进行定期校准是十分必要的。

为了促使不同厂家型号的 MOA 测试仪向着规范化发展,国家发改委发布了 DL/T 987-2005《氧化锌避雷器阻性电流测试仪通用技术条件》,对此类测试仪性能提出了相应的要求<sup>[3]</sup>。但截至目前,国内外关于 MOA 测试仪的校准尚没有统一标准,对 MOA 测试仪的校准行为缺乏有效的指导和监督,无法保证其量值准确可靠,导致部分不合格产品投入使用,大大影响了电力设备状态监测的应用效果和电网运行的可靠性<sup>[4-5]</sup>。

针对这种情况,本文介绍了 MOA 测试仪的标准信号发生器法校准方法,详细分析和评定了校准结果的不确定度,并通过采用传递比较法验证了校准结果的可信度和不确定度的合理性。

## 2 MOA 特性及测试方法

MOA 的阀片具有很好的非线性,过电压时呈现很小的电阻,而在正常电压下阻值很大,因此具有良好的过电压保护性能,其等效电路如图 1 所示。



$R$ —非线性电阻;  $C$ —等效电容;  $i_x$ —全电流;  
 $i_R$ —阻性电流;  $i_C$ —容性电流

图 1 MOA 阀片等效电路

由图 1 可知:

$$i_x = i_R + i_C \quad (1)$$

由于 MOA 在老化或劣化过程中,阻性电流变化明显,而容性电流基本无变化,因此普遍采用阻性电流信号来监测 MOA 的性能状况<sup>[6]</sup>。如以电网电压作为参考相量,则阻性电流值为:

$$I_R = I_x \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  为基波全电流超前基波参考电压的相位。

MOA 现场带电测试接线示意如图 2 所示。

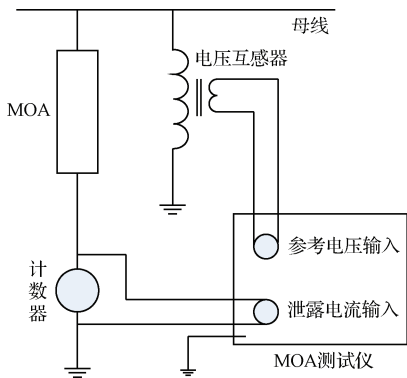


图 2 MOA 现场带电测试接线示意

## 3 MOA 测试仪校准方法

根据 MOA 特性及测试原理,MOA 测试仪校准采用标准信号发生器法进行,即用一个可以产生标准信号的装置向 MOA 测试仪注入标准源,来模拟 MOA 的运行状态,然后将测试仪测量值与标准装置标准值对比,进而对测试仪进行科学校准<sup>[3,7]</sup>。标准装置电压输出信号设置为  $f=50\text{ Hz}$  的正弦波,电流输出信号由阻性基波电流、阻性三次谐波电流和容性基波电流 3 部分合成,即:

$$u = U_p \sin\omega t \quad (3)$$

$$i = I_{pR1} \sin\omega t + I_{pR3} \sin(3\omega t + \pi) + I_{pC1} \sin(\omega t + \pi/2) \quad (4)$$

式中:  $u$  为参考电压;  $U_p$  为参考电压峰值;  $\omega$  为基波角频率,  $\omega = 2\pi f$ ;  $i$  为全电流;  $I_{pR1}$  为阻性基波电流峰值;  $I_{pR3}$  为阻性三次谐波电流峰值;  $I_{pC1}$  为容性基波电流峰值。

根据被校测试仪的不同测量功能,设置不同的  $U_p$ 、 $I_{pR1}$ 、 $I_{pR3}$ 、 $I_{pC1}$  4 个参数进行校准即可。

据此研制的 BLC-1 型 MOA 测试仪校验装置可以针对目前市场上主流的 MOA 测试仪的全电流、阻性电流、容性电流、相位角、参考电压、谐波电流、基波有功功率等测量性能进行校准。该校验装置具有准确度高、稳定性好和使用便捷等优点。校准原理如图 3 所示。

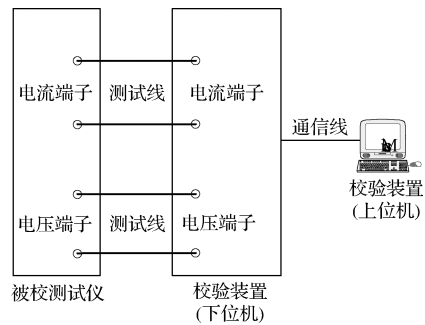


图 3 校准原理

将校验装置的全电流和参考电压输出端子分别与被校测试仪相应端子连接,在校验装置上位机界面中进行参数设置,参数设置完成后,点击数据下载按钮,下载成功后,下位机状态指示灯变红,然后可继续点击启动按钮,此时校验装置下位机状态指示灯变绿,并同时输出标准全电流和标准参考电压,即可对被校测试仪开展校准工作。该校验装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1 校验装置主要参数

主要参数	测量范围	最大允许误差
电流	0~20 mA	$\pm(0.2\% \text{ 读数} + 2 \mu\text{A})$
参考电压	20~100 V	$\pm 0.2\% \text{ 读数}$
相位角	0~90°	$\pm 0.1^\circ$

## 4 校准结果的不确定度评定

以校准 AI-6103 型 MOA 测试仪的阻性电流为 4 mA 点为例进行评定,其他校准点参照此方法进行评定。该测试仪主要技术参数如表 2 所示。

表 2 MOA 测试仪主要参数

主要参数	测量范围	最大允许误差
电流	0~10 mA	$\pm(5\% \text{ 读数} + 5 \mu\text{A})$
参考电压	25~250 V	$\pm(5\% \text{ 读数} + 0.5 \text{ V})$

#### 4.1 不确定度来源分析

影响校准结果的不确定度来源如下<sup>[8-11]</sup>：

- 1) A类评定, MOA测试仪的测量重复性;
- 2) B类评定, 校验装置的测量准确性。

#### 4.2 数学模型建立

由校准原理可知, MOA测试仪阻性电流示值误差校准的数学模型为:

$$\Delta I_R = I_R - I_N \quad (5)$$

式中:  $\Delta I_R$  为被校测试仪阻性电流示值误差;  $I_R$  为被校测试仪阻性电流测量值;  $I_N$  为校验装置输出的阻性电流标准值。

#### 4.3 标准不确定度评定

##### 4.3.1 标准不确定度的 A 类评定

由测量重复性引入的标准不确定度  $u_1$  可用 A 类评定的方法进行评定。在环境温度 20℃、相对湿度 60% 的条件下对被校测试仪的阻性电流为 4 mA 测量点进行 10 次独立重复测量, 结果如表 3 所示。

表 3 10 次独立重复测量结果

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
3.999	3.998	3.995	4.001	3.997
$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
4.003	3.997	3.998	3.995	3.996

计算得算术平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 3.998 \text{ mA} \quad (6)$$

单次实验标准偏差:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10 - 1}} = 0.003 \text{ mA} \quad (7)$$

在实际校准中, 常取 1 次读数作为测量结果, 则标准不确定度  $u_1$  为:

$$u_1 = S_n = 0.003 \text{ mA} \quad (8)$$

##### 4.3.2 标准不确定度的 B 类评定

由校验装置的基本误差极限引入的标准不确定度  $u_2$ , 采用 B 类评定的方法进行评定。校验装置经过上一级量值传递合格, 根据表 1 的主要技术参数, 给出该校验装置

电流的最大允许误差为  $\pm(0.2\% \text{ 读数} + 2 \mu\text{A})$ , 即分散区间的半宽为  $(0.2\% \text{ 读数} + 2 \mu\text{A})$ , 在此区间可认为服从均匀分布 ( $k = \sqrt{3}$ ), 则标准不确定度  $u_2$  为:

$$u_2 = (0.2\% \times 3.998 \text{ mA} + 2 \mu\text{A}) / \sqrt{3} = 0.01 \text{ mA} \quad (9)$$

#### 4.4 合成标准不确定度计算

由影响校准结果的不确定度来源分析可知, 各输入量之间均不相关, 可使用下式计算合成标准不确定度<sup>[12]</sup>:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} \quad (10)$$

由式(5)可知:

$$u_c = \sqrt{c^2(I_R) \sum u^2(I_R) + c^2(I_N) \sum u^2(I_N)}$$

$$\text{由于, } c(I_R) = \frac{\partial(\Delta I_R)}{\partial(I_R)} = 1, c(I_N) = \frac{\partial(\Delta I_R)}{\partial(I_N)} = -1,$$

因此,

$$u_c = \sqrt{\sum u^2(I_R) + \sum u^2(I_N)} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 u_i^2} = 0.011 \text{ mA} \quad (11)$$

#### 4.5 扩展不确定度的确定

在给出校准结果时, 一般情况下报告扩展不确定度  $U$ , 它由合成标准不确定度乘以包含因子  $k$  得到, 一般取  $k=2$ , 即<sup>[12]</sup>:

$$U = k \times u_c = 0.022 \text{ mA} \quad (12)$$

### 5 校准结果的验证

为了验证校准结果的可信度和测量不确定度的合理性, 采用传递比较法, 即选定一台稳定性较好的 MOA 测试仪作为被校对象, 用本单位的校验装置对其进行校准, 然后将其送到国家高电压计量站, 用另一更高级校验装置对其进行校准。验证结果应满足如下要求<sup>[13]</sup>:

$$|y - y_0| \leq \sqrt{U^2 + U_0^2} \quad (13)$$

式中:  $y$  为本单位的样品校准值;  $y_0$  为国家高电压计量站的样品校准值;  $U$  为本单位校准结果的不确定度;  $U_0$  为国家高电压计量站校准结果的不确定度。

本单位和国家高电压计量站的样品校准值及其不确定度如表 4 所示。

表 4 验证结果

校准点 /mA	本单位		国家高电压计量站		y - y <sub>0</sub>	$\sqrt{U^2 + U_0^2}$
	y	U(k=2)	y <sub>0</sub>	U <sub>0</sub> (k=2)		
0.1	0.094	0.008	0.095	0.006	0.001	0.010
0.5	0.495	0.008	0.497	0.008	0.002	0.011
1	0.997	0.01	0.995	0.01	0.002	0.014
2	2.000	0.014	2.001	0.012	0.001	0.018
4	3.998	0.022	3.996	0.02	0.002	0.030
6	6.007	0.028	6.005	0.028	0.002	0.040
8	8.011	0.036	8.015	0.036	0.004	0.051
10	10.017	0.044	10.020	0.044	0.003	0.062

由表4可知,所有校准点的验证结果均满足式(13)的要求,故校准结果的可信度和测量不确定度的合理性得以验证,从而保证了MOA测试仪器量值传递的准确性和一致性。

## 6 结 论

简要阐述了MOA特性及测试方法,介绍了MOA测试仪的标准信号发生器法校准方法,详细分析和评定了MOA测试仪校准结果的不确定度,通过采用传递比较法与国家高电压计量站提供的校准结果进行比对,验证了校准结果的可信度和不确定度的合理性。本文为MOA测试仪的校准和不确定度评定提供了方法,有助于提高MOA测试仪器量值传递的准确性和一致性。

### 参 考 文 献

- [1] 朱斌,王保山,李启盛,等. GB 11032-2010 交流无间隙金属氧化物避雷器[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [2] 王乃庆,王馄明,冯复生,等. DL/T 596-1996 电力设备预防性试验规程[S]. 北京:中国电力出版社,1996.
- [3] 雷民,朱清,沈维君,等. DL/T 987-2005 氧化锌避雷器阻性电流测试仪通用技术条件[S]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [4] 罗彩建. 考虑谐波电压影响的金属氧化物避雷器在线监测算法研究[J]. 电瓷避雷器,2016(3): 53-57.
- [5] 刘海龙,李海兵,曹泽曦,等. 基于阻性电流检测与红外热像技术的避雷器故障诊断[J]. 电瓷避雷器,2016(3): 75-78.
- [6] 尹子会,霍春燕,岳国良,等. Q/GDW 11369-2014 避雷器泄露电流带电检测技术现场应用导则[S]. 北京:中国电力出版社,2015.
- [7] 王亚军,舒乃秋,曾喜闻,等. 高精度MOA测试仪标准装置研制[J]. 电力自动化设备,2005,25(11): 83-85.
- [8] 程银宝,陈晓怀,王汉斌,等. 基于精度理论的测量不确定度评定与分析[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(8): 1175-1182.
- [9] 李存龙,陈伟民,章鹏,等. 正弦调制型微波测距系统的不确定度分析[J]. 仪器仪表学报,2014,35(1): 23-29.
- [10] 寇琼月,张红,张磊. 数字示波器上升时间的测量不确定度分析与评定[J]. 电子测量技术,2016,39(1): 31-34.
- [11] 李凌梅,张欣,胡建华,等. 木直(折)尺测量不确定度评估[J]. 国外电子测量技术,2015,34(4): 36-38.
- [12] 叶德培,赵峰,施昌彦. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京:中国质检出版社,2013.
- [13] 丁跃清,邓媛芳. JJF1033-2008 计量标准考核规范[S]. 北京:中国计量出版社,2008.

### 作 者 简 介

史三省,1983年出生,工学硕士,高级工程师,国家一级注册计量师,主要研究方向为高压计量与测试技术。  
E-mail: ssszsu@163.com

张欲晓,1971年出生,工学硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为计量技术管理及。

石菡,1981年出生,工学学士,讲师,国家一级注册计量师,主要研究方向为电测计量与测试技术。

高利明,1979年出生,工学学士,高级工程师,国家一级注册计量师,主要研究方向为电能计量与测试技术。

赵岩,1982年出生,工学硕士,高级工程师,国家一级注册计量师,主要研究方向为电能计量与测试技术。