

Design and Development of AN Automatic Calibration System for Voltage Dividers

Lu Zhang¹, Jinyang Li², Yongqin Wang¹, Jiahui He¹, Tong Wu², Huafeng Shao³, Xiaoshuang Li³

¹State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan Hubei

²State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan Hubei

³Wuhan Xindian Electrical Co., LTD., Wuhan Hubei

Email: octopus027@163.com

Received: Feb. 25th, 2019; accepted: Mar. 11th, 2019; published: Mar. 19th, 2019

Abstract

In order to solve the problem of field verification of online monitoring device in metal oxide arresters, based on the additional injection method, the verification principle of resistive current, capacitive current and total current is proposed, and the verification system is developed. The results of laboratory tests and field measurements show that the output current error of the verification system is within 0.5%, and the phase error is within 0.1, which meets the requirements of field verification accuracy. The verification system also solves the problem that the output current of field demand and the voltage of PT secondary side have difficulty in the same frequency and phase, which provides the reference for field verification of online monitoring device in capacitive equipment.

Keywords

Metal Oxide Arrester, Online Monitoring Device, Field Verification, Additional Injection Method

避雷器在线监测装置现场校验系统的研发

张露¹, 李进扬², 王永勤¹, 贺家慧¹, 吴彤², 邵华锋³, 李小双³

¹国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉

²国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉

³武汉新电电气股份有限公司, 湖北 武汉

Email: octopus027@163.com

收稿日期: 2019年2月25日; 录用日期: 2019年3月11日; 发布日期: 2019年3月19日

摘要

论文针对避雷器在线监测装置的现场校验存在的困难, 基于“增量注入法”提出了阻性电流、容性电流

文章引用: 张露, 李进扬, 王永勤, 贺家慧, 吴彤, 邵华锋, 李小双. 避雷器在线监测装置现场校验系统的研发[J]. 电气工程, 2019, 7(1): 53-62. DOI: 10.12677/jee.2019.71006

及全电流的校验原理，并研发了校验系统。实验室测试和现场实测的结果表明，该校验系统输出电流误差在0.5%以内，相位误差在0.1以内，满足现场校准准确度要求。校验系统还解决了现场需求输出电流与PT二次侧电压同频同相难的问题，为容性设备在线监测现场校准提供了参考。

关键词

避雷器，在线监测装置，现场校验，增量注入法

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

电力系统中氧化锌避雷器(MOA)是十分重要的过电压保护设备[1] [2] [3] [4]。鉴于 MOA 的重要作用，电力系统多采用 MOA 在线监测装置来监视其工作状态[5] [6] [7] [8]。在线监测装置串接在 MOA 的接地回路中，分为两种，一种由微安表和动作计数器等元件构成[9]，主要用于监测全电流，已广泛安装；另一种 MOA 在线监测装置则由近年国网公司推广，其电压单元取电压互感器二次侧电压信号，电流单元安装于 MOA 接地回路测试其阻性电流和全电流值，数据经由 IED 单位传输至主控室后台或就地显示。

MOA 在线监测装置性能好坏关系到对 MOA 性能的评价是否正确，无论是误报还是漏报均时有发生，影响电力系统的安全运行[10] [11] [12] [13]。在日常检修工作中，从涉及到拆卸、安全、运输成本及耗时考虑[14] [15] [16]，微安表通常在离线的条件下校验，近些年兴起的 MOA 在线监测装置投运后则暂无有效的现场校验手段。在这样的背景情况下，研究 MOA 在线监测装置现场带电校验技术方法和开发相关的仪器设备就显得十分有意义了。

由于 MOA 阻性电流测试需已知母线电压及避雷器泄漏电流之间的相角关系，这就对校验提出了频率跟踪方面更高的要求，要求电流源的频率相位与变电站现场 PT 二次侧电压实时保持一致，市场上常见的电流源在准确度、稳定性、幅值、相位、价格等方面无法同时满足要求。本文提出了针对避雷器在线监测的增量注入法及其校验原理，并研制了相关设备。下面是具体的工作介绍。

2. 增量注入法及其校验原理

现场容性设备稳态运行时，即其泄漏电流 I 的大小和角度是稳定不变的，设容性设备泄漏电流大小为 I_0 ，相位为 θ ，则有

$$I = (I_R, I_C) = (I_0 \cos \theta, I_0 \sin \theta) \quad (1)$$

即泄漏电流的阻性电流分量 I_R 为 $I_0 \cos \theta$ ，容性电流 I_C 分量为 $I_0 \sin \theta$ 。

此时通过人为干预在回路引起一定的电流增量，设注入电流大小为 I' ，其相位为 $\beta_0 + \beta$ ，其中 β_0 为标准可控角度，其根据需要人为设置，其设置范围为(0~90°)； β 为标准可控角度实际运行时的波动范围，那么注入电流的矢量坐标为

$$I' = (I'_R, I'_C) = (I'_0 \cos(\beta_0 + \beta), I'_0 \sin(\beta_0 + \beta)) \quad (2)$$

即可得注入电流的阻性电流分量 I'_R 为 $I'_0 \cos(\beta_0 + \beta)$ ，容性电流分量 I'_C 为 $I'_0 \sin(\beta_0 + \beta)$ 。

2.1. 阻性电流校验原理

标准可控角度 $\beta_0 = 0$ 时, 那么注入电流矢量的坐标为

$$\mathbf{I}' = (I'_0 \cos(\beta), I'_0 \sin(\beta)) \quad (3)$$

即注入电流的阻性电流分量为 $I'_0 \cos(\beta)$, 容性电流分量为 $I'_0 \sin(\beta)$ 。

根据矢量叠加原理, 叠加电流的矢量坐标为

$$\mathbf{I} + \mathbf{I}' = (I_0 \cos \theta + I'_0 \cos(\beta), I_0 \sin \theta + I'_0 \sin(\beta)) \quad (4)$$

当角度控制准确度较高, 运行稳定, 保证注入电流相位变化 β 最大不超过 0.1° 时, 由于

$$\begin{cases} \cos 0.1^\circ \approx 0.9999985 \\ \sin 0.1^\circ \approx 0.00174 \end{cases} \quad (5)$$

于是, 可近似为

$$\begin{cases} \cos 0.1^\circ \approx 1 \\ \sin 0.1^\circ \approx 0 \end{cases} \quad (6)$$

则计算误差非常小。从而可得, 叠加电流的矢量坐标为

$$\mathbf{I} + \mathbf{I}' = (I_0 \cos \theta + I'_0, I_0 \sin \theta) \quad (7)$$

可见, 注入电流只引起阻性电流变化, 对容性电流几乎没有影响。且阻性电流的变化量只与注入电流 \mathbf{I} 的大小有关。通过对比注入电流幅值和被检容性设备阻性电流测量结果即可对该设备进行阻性电流校验, 当注入电流的变化范围包含被测设备的测量范围时, 则可对被测设备阻性电流进行全范围校验。

2.2. 容性电流校验原理

当注入电流大小为 \mathbf{I} , 标准可控角度 $\beta_0 = 90^\circ$ 时, 那么注入电流矢量的坐标为

$$\mathbf{I}' = (I'_0 \cos(90 + \beta), I'_0 \sin(90 + \beta)) \quad (8)$$

即

$$\mathbf{I}' = (-I'_0 \sin(\beta), I'_0 \cos(\beta)) \quad (9)$$

故注入电流的阻性电流分量为 $-I'_0 \cos \beta$, 容性电流分量为 $I'_0 \sin \beta$ 。

根据矢量叠加原理, 叠加电流的矢量坐标为

$$\mathbf{I} + \mathbf{I}' = (I_0 \cos \theta - I'_0 \sin(\beta), I_0 \sin \theta + I'_0 \cos(\beta)) \quad (10)$$

同阻性电流校验原理, 当 β 变化范围控制在 0.1° 以内时, 根据(6)式的近似, 可得叠加电流的矢量坐标为

$$\mathbf{I} + \mathbf{I}' = (I_0 \cos \theta, I_0 \sin \theta + I'_0) \quad (11)$$

可见, 注入电流只引起容性电流变化, 对阻性电流几乎没有影响。且容性电流的变化量只与注入电流 \mathbf{I} 的大小有关。通过对比注入电流大小和被检容性设备容性电流测量结果即可对该设备进行容性电流校验, 当注入电流的变化范围包含被测设备的测量范围时, 则可对被测设备容性电流进行全范围校验。

2.3. 全电流校验原理

当注入电流大小为 \mathbf{I} , 相位为 α 时, 则注入电流与泄漏电流的矢量关系如图1所示。

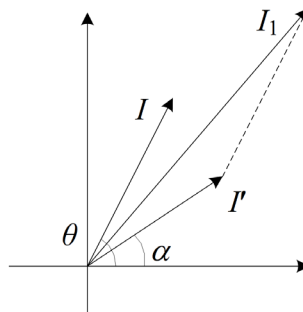


Figure 1. A vector plot of the injected current and the linkage current
图 1. 注入电流与泄漏电流的矢量关系图

根据矢量合成的平行四边形法则，则叠加电流 I_1 大小为

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_0'^2 + 2I_0I_0' \cos(\theta - \alpha)} \quad (12)$$

设泄漏电流与注入电流测相位差为 β ，则

$$\beta = \theta - \alpha \quad (13)$$

故

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_0'^2 + 2I_0I_0' \cos \beta} \quad (14)$$

当注入电流的相位能够跟踪泄漏电流的相位，并保证跟踪误差不超过 0.1° 时，即当

$$\beta \leq 0.1^\circ, \cos \beta \approx 1 \quad (15)$$

时，叠加电流大小为

$$I_1 = I_0 + I_0' \quad (16)$$

可见，泄漏电流大小的变化只与注入电流有关，且泄漏电流大小变化量与注入电流大小相等。通过对比注入电流大小和被检容性设备泄漏电流测量结果即可对该设备进行容性电流校验，当注入电流的变化范围包含被测设备的测量范围时，则可对被测设备全电流进行全范围校验。

3. 校验系统的总体设计

3.1. 系统构成

校验系统需要有两路输入信号，分别为电网电压经 PT 的输入的参考电压信号和容性设备泄漏电流经电流互感器输入的参考电流信号。全电流校验要求注入电流信号与泄漏电流信号相位差 β 不超过 0.1° 。因此系统通过采集泄漏电流信号作为参考信号以控制注入电流输出的相位，实现对泄漏电流相位的精确跟踪。系统组成原理框图如图 2 所示。

3.2. 频率跟踪部件的设计

由前面分析可知，校验系统的核心部件是工频跟踪电流源。工频跟踪电流源由两大部分组成，一是锁相跟踪；二是电流源输出。锁相跟踪部分具体包括：电压取样、信号调理、锁相跟踪、分频器分频。电流源输出部分具体包括：DA 基准信号输出、功率放大、电阻切换、电流输出。

1) 锁相跟踪

锁相跟踪部分关键目的是要获取与现场 PT 电压同频率同相位的信号，并能进行实时相位跟踪。首先，利用电压 - 电压变换器在 PT 二次侧进行电压取样。该电压进行波形变换、电平抬高等系列信

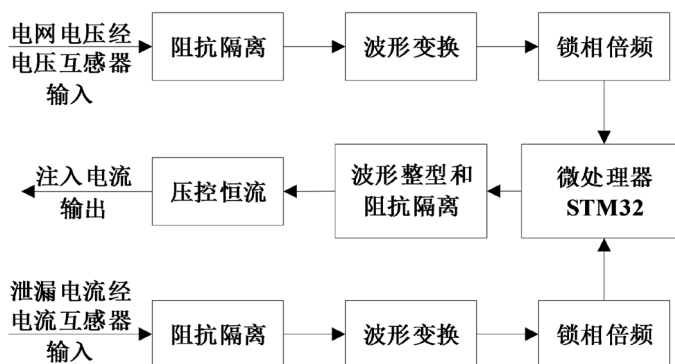


Figure 2. Schematic diagram of the system

图 2. 系统组成原理框图

号调理后进入锁相环模块，实现相位频率实时跟踪。最后锁相输出高频信号由分频器分频，获得与现场 PT 电压同相位的方波数字信号。具体技术路线如图 3 所示。

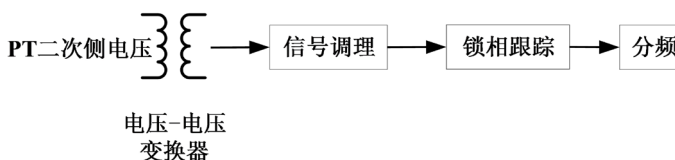


Figure 3. Diagram of phase lock tracking

图 3. 锁相跟踪技术框图

2) 电流源

锁相环输出信号经过分频器，输出工频方波信号，此信号作为 D/A 的时钟信号，控制 D/A 输出一个工频正弦波信号，这个工频信号作为电压基准信号，输入到电流源功放板上，功率放大后的信号再经标准电阻切换，获取不同档位的标准电流输出。具体技术路线如图 4 所示。

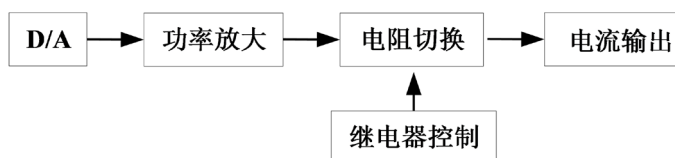


Figure 4. Diagram of the current output

图 4. 电流源输出技术框图

下面介绍校验系统的实验室功能测试和现场应用。

4. 实验室功能测试和现场应用

为检验所设计的基于增量注入法的容性设备在线监测装置现场校验系统的准确度是否满足现场校验要求，需进行实验室内的系统准确度检验。同时，为了检验系统现场实际应用效果，需选择实际变电站现场对不同厂家容性在线装置进行现场校准实验。

4.1. 实验室校验

为了检验系统阻性电流和容性电流校验准确度，特设计如图 5 所示试验方案，该方案通过信号发生器模拟电网电压信号，该信号通过 PT 输入口直接输入系统，输出电流幅值及阻性或容性电流

校验试验类型均可按需求设置,利用功率分析仪双通道分别跟踪信号发生器输出的模拟参考电压信号和系统输出电流信号波形,获取二者的相位差。同时,通过功率分析仪直接读取输出电流幅值,对比设定值与实测值差值,计算电流输出准确度。阻性电流校验及容性电流校验结果分别如表 1 和表 2 所示。

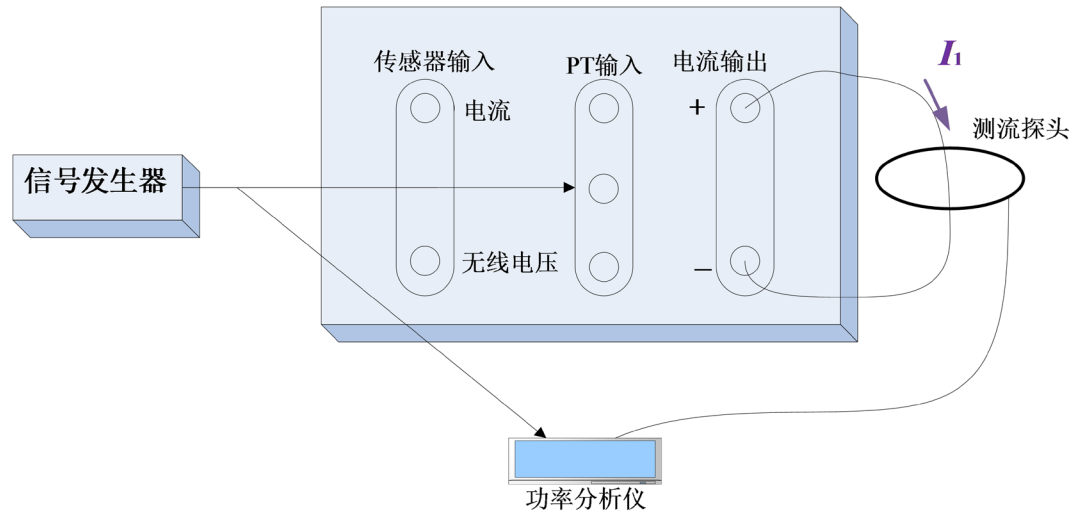


Figure 5. Diagram of accuracy tests of resistive current and capacitive current
图 5. 阻性电流和容性电流校验准确度检验实验方案

Table 1. Test data of the resistive current

表 1. 阻性电流检验准确度检验结果

设置值(mA)	输出电流值(mA)	相对误差(%)	相位差(°)
1	1.0031	0.310	0.035
5	5.0144	0.288	0.024
10	10.0374	0.374	0.022
50	50.1021	0.204	0.015
100	100.2035	0.204	0.011
500	500.4305	0.086	0.010
1000	1000.5563	0.056	0.008

Table 2. Test data of the capacitive current

表 2. 容性电流检验准确度检验结果

设置值(mA)	输出电流值(mA)	相对误差(%)	相位差(°)
1	1.0040	0.400	89.962
5	5.0154	0.308	89.978
10	10.0390	0.390	89.979
50	50.1130	0.226	89.983
100	100.2504	0.250	89.988
500	500.4834	0.097	89.989
1000	1000.7430	0.074	89.991

为了检验系统全电流校验准确度，特设计如图 6 所示试验方案，该方案通过电流发生器模拟产生泄漏电流 I_0 ，通过系统自带高精度电流互感器采集泄漏电流，设置输出 I_1 电流幅值，利用功率分析仪同时检测泄漏电流和输出电流波形，并读取输出电流幅值和输出电流相对输入电流的相位。全电流校验结果如表 3 所示。

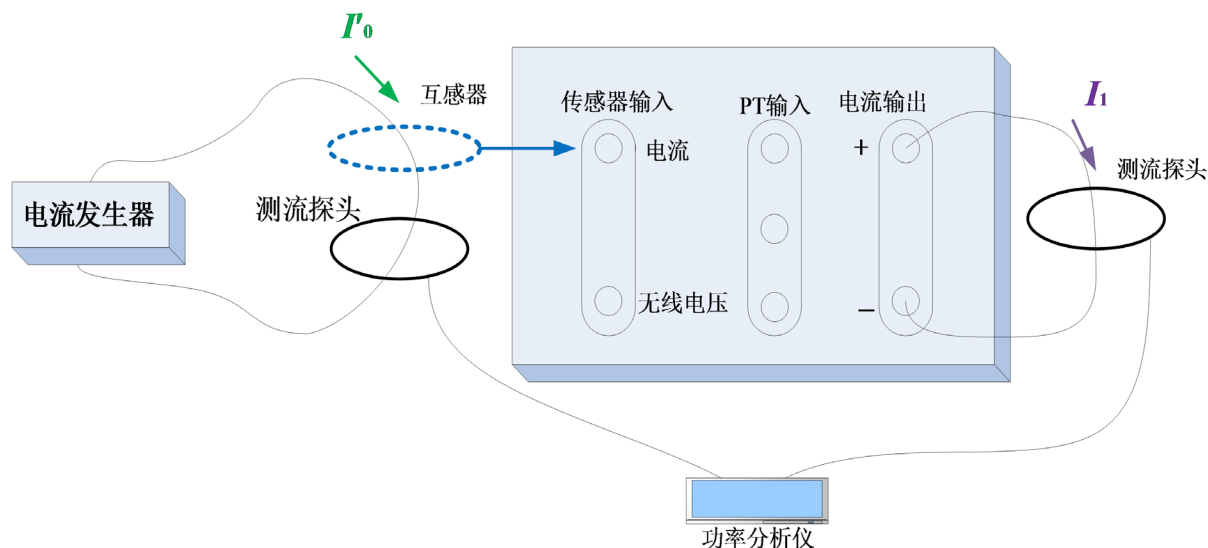


Figure 6. Diagram of accuracy tests of full current
图 6. 全电流校验准确度检验实验方案

Table 3. Test data of the full current
表 3. 全电流检验准确度检验结果

设置值(mA)	输出电流值(mA)	相对误差(%)	相位差(°)
1	1.003 5	0.350	0.032
5	5.013 4	0.268	0.028
10	10.029	0.290	0.025
50	50.133	0.266	0.018
100	100.350 4	0.350	0.014
500	500.583 4	0.117	0.011
1000	1000.843	0.084	0.010

通过表 1~表 3 可以看出，系统输出电流误差不超过 0.5%，相位误差不超过 0.1°，满足第 1 部分增量注入法及其校验原理中对角度近似的要求，故该系统准确度满足要求。

4.2. 现场校验

现场校验试验回路及接线图具体如图 7 所示。图中有 2 个完整的回路电流：一是现场实时避雷器泄漏电流 I_0 (绿色线)；二是校验装置标准源输出单元输出 1~50 mA 高精度标准校验电流 I_1 (紫色线)。避雷器泄漏电流回路通过避雷器自身回路接地，现场本身存在，而标准校验电流回路均是校验系统人为搭建。为了降低现场电磁干扰，校验装置的地需与避雷器泄漏电流的地连接，以保证检验装置输出准确度稳定性。

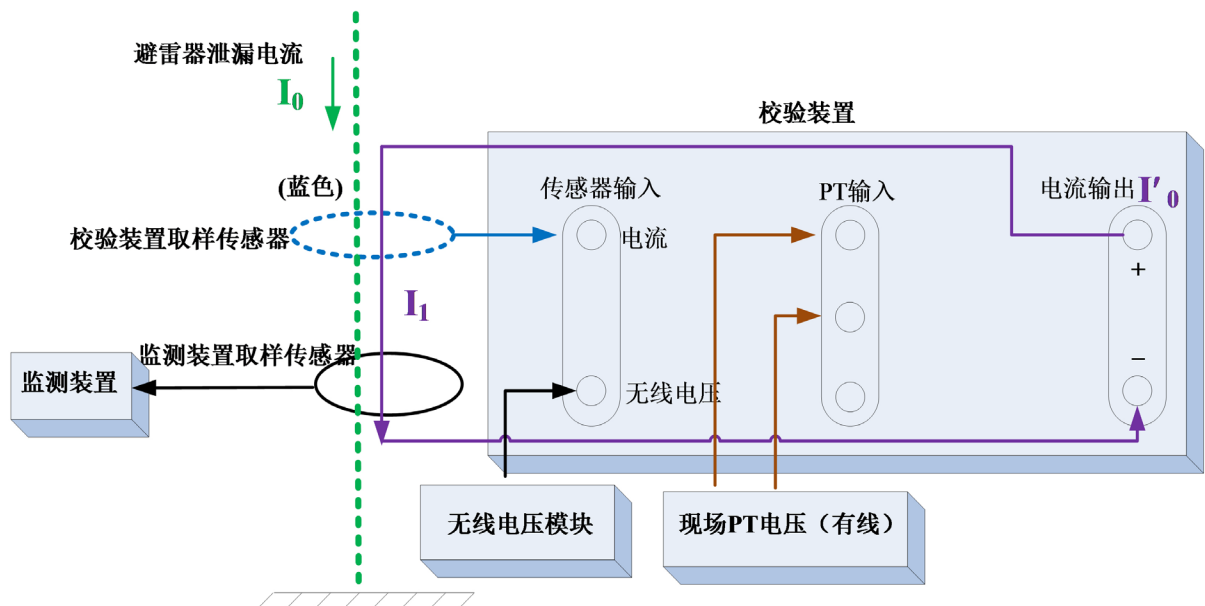


Figure 7. The wiring connection and test loop of the field verification of the MOA online monitoring devices
图 7. 避雷器泄漏电流在线监测装置现场试验回路及接线图

论文在湖北省某 500 kV 变电站进行了现场检验,某避雷器在线监测装置电流单元安装于 B 相,其电压监测单元取自某单元智能控制 II 号柜 A 相,现场试验图见图 8。



Figure 8. Field verification; (a) the platform of verification; (b) MOA linkage current transducer
图 8. 现场校验图; (a) 校验平台搭建; (b) MOA 在线监测传感器

设置校验装置电流输出单元,直接输出不同幅值的阻性电流,将其注入至避雷器在线监测取样传感器中,记录现场在线监测装置电流测量值,计算阻性电流增量相对误差,具体分析如表 4

所示。当标准源注入电流和电压相位相同时，注入电流值等于阻性电流；当标准源注入电流和电压呈一定相角时，注入电流值等于全电流。

Table 4. Increment analysis and data verification of the resistive current
表 4. 阻性增量校验数据分析

注入标准阻性电流 I_r/mA	全电流有效值/mA	阻性有效值/mA	容性有效值/mA	增量阻性 $\Delta I_r/mA$	相对误差 (阻性增量)
0	1.0261	0.1075	0.9924	/	/
0.2	1.0603	0.31	1.0138	0.2025	1.25%
0.5	1.1653	0.607	1	0.4995	-0.10%
1	1.4687	1.107	0.9625	0.9995	-0.05%
5	5.1474	5.0903	0.7874	4.9828	-0.34%
10	10.0696	10.0555	0.5333	9.948	-0.52%

由表 4 看出，在线监测装置对 0~10 mA 阻性电流注入响应，并且阻性电流增量相对误差控制在 1.25% 以内，满足 5% 准确度要求。

设置校验装置电流输出单元，输出与参比电压呈固定相位差 86.5° 方向且幅值已知的全电流，将其注入至避雷器在线监测取样传感器中，记录现场在线监测装置电流测量值，计算电流增量相对误差，具体数据分析如表 5 所示。

Table 5. Increment analysis and data verification of the full current
表 5. 全电流增量校验数据分析

注入全电流 I_c/mA	全电流有效值/mA	阻性有效值/mA	容性有效值/mA	增量全电流 $\Delta I_c/mA$	相对误差 (全电流增量)
0	1.032	0.1082	0.5022	/	/
-0.5	0.5057	0.064	0.5029	-0.5263	5.26%
3	4.0223	0.4735	3.992	2.9903	-0.32%
5	6.0185	0.7334	5.9768	4.9865	-0.27%

由表 5 看出，在线监测装置对全电流注入响应，当全电流增量为 -0.5 mA 时，相对误差为 5.26%，因此，可大致断定 B 相避雷器在线监测装置监测到的避雷器泄漏电流数据具备较高的可信度，准确性良好。

5. 结论

针对避雷器在线监测装置的现场校验问题，本文基于“增量注入法”校验理念提出了阻性电流、容性电流及全电流的校验原理，并研发了校验系统。实验室测试和现场实测表明系统输出电流误差不超过 0.5%，相位误差不超过 0.1° ，准确度满足现场校准准确度要求。论文研发的校验系统解决了现场需求输出电流与 PT 二次侧电压同频同相难的问题，为容性设备在线监测现场校准提供了便利。

参考文献

- [1] 刘红, 张力军, 欧朝龙, 等. 一种可溯源的氧化锌避雷器测试仪校验装置的研制[J]. 湖南电力, 2009, 29(6): 1-3.
- [2] Khodsuz, M., Mirzaie, M. and Seyyedbarzegar, S. (2015) Metal Oxide Surge Arrester Condition Monitoring Based on Analysis of Leakage Current Components. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **66**, 188-193.

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.052>

- [3] Stojanovic, Z.N. and Stojkovic, Z.M. (2013) Evaluation of MOSA Condition Using Leakage Current Method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **52**, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.03.027>
- [4] Christodoulou, C.A., Avgerinos, M.V., Ekonomou, L., et al. (2009) Measurement of the Resistive Leakage Current in Surge Arresters under Artificial Rain Test and Impulse Voltage Subjection. *IET Science, Measurement & Technology*, **3**, 256-262. <https://doi.org/10.1049/iet-smt:20080123>
- [5] Coffeen, L.T. and McBride, J.E. (1991) High-Voltage AC Resistive Current Measurements Using a Computer-Based Digital Watts Technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **6**, 550-556. <https://doi.org/10.1109/61.131111>
- [6] Lundquist, J., Stenstrom, L., Schej, A., et al. (1990) New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **5**, 1811-1822. <https://doi.org/10.1109/61.103677>
- [7] Shirakawa, S. (1988) Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **3**, 998-1003. <https://doi.org/10.1109/61.193879>
- [8] Laurentys, C.A. and Almeida (2009) Intelligent Thermographic Diagnostic Applied to Surge Arresters: A New Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **24**, 751-757. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2013375>
- [9] Wong, K.L. (2006) Electromagnetic Emission Based Monitoring Technique for Polymer ZnO Surge Arresters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **13**, 181-190. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2006.1593416>
- [10] Khodsuz, M. and Mirzaie, M. (2015) Harmonics Ratios of Resistive Leakage Current as Metal Oxide Surge Arresters Diagnostic Tools. *Measurement*, **70**, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.048>
- [11] Zhu, H.X. and Raghuvver, M.R. (2001) Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **16**, 599-603. <https://doi.org/10.1109/61.956743>
- [12] Xu, Z., Zhao, L., Ding, A., et al. (2013) A Current Orthogonality Method to Extract Resistive Leakage Current of MOSA. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **28**, 93-101. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2221145>
- [13] Han, Y., Li, Z., Zheng, H. and Guo, W. (2016) A Decomposition Method for the Total Leakage Current of MOA Based on Multiple Linear Regression. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **31**, 1422-1428. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2462071>
- [14] Khodsuz, M. and Mirzaie, M. (2016) An Improved Time-Delay Addition Method for MOSA Resistive Leakage Current Extraction under Applied Harmonic Voltage. *Measurement*, **77**, 327-334. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.09.027>
- [15] Heinrich, C. and Hinrichsen, V. (2001) Diagnostics and Monitoring of Metaloxide Surge Arresters in High-Voltage Networks: Comparison of Existing and Newly Developed Procedures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **16**, 138-143. <https://doi.org/10.1109/61.905619>
- [16] Karawita, C. and Raghuvver, M.R. (2006) On Site MOSA Condition Assessment—A New Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**, 1273-1277. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.860264>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org