试验回路导线长度对电流互感器检定结果影响的分析

为保证变电站内电流互感器计量的准确性，对JJG 313—2010与JJG 1021—2007互感器规程中的电流互感器误差检定试验线路进行分析，提出试验回路导线长度是电流互感器现场检定结果出现误差的主要原因。通过搭建电流互感器检定试验平台对不同长度二次回路下的试验结果进行计算与分析。结果表明，试验二次回路导线长度越长，电流互感器检定结果误差越大。最后提出了具体的改进措施，减少了回路阻抗，提高了互感器现场检定质量。

焦 通 李 昊 孙一宁 崔广泉 杨智超/国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院

焦 通/高级工程师

关键词/Keywords
电流互感器·
互感器检定规程·
二次回路·
回路阻抗·

0 引言

电力互感器的作用是对电力设备的运行状态进行监视和测量。电力互感器检定是确保电力互感器能够准确计量而进行的活动。然而，电流互感器在现场检定过程中，由于被检电流互感器的安装方式不同导致测试仪器设备与被检互感器的距离不确定，因此被检互感器与测试仪器设备的连接导线长短不固定，从而加大被检互感器的负荷，导致无法进行互感器检定甚至超出其误差范围[1]。本文通过对电流互感器检定回路所用的导线长度进行分析与计算，提出试验回路导线长度是互感器检定结果产生误差的主要原因，最后通过试验验证本文论点，对后续的电流互感器现场检定工作具有指导意义。

1 电流互感器原理与检定平台构成

1.1 电流互感器检定原理

根据JJG 313—2010《测量用电流互感器检定规程》与JJG 1021—2007《电力互感器检定规程》规定，电流互感器的现场检定采用比较法，通过将标准电流互感器和被测电流互感器在相同电流比下一次串联后取二次输出的差值，得到比差和角差进而判定其是否合格[2]。电流互感器误差测量接线原理如图1所示。

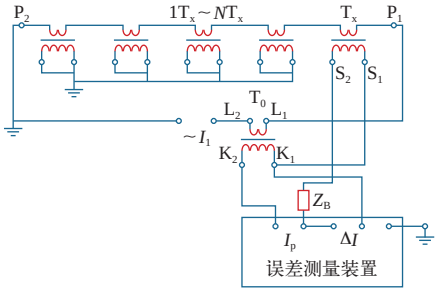

图1 电流互感器误差测量接线原理图

图1中，T_0为标准电流互感器；T_x为被检电流互感器；Z_B为电流负载箱；$1T_x \sim NT_x$为与被检电流互感器共用一次绕组的互感器。

1.2 电流互感器检定平台的构成

电流互感器检定平台由标准电流互感器、被试电流互感器、互感器校验仪、电流负载箱、调压器、升流器、测试电源、一次大电流导线及二次回路导线组成，如图2所示。

检定使用的标准电流互感器型号为HL－53SC，准确级为0.05级，电流比与被检互感器相同。互感器校验仪型号为HEW2000－W，用于测量并显示被检电流互感器的比值差、相位差及电流百分数，其准确度等级为2级。电流负载箱型号为FY99H型，用于模拟被检电流互感器

图2 电流互感器检定平台

的二次负荷，其准确度为±3%。升流器提供标准电流互感器和被检电流互感器一次回路电流，其容量一般为5～10 kV·A。调压器调节误差测试过程中所需的测试点，其容量应大于等于升流器容量。

2 试验回路导线长度对误差的影响

2.1 误差的定义

比值误差（比差）与相位误差（角差）被统称为电流互感器的误差。比差是二次电流按电流比折算到一次后，与一次实际电流大小之差。角差定义为二次电流反向后，与一次电流相角之差，以“分”作单位。当反向后二次电流超前于一次电流时，角差为正值；反之，滞后于一次电流时，角差为负值[3]。

由等效电路与相量图可知电流互感器的误差为

$$\varepsilon = \frac{-\dot{I}_0}{\dot{I}_1} \times 100\% = f_x + \mathrm{j}\delta_x \qquad (1)$$

式中，ε为电流互感器的误差；$\dot{I}_0$为一次励磁电流；$\dot{I}_1$为一次电流相量；f_x和δ_x分别为被检电流互感器的比值差和相位差。ε的模就是测量用电流互感器的复合误差，用ε表示，即

$$\varepsilon = I_0 / I_1 = Hl_{Fe} / (N_1 I_1) = 31.8 z_2 l_{Fe} / (\mu N_2^2 s_{Fe} K) \qquad (2)$$

式中，z_2为二次回路实际总负荷；l_{Fe}为铁心的平均磁路长度；μ为铁心材料磁导率；s_{Fe}为铁心有效截面积；N_2为额定二次匝数；$N_1 I_1$为一次安匝；H为磁场强度。

2.2 一次回路连接导线对误差的影响

根据检定规程规定，现场检定需要测试被检电流互感器在1%～120%额定电流及额定负荷和下限负荷下的误差。电流互感器检定时一次回路电流由升流器提供，一次电流能否达到额定值与升流器的输出容量、输出电流和输出电压相关。关系如下

$$S = U_1 I_1 \qquad (3)$$

$$U_1 = I_1 R_1 \qquad (4)$$

由式（3）和式（4）得

$$S = I_1^2 R_1 \qquad (5)$$

式中，S为升流器输出容量；U_1为升流器输出电压；I_1为一次回路电流；R_1为一次回路总阻抗。

由式（5）可知，当升流器输出容量S一定时，I_1与R_1成反比，即一次回路阻抗越大，一次回路电流越小。现场检定电流互感器时，由于现场的空间距离、被检互感器不同的安装方式以及测试仪器设备受作业条件的影响，会导致一次大电流导线加长才能连接形成回路，这就增大了一次回路总阻抗，导致一次电流不能升到额定值，使检定结果误差变大，严重时甚至无法进行检定[4]。

2.3 二次回路连接导线对误差的影响

实际运行的电流互感器二次负荷阻抗包括：保护装置，仪表线圈总阻抗R_b、二次回路中的导线电阻R_L和接头的接触电阻R_C。R_C的值通常为0.1～0.2 Ω[5]。电流互感器在允许的二次误差范围内所接的二次负载应满足式（6），即

$$S_x \leqslant S_2 \leqslant S_e \qquad (6)$$

式中，S_2为电流互感器二次负荷实际容量；S_e为电流互感器的额定容量；S_x为电流互感器下限负荷。

故

$$S_e \geqslant S_2 = I_{2e}^2 (R_b + R_L + R_C) \qquad (7)$$

二次连接导线电阻应满足下式

$$R_L \leqslant \frac{S_e - I_{2e}^2 (R_b + R_C)}{I_{2e}^2} \qquad (8)$$

式中，I_{2e}为电流互感器的额定二次电流；R_b为保护装置、仪表线圈总阻抗；R_L为二次导线的电阻；R_C为导线与设备接头处接触电阻。其中，

$$R_L = \rho \frac{l_{ec}}{s_{ec}} \qquad (9)$$

式中，l_{ec}为二次连接导线长度，m；ρ为二次连接

导线的电阻率，$mm^2 \cdot \Omega/m$；s_{ec}为二次回路连接导线的截面积，mm^2。

则

$$l_{ec} \leqslant \frac{s_{ec}[S_{2e} - I_{2e}^2(R_b + R_C)]}{\rho I_{2e}^2} \quad (10)$$

由式（10）可知，二次回路导线长度不能超出其额定值。所以，实际运行中的电流互感器的二次负荷也必须保证在额定值的范围内。而当在现场进行电流互感器检定时，往往采用比较法，其工作原理是在工作电压下测量平衡状态下流过电流比较仪的小电流，从而实现电流互感器同相分量和正交分量的测量。差流回路主要是通过比较线圈T_J来实现，首先标准电流互感器二次电流I_{20}与被试电流互感器二次电流I_{2x}之差ΔI流入节点K，然后通过取压电阻r与电压互感器T_b得到或正或负的电压，加在电导箱G或电容箱C上，从而产生电流流入节点K，调节电导箱和电容箱从而改变电流大小，当接在比较仪指零线圈上的检流计J指零时，可知被测电流和注入电流大小相等方向相反。其原理如图3所示。

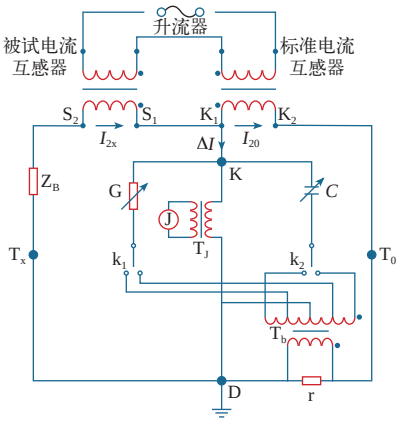

图3 二次回路原理图

根据图3也可知现场检定电流互感器的二次回路负荷为Z_B、K_1—S_1、S_2—Z_B及Z_B—T_x的导线电阻、接触电阻之和[6-7]。因此，根据式（2）、二次负荷大小以及阻抗角，电流互感器的比差与角差可由下式表示

$$f = -\varepsilon \sin(\alpha + \theta) \times 100\% \quad (11)$$

$$\delta = \varepsilon \cos(\alpha + \theta) \times 3440' \quad (12)$$

式中，α为二次阻抗角；θ为铁心损耗角。

由式（2）、式（11）与式（12）可以看出：电流互感器的误差与二次负荷成正比，现场进行电流互感器检定时，二次绕组阻抗、接触电阻及Z_B等参数都是固定值，因此，二次回路导线长度是产生检定误差的重要因素之一，导线长度越长，导致二次负荷增大，比差与角差也随之变大。

3 试验验证与分析

为了验证本文所提出论点的有效性，以220 kV大连华能电厂A相电流互感器为例，该电流互感器为日本三菱株式会社生产的BS型0.2S级电磁式电流互感器，电流比为2 000/5，功率因数为0.8，其额定二次负荷为40 V·A，互感器检定时下限负荷为3.75 V·A。分别采用10 m、20 m、50 m、100 m、200 m和400 m连接导线对额定负荷、下限负荷时该电流互感器的比值差和角差进行现场检定，具体测量结果如表1和表2所示。

表1 额定负荷时误差测量结果

长度		1%	5%	20%	100%	120%	二次负荷/V·A
10	f	−0.530	−0.210	−0.062	−0.061	−0.009	40
	δ	16.4	9.4	3.2	3.1	1.6	
20	f	−0.540	−0.190	−0.071	−0.069	−0.010	40
	δ	15.8	9.8	2.9	2.3	1.8	
50	f	−0.642	−0.206	−0.102	−0.053	−0.021	40
	δ	22.6	10.6	3.1	2.8	2.1	
100	f	−0.732	−0.216	−0.112	−0.106	−0.098	40
	δ	26	11.4	3.4	3.1	2.0	
200	f	−0.869	−0.412	−0.224	−0.201	−0.196	40
	δ	38	22.4	11.6	9.6	9.6	
400	f	−1.240	−0.890	−0.449	−0.413	−0.395	40
	δ	41.2	38.2	19.2	17.1	15.2	

表1表明，当电流负载箱置于40 V·A，二次导线长度为10 m、20 m、50 m和100 m时，检定结果符合JJG 313—2010与JJG 1021—2007相关标准的指标要求。当二次导线长度为200 m时，检定结果在1%～20%电流值时超出标准规定值，100%电流值时比差超出规定值，角差符合规程要求，120%电流值时比差、角差都符合规程要求。当二次导线长度为400 m时，比差、角差均超出规程中

表2 下限负荷时误差测量结果

长度/m		1%	5%	20%	100%	二次负荷/V·A
10	f	−0.156	−0.094	−0.034	−0.021	3.75
	δ	12.4	8.9	1.9	1.7	
20	f	−0.169	−0.112	−0.027	−0.031	3.75
	δ	13.3	8.7	2.1	1.9	
50	f	−0.183	−0.107	−0.056	−0.048	3.75
	δ	14.1	9.2	2.6	1.9	
100	f	−0.234	−0.156	−0.054	−0.052	3.75
	δ	18.2	10.0	2.4	2.1	
200	f	−0.768	−0.320	−0.163	−0.102	3.75
	δ	31.2	14.6	4.8	3.9	
400	f	−0.980	−0.760	−0.540	−0.318	3.75
	δ	36.8	35.7	21.2	15.4	

规定值。表2表明，当电流负载箱置于3.75 V·A，二次导线长为10 m、20 m、50 m和100 m时，检定结果符合规程规定。当二次导线长度为200 m时，检定结果在1%点，比差、角差都超出规定值。在5%～100%电流值时，检定结果符合规程要求。当二次导线长度为400 m时，比差、角差同样均超出规程中规定值。

通过对上述结果进行分析得知，当二次导线长度为10 m、20 m、50 m、100 m、200 m和400 m时，二次导线的电阻可由式（9）求出，其中ρ取值为0.017 $mm^2\cdot\Omega/m$，s_{ec}取值为4 mm^2，得出的值分别为0.042 5 Ω，0.085 Ω，0.212 5 Ω，0.425 Ω，0.85 Ω和1.7 Ω。二次额定阻抗为1.6 Ω。由此，可以看出二次导线阻抗的增大，检定误差也随之变大，即二次导线越长，比差与角差增大。同时可以得出当二次导线阻抗值占二次额定阻抗值的比例低于26.6%时，检定结果符合规程规定，当所占比例高于50%时，检定结果误差开始不断加大，当二次导线阻抗值大于或等于二次额定阻抗时，检定结果大大超出规程规定值。

4 结束语

本文首先阐述了电流互感器现场检定的必要性以及现场检定中存在的问题，然后对电流互感器规程中的检定线路进行分析，提出回路导线长度对于电流互感器性能影响很大，直接影响到电流互感器检定准确度。通过搭建试验平台加以验证，最后得出导线回路越长，负荷增大，导致检定结果超差。因此，正确地选择电流互感器二次负荷对于减少互感器检定误差，保证电能计量装置的准确计量具有重要意义。针对回路导线过长导致负荷增大的问题，可采取如下措施。

1）对二次各个引线端螺钉进行紧固和调整，确保可靠接触，并增大接触面积以减少接触电阻，接触电阻值应当控制在0.05～0.2 Ω。

2）测量导线长度，计算导线阻抗，当导线过长时，电流负载箱的设定值应减掉导线阻抗，确保二次回路阻抗的误差控制在±6%范围内。

3）尽量采用二次电流为1 A的电流互感器，如本文中二次负荷为40 V·A，二次电流为5 A，额定阻抗为1.6 Ω。当二次电流为1 A时，其额定阻抗为40 Ω，此时，导线回路的长度对二次负荷的影响甚至可以忽略不计。

参考文献

[1] 刘振波．电流互感器二次负荷对计量误差的影响[J]．东北电力技术，2007 (11)：21-23.

[2] JJG 1021—2007 电力互感器 [S].

[3] 周利华，赵良德，疏奇奇．二次回路阻抗对低压电流互感器自动检定线测量误差的影响分析 [J]．计量与测试技术，2014，41 (9)：25-27.

[4] 潘洋，林艳，朱力，等．互感器校验仪差流回路负荷对电流互感器检定结果影响的分析与计算 [J]．电测与仪表，2011，48 (6)：32-35.

[5] 丁涛，邵淮岭，何志强，等．电流互感器自动化检定系统二次负荷测试及分析 [J]．电测与仪表，2016，53 (2)：114-117.

[6] 张杰梁，董小龙，黄洪，等．互感器校验仪差压回路的分析及其附加负荷推算 [J]．中国测试，2015，41 (12)：28-31.

[7] 刘琦，徐雁，高飞，等．电子式电压互感器暂态响应的影响因素分析 [J]．电气工程学报，2015，10 (10)：37-43.

（收稿日期：2017－01－10）EA