

电力互感器检定与评估方法综述

王毓琦¹, 李红斌², 向鑫², 刘涛¹, 曹彤¹, 张传计²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002; 2. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 随着智能电网的发展,为跟踪和把握日益庞大的互感器群体运行误差,国内外电力测量领域专家、学者一直在不断尝试和探索新的互感器检定和评估方法。文章按照检定思路的不同将互感器检定和评估方法分为“静态检定”、“带电检定”和“预标定评估”三类,对这三类方法的原理以及近些年研究现状和成果进行了梳理,比较了各方法的优点和不足。不停电、不依赖标准器、不影响电网正常运行的检定和评估方法将成为互感器检定的研究热点,是未来新型检定技术的发展方向。

关键词: 互感器检定; 误差评估; 静态检定; 带电检定; 预标定评估

Review of Verification and Evaluation Methods of Power Transformers

WANG Yuqi¹, LI Hongbing², XIANG Xin², LIU Tao¹, CAO Tong¹, ZHANG Chuanji²

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of the power grid, the power measurement experts have been exploring new methods of transformer verification and evaluation, in order to track and grasp the operating error of the increasingly number of transformers. According to the different verification principles, this paper divides those methods into three categories: “static verification”, “on-site verification” and “pre-verification evaluation”. In this paper, the principles of the three types of methods are combed, status and results of recent research are sorted out, the advantages and disadvantages are compared. The new verification and evaluation methods that do not power off, do not rely on the standard device, and do not affect the normal operation of the power grid will become the research hotspot, and will become development direction of the transformer verification in the future.

Key words: transformer verification; error evaluation; static verification; on-site verification; pre-verification evaluation

0 引言

电力互感器通过对大电流和高电压的传变为电网提供基础量测数据,准确把握其运行误差关系到贸易结算、继电保护和未来智能电网的众多高级应用^[1-4],持续跟踪运行误差还可以预测电力互感器的绝缘恶化、绕组变形等运行状态,避免因互感器爆炸引发的停电事故^[5-6]。随着智能电网建设的推进,电子式互感器、数字化合并单元等新型传感技术和数据传输技术已逐步推广,与传统的电流互感

器(CT)和电压互感器(PT)相比,新技术的测量误差更不稳定、变化规律更加复杂^[7-8],跟踪其运行误差变得更为必要和急迫。如何在如此庞大的互感器群体中,准确跟踪把握互感器运行误差一直是困扰国内外专家学者的测量领域世界性难题。

为了跟踪互感器的运行误差,国内外测量领域专家、学者开展了大量的研究,对互感器的检定方法开展了不同方向的尝试和探索。在电力互感器检定方法的探索和发展中,经历了从“静态检定”到“带电检定”再到“预标定评估”的发展。在电力行

业发展之初,除了实验室检测,必须在停电条件下对互感器开展离线式的“静态检定”,以把握在运互感器的运行误差,这也是目前电力行业最常用的一种方法^[9-11]。为减少“静态检定”方法因停电对电网运行的影响,学者们提出了一种互感器“带电检定”方法,该类方法使用在线式的特种标准器在带电状态下对在运互感器的误差进行检定^[12-16]。然而“带电检定”依然存在便携性、安全性等方面的不足,因此专家学者们近年来在“预标定评估”方向上提出了探讨,试图通过建立物理或数学模型实现对网络中所有互感器运行误差的评估^[17-19]。

文章对这3类检定方法进行概述和比较,对这些方法近年来的研究现状和研究成果进行梳理,并尝试对电力互感器检定和评估方法的发展方向提出展望,以供同行参考。

1 “静态检定”

1.1 “静态检定”的思路和原理

“静态检定”法是目前电力行业使用的互感器检定方法,国家计量检定规程^[9-11]对电压、电流互感器检定的“静态检定”方法做出了详细描述。“静态检定”法基本思路见图1。在电网停电时,对待检定互感器和高精度标准器同时施加相同的电流/电压信号,高精度标准器的输出被视为真值,待检互感器的输出值与真值之间的差异即为互感器的静态误差。

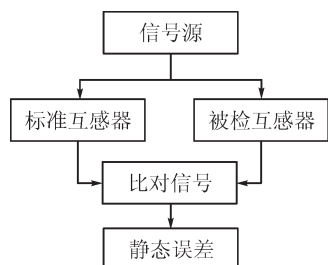


图1 “静态检定”思路

Fig. 1 Idea block of static verification

电磁式电流互感器静态检定方法示意图见图2。把被检互感器和标准互感器的一次侧串联到升流器的输出回路中,由升流器提供被测和标准通道的输入电流;被检互感器和标准互感器二次侧串联,二次电流差值被引入误差测量装置,再通过对差值电流的检测即可得到被检互感器的比值误差和相位误差。电压互感器的检定思路与电流互感器一致,通过对被校互感器与标准互感器二次侧输出电位差值的测量得到被校电压互感器的比差和角差。

由于电子式互感器的数字量输出,其检定原理

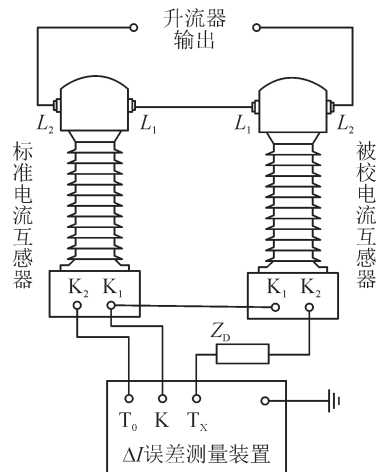


图2 电磁式电流互感器静态检定原理图

Fig. 2 Block diagram of CT static verification

与传统互感器略有不同:电子式互感器检定时需要把基准互感器输出的模拟量转换成数字量,然后再用数字量来进行误差计算^[20]。电子式电流互感器静态检定方法中,误差检定装置通过对标准和被检互感器输出电流特征参数的比较来得到被检互感器误差见图3。

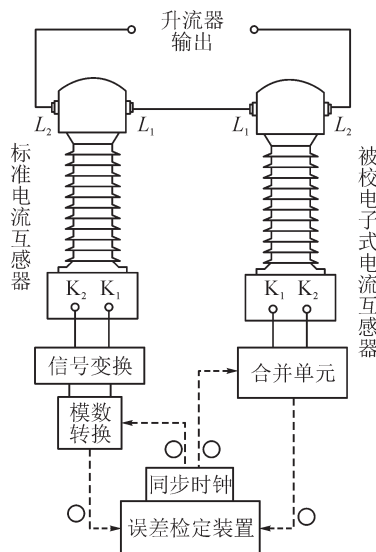


图3 电子式电流互感器静态检定原理图

Fig. 3 Block diagram of ECT static verification

1.2 “静态检定”的研究现状

近年来,国内外对“静态检定”方法的研究主要集中在集成化、标准化和自动化等方面,并取得了一定突破^[21-24]。

文[21]对低压电流互感器自动化检定系统设计需求进行了探索和研究,从硬件设计和软件设计两方面实现低压电流互感器自动化检定系统设计,提升了检定效率。文[22]研制了一套一体化互感器综合检定系统,对低压电流互感器校验仪进行自动化、智能化改进,实现通过自动切换各项电气试验同时对6台互感器进行10项电气试验,效率提升

3倍;文[23]针对目前国内外还没有相关的计量技术法规对自动化检定系统进行约束的问题,对电流互感器的首次检定、后续检定和使用中检查的检定方法和技术要求,提出了标准化流程和重要注意事项;文[24]针对传统检定方法和现场电源难以满足特高压电流互感器现场大电流升流检定要求的现状,研制了基于电力电子、无功补偿及自动控制等技术的特高压电流互感器自动化检定系统。可以看到的是,随着近年来集成化、标准化和自动化的发展,互感器“静态检定”的效率得到很大提升。

1.3 “静态检定”特点

静态检定方法中,通过调节升流器/升压器可实现对输入电流/电压的调节,从而可以对待检互感器开展多种试验项目的检定;静态检定的信号源和标准互感器都在停电条件下接入,具有较高的操作安全性^[25]。但是也由于信号源和标准互感器的停电后接入,“静态检定”法的3个主要缺陷无法避免:被检互感器及周边设备必须停电,检定耗时长,对电网正常运行造成较大影响;高精度标准器笨重、不易携带;静态检定时的工况与实际运行时的工况存在一定差异,不能全面反映运行误差的动态变化^[26]。其优点与不足见表1。为减少“静态检定”方法因停电对电网运行的影响,国内外学者开展了对“带电检定”方法的研究。

表1 “静态检定”的优点和不足

Table 1 Advantages and disadvantages of static verification	
名称	内容比较
优点	可以开展多项目检测,检测全面;具有较高安全性。
不足	需要停电,耗时长;标准器笨重、不易携带;无法进行实时或长期监测,检定误差与运行状态可能存在差异。

2 “带电检定”

2.1 “带电检定”思路 and 原理

互感器的“带电检定”法由华中科技大学的李红斌团队于2008年率先提出^[27-30]。互感器的“带电检定”方法检定思路与“静态检定”法类似,也是基于标准器获得真值,待检定互感器的输出值与真值之间的差异即为互感器的运行误差,见图4。“带电检定”与“静态检定”不同之处在于:“带电检定”采用的标准器经过特殊改进设计,其精度高、体积小、重量轻,可采用带电操作方式接入与待检定互感器相同的回路,并实现短期在线运行。

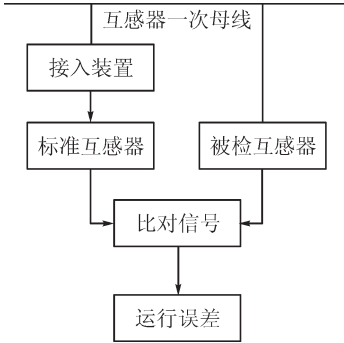


图4 “带电检定”思路

Fig. 4 Idea block of on-site verification

电磁式电流互感器“带电检定”系统^[29]见图5。标准互感器通常为空心钳型线圈,直接穿入被检互感器的一次工作电流回路,从而待检互感器和标准互感器的输入电流直接从电网实际工况中获取。误差检定装置对同步采集的标准和被检信号采样值序列进行特征量提取,并通过特征量的对比获得被检互感器的误差。

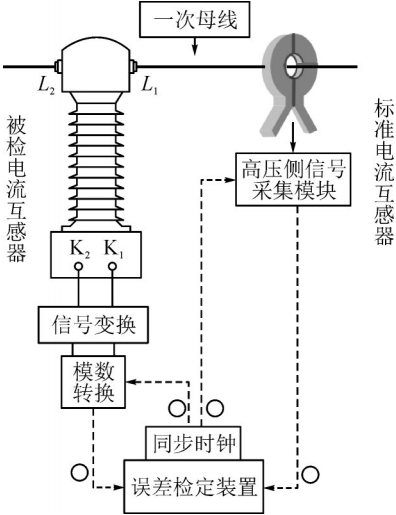


图5 电磁式电流互感器“带电检定”原理

Fig. 5 Block diagram of CT on-site verification

电压互感器以及电子式互感器的带电检定方法与电流互感器在思路基本一致,在标准器种类、标准器的接入方式、二次输出变换采集上略有差异^[31-33]。

2.2 “带电检定”发展现状

“带电检定”方法近年来在提升“带电检定”的操作便携性、操作安全性、检定效率以及高压直流互感器带电检定等方面取得诸多成果^[34-41]。文[34-35]在提升带电检测操作安全性、便携性方面做出了努力;文[34]研制了一种自动可遥控升、降的辅助绝缘子,提升了电流互感器带电操作的自动化和安全性;文[35]通过分芯式 Rogowski 线圈和阻容分压器来实现便携式标准电流传感器和标准分压器。

文[36-37]研究了电流、电压和电能的带电检定与远程检定中面临的数据处理及通信难题,从电气特征量提取算法、远程通信方案等方面提升互感器远程校验方法,丰富了远程带电检定的工程化方案;文[38]提出了电压互感器在线群校准概念,基于建立全站同步监测系统,在短时间内实现对全站电压互感器误差在线校准工作,大大提升了电压互感器在线检定工作的效率。随着特高压直流输电技术的发展,高压直流互感器的检定技术需求日益突出,文[39-41]从准确性、谐波响应性能、抗干扰性能等关键方面优化高压直流互感器带电检定技术。

2.3 “带电检定”特点

“带电检定”实现了在不停电条件下对待检互感器的检定,避免了停电校验带来的经济损失和大量人力消耗;同时“带电检定”在待检互感器的实际工作环境中展开,其检定结果能从一定程度上反映待检互感器在实际运行工况下的运行误差特性;相比静态检定,“带电检定”的标准器具具有精度高、体积小、重量轻的优势,便携性更佳^[42-43]。虽然近年来“带电检定”方法的操作便携性、安全性随着研究的深入得到一定提升,但是其在标准互感器便携性不足、带电操作安全性存在隐患、无法长期监测等方面的不足依然无法避免。其优、缺点见表2。针对“带电检定”方法的不足,一种有别于传统检定思路的“预标定评估”检定方法在近年被提出,并得到广泛的探讨和研究。

表2 “带电检定”的优点和不足

Table 2 Advantages and disadvantages of on-site verification

名称	内容比较
优点	不需要停电;能够反映互感器实际运行误差;相比静态检定互感器更便携。
不足	标准互感器便携性不足;带电操作安全性存在隐患;无法长期监测。

3 “预标定评估”

3.1 “预标定评估”思路 and 原理

从2012年开始,以两位IEEE终身会士(IEEE life fellow)A. G. Phadke和J. S. Thorp为代表的国内外专家对电力互感器误差检定的“预标定”方法提出了探讨^[17-19]。“预标定评估”与传统的检定方法中依赖标准互感器的差值比较思路有很大的区别,“预标定评估”检定方法的思路核心为:借助已知的电力网络在某一特定状态下部分特性对网络中所有互感器的运行误差特性进行评估或预测,见图6。使

用该类方法进行互感器误差评估步骤通常分为“预标定”和“误差评估”两部分,即:预先使用“静态检定”获得一台或少数几台互感器的误差特性的真实状态;然后采用刚性约束条件(一般为方程组)描述已标定互感器的输出值和少量待评估互感器的输出值之间的关系,结合已标定互感器的初值与刚性约束条件计算出待评估互感器对应的真值,待评估互感器的输出值与计算出的真值之间的差异即为误差评估值。

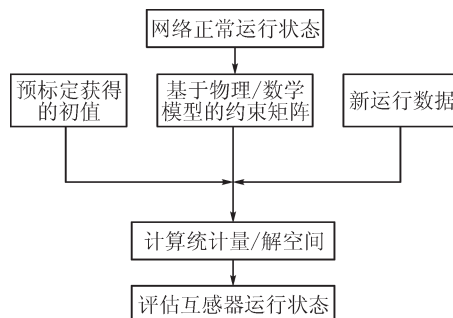


图6 “预标定评估”思路

Fig. 6 Idea block of pre-verification evaluation

3.2 “预标定评估”发展现状

国外的学者首先提出了对“预标定”方法的探索。文[17]介绍了一种以节点电流平衡建立判据,实现单节点三相互感器误差状态评估的方法;该方法在预先获得一组三相“标准器”PT或电容式电压互感器(CVT)误差特性的基础上,以三相互感器所在电力网络等效电路为基础,依靠基尔霍夫电流定律建立节点电流平衡矩阵,最后通过求解矩阵方程得到相应互感器误差的评估量;文[18]介绍了一种以潮流分布为依据的互感器误差状态传递方法;该方法在预先获得一组母线电压和电流准确值的基础上,以互感器所在系统的节点网络为基础,依据潮流分布特性建立误差状态传递方法,最终将互感器误差评估转化成潮流网络数学模型的潮流求解问题。文[19]讨论了“预标定评估”类方法的可信度,为保证评估结果的准确性,预标定互感器的误差状态至多能够传递8个节点,并且通过IEEE-118节点模型仿真验证了结论。

同一时期起,国内的研究团队在“预标定评估”思路的检定方法上开展了诸多研究。文[44]中介绍了一种以电力系统频率波动规律建立判据,采用高维随机矩阵,实现单相互感器误差状态评估的方法,并且通过实测数据证明了方法的有效性。文[45]中介绍了一种以电力系统三相不平衡度建立判据,采用主成分分析,实现三相互感器误差状态评估的方法,并且通过实测数据与实验室互感器等效模型证

明了方法的有效性。文[46]使用误差特性较为稳定的互感器为被检互感器提供同级比对标准,采用母线PT及变压器侧CVT作为被检CVT标准器,实现特高压变电站全站在运互感器的误差比对和误差修正。

3.3 “预标定评估”特点

“预标定评估”完全不同于传统上依赖于标准互感器的检定思维,依据电力网络固有的刚性约束和预先获取的部分互感器状态可以实现对网络中所有互感器误差状态的评估,“预标定评估”安全、高效、成本低廉,是一种全新的检定思路。但是该方法也依然存在“预标定”互感器误差特性必须预先获取、“预标定”互感器状态对评估结果影响很大、误差评估的准确度和置信度对刚性约束条件以及初值选取尤为依赖等问题。其优、缺比较见表3。因此,笔者大胆预测,如何摆脱“预标定”过程,完全依赖建立物理或数学模型的约束条件完成互感器运行误差评估的“无标定评估”检定法将成为互感器检定方法发展的新方向。

表3 “预标定评估”的优点和不足

Table 3 Advantages and disadvantages of pre-verification evaluation

名称	比较内容
优点	无需停电;无需标准器;可对互感器群体的运行误差进行长期监测。
不足	需要通过“静态检定”进行“预标定”;“预标定”互感器状态对评估影响很大;评估准确度受模型和初值影响较大。

4 结语

从“静态检定”到“带电检定”再到“预标定评估”,电力互感器检定方法一直朝着准确化、安全化、便携化、高效化的方向发展,见表4。研究不需要停电、不采用标准器、不影响电网正常运行的大规模电力互感器群体检定技术已成为互感器检定方向研究的需求和热点;相信随着传感量测、数字信号处理与通信技术等先进基础技术的发展和交叉融合,电力互感器检定和评估技术必将迎来新的突破和进步。

表4 电力互感器检定方法特点

Table 4 Characteristics of power transformer verification methods

特征	“静态检定”	“带电检定”	“预标定评估”	新方法的展望
标准器	需要	需要	不需要 ¹	不需要
互感器停电	需要	不需要	不需要 ²	不需要
安全隐患	弱	强	无	无
预先标定	不需要	不需要	需要	不需要
群体监测	不能	不能	可以	可以
长期监测	不能	不能	可以	可以
误差形式	静态误差	运行误差	运行误差评估量	运行误差
检定成本	高	高	低	低

注:表4中的1,2为预标定评估方法在误差评估阶段不需要标准器和停电,但是预标定过程通常依然需要按照“静态检定”法进行。

参考文献:

[1] LOCCI N, MUSCAS C. A digital compensation method for improving current transformer accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4):1104-1109.

[2] TZIOUVARAS D A. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1):62-72.

[3] CARO E, VALVERDE G. Impact of transformer correlations in state estimation using the unscented transformation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 368-376.

[4] GOMEZ-QUILES C, GOMEZ-EXPOSITO A, DE LA VILLA

JAEN A. State estimation for smart distribution substations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2):986-995.

[5] CAMCI F. System maintenance scheduling with prognostics information using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58(3):539-552.

[6] 李明, 韩学山, 王勇, 等. 变电站状态检修决策模型与求解. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 196-202.

LI Ming, HAN Xueshan, WANG Yong, et al. Decision-making model and solution of condition-based maintenance for substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (25):196-202.

[7] ZHANG M, LI Z. Analysis of key factors affecting electronic transformer calibration system error[J]. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2013, 19(5):39-44.

- [8] VOLOVICH G I. The influence of internal noise on electronic current transformer error[J]. Measurement Techniques, 2016, 59(2):164-169.
- [9] 测量用电流互感器:JJG 313—2010[S]. 2010.
Instrument current transformers:JJG 31—2010[S]. 2010.
- [10] 测量用电压互感器:JJG 314—2010[S]. 2010.
Instrument voltage transformers:JJG 314—2010[S]. 2010.
- [11] 电力互感器:JJG 1021—2007[S]. 2007.
Power transformers:JJG 1021—2007[S]. 2007.
- [12] 童悦,李红斌,张明明,等.一种全数字化高压电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报,2010,25(8):59-64.
TONG Yue, LI Hongbin, ZHANG Mingming, et al. An all-digital on-line calibration system for high voltage current transformer[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8):59-64.
- [13] 李振华,李红斌,张秋雁,等.一种高压电子式电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报,2014,29(7):229-236.
LI Zhenhua, LI Hongbin, ZHANG Qiuyan, et al. An on-line calibration system for high voltage electronic current transformers[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7):229-236.
- [14] ZHAO S S, HUANG Q F, MIN L. Compact system for on-site calibration of 1 000 kV voltage transformers[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 12 (13):368-374.
- [15] LI Z H, LI H B, ZHANG Z. An accurate online calibration system based on combined clamp-shape coil for high voltage electronic current transformers[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(7):5113.
- [16] CHENG H M, LI H B. An improved calibration system with phase correction for electronic transformers with digital output[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(8):2007-2013.
- [17] WU Z Y, THOMAS K, SUN R, et al. Three-phase instrument transformer calibration with synchronized phasor measurements[C]//2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington, DC:IEEE,2012:1-6.
- [18] WU Z Y, ZORA L T, PHADKE A G, et al. Simultaneous transmission line parameter and PMU measurement calibration[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver:IEEE,2015:1-5.
- [19] PAL A, CHATTERJEE P, THORP J S, et al. Online calibration of voltage transformers using synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1):370-380.
- [20] 唐毅,江波,李红斌,等.数字电能计量系统检定方法综述[J]. 电工技术学报,2013,28(s2):372-377.
TANG Yi, JIANG Bo, LI Hongbin, et al. Survey on the verification methods for digital electrical energy metering [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28 (s2):372-377.
- [21] 孙勇强.河北电力低压电流互感器自动化检定系统设计与实现[D]. 保定:华北电力大学,2016.
SUN Yongqiang. Design and implementation of automatic verification system of hebei electric power for the low voltage current transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [22] 王庆,屈鸣,吴维德,等.低压电流互感器电气综合试验检定系统设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表,2017(1):55-58.
WANG Qing, QU Ming, WU Weide, et al. Design and implementation of electrical comprehensive test verification system for low voltage current transformer[J]. Automation & Instrumentation, 2017(1):55-58.
- [23] 雷民,岳长喜,王雪,等. JJG 1139—2017《计量用低压电流互感器自动化检定系统检定规程》解读[J]. 中国计量,2018(1):122-125.
LEI Min, YUE Changxi, WANG Xue, et al. Interpretation of JJG 1139—2017 “verification procedure for automatic verification system for low-voltage current transformers for measurement”[J]. China Metrology, 2018(1):122-125.
- [24] 徐敏锐,曾捷,穆小星,等.特高压电流互感器自动化检定系统设计与应用[J]. 南京理工大学学报,2017,41(6):730-737.
XU Minrui, ZENG Jie, MU Xiaoxing, et al. Design and application of automatic verification system for ultra-high voltage current transformer[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(6):730-737.
- [25] 陈福胜,欧朝龙,万全,等.电子式互感器校验仪的设计与实现[J]. 电测与仪表,2011,48(1):55-58.
CHEN Fusheng, OU Chaolong, WAN Quan, et al. Design and development of calibrator for the electronic transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48 (1):55-58.
- [26] 李鹤,李前,胡浩亮,等.变电站用电流互感器在线校准系统的研制[J]. 电测与仪表,2013,50(12):5-8.
LI He, LI Qian, HU Haoliang, et al. Research on the on-line calibration technology for power instrument transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50 (12):5-8.
- [27] 陈霄. 220 kV 电流互感器在线校验系统[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
CHEN Xiao. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [28] 程蕾. 基于虚拟仪器的高压电流互感器在线校验系统[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
CHENG Lei. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,

- 2009.
- [29] 胡琛. 高压电流互感器在线校验系统二次信号数字化技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- HU Cheng. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [30] 童悦. 电流互感器在线校验关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- TONG Yue. A dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [31] 邵明鑫, 王晓琪, 吴细秀, 等. 基于新型LVQB型电流互感器的CVT在线校验方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 45-51.
- SHAO Mingxin, WANG Xiaoqi, WU Xixiu, et al. Investigate on on-line calibrating method for CVT by using a new LVQB type current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8):45-51.
- [32] 章述汉, 雷民, 熊前柱, 等. 电力互感器在线校准用数据采集装置的研制[J]. 电测与仪表, 2012, 49(12): 82-85.
- ZHANG Shuhan, LEI Min, XIONG Qianzhu, et al. Development of data acquisition device used for power transformer on-line calibration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(12):82-85.
- [33] 李宝磊, 游大海, 李昊翔, 等. 基于IEC 61850-9-2LE的电子式互感器校验与在线监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 136-140.
- LI Baolei, YOU Dahai, LI Haoxiang, et al. Calibration and online monitoring system for electronic transformer based on IEC 61850-9-2LE[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19):136-140.
- [34] 李鹤, 李前, 胡浩亮, 等. 变电站用电流互感器在线校准系统的研制. 电测与仪表, 2013, 50(12): 5-8.
- LI He, LI Qian, HU Haoliang, et al. Research on the on-line calibration technology for power instrument transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 39(19):136-140.
- [35] MAZZA P, BOSONETTO D, CHERBAUCICH C, et al. On-site verification and improvement of the accuracy of voltage, current and energy measurements with live-line working methods: New equipment, laboratory and field experience, perspectives[C]//2014 11th International Conference on Live Maintenance(ICOLIM). Budapest: [s.n.], 2014:1-8.
- [36] 罗志坤. 电能计量在线监测与远程校准系统的研制[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- LUO Zhikun. The research on online measurement of electrical power energy and remote calibration system[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [37] 郝俊峰. 电能计量装置远程校验与监控系统研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- HAO Junfeng. Remote verification and monitoring system for electric energy measuring device study[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [38] 项琼, 王欢, 杜研, 等. 电力电压互感器在线群校准技术研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(3): 32-37.
- XIANG Qiong, WANG Huan, DU Yan, et al. Research on group online error calibration for power voltage transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(3):32-37.
- [39] 张杰, 胡媛媛, 刘飞, 等. 高压直流互感器现场校准关键技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 3003-3010.
- ZHANG Jie, HU Yuanyuan, LIU Fei, et al. Critical technology of on-site calibration system for DC electronic instrument transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9):3003-3010.
- [40] 柏航, 徐雁, 肖霞, 等. HVDC电子式电流互感器现场校准方法及关键问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5227-5235.
- BAI Hang, XU Yan, XIAO Xia, et al. Research on field calibration methods and key problems for HVDC electronic current transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19):5227-5235.
- [41] 柏航. 高压直流电流互感器现场校准抗干扰及不确定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- BAI Hang. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree for the master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [42] 张志. 电子式电流互感器在线校验关键技术及相关理论研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- ZHANG Zhi. Key technology and related theoretical research on online calibration of electronic current transformer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [43] LUO P D, LI Z H, LI H B, et al. A high-current calibration system based on indirect comparison of current transformer and rogowski coil[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 52(24):5005.
- [44] 程含渺. 电子式互感器状态评估方法及其检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- CHENG Hanmiao. Research on state evaluation method and detection technology of electronic transformer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [45] ZHANG Z, LI H B. Monitoring the metering performance of an electronic voltage transformer on-line based on cyber-physics correlation analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 54(28):1-8.
- [46] 徐思恩, 冯宇, 汪本进, 等. 特高压电容式电压互感器

- SUN Youliang, LI Wenping, ZHAO Yinhan, et al. Research on design scheme of UHV converter transformer[J]. Electrical Manufacturing, 2012(8):46-47.
- [18] 李文平, 陈志伟, 宋秀生, 等. ± 800 kV 直流输电工程用换流变压器主绝缘结构的研究[J]. 电力设备, 2007(3):5-7.
- LI Wenping, CHEN Zhiwei, SONG Xiusheng, et al. Research on main insulation structure of converter transformer used in ± 800 kV HVDC transmission project[J]. Electrical Equipment, 2007(3):5-7.
- [19] 王永红. 换流变压器油纸绝缘击穿特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- WANG Yonghong. Breakdown characteristics of oil-paper insulation in converter transformer[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013.
- 张书琦(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变压器技术研究工作。
- 赵晓林(1988—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为变压器绝缘性能分析与诊断技术(通讯作者)。

(上接第 101 页)

- 误差在线同级比对技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3):133-137.
- XU Si'en, FENG Yu, WANG Benjin, et al. Research on on-line peer comparison of UHV capacitor voltage transformer error[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3):133-137.
- 王毓琦(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电能计量研究工作。
- 李红斌(1960—), 女, 博士生导师, 教授, 从事电气信息检测技术和智能变电站二次设备研究。
- 向鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 从事电力信息检测技术与数字化计量方向研究(通讯作者)。
- 刘涛(1986—), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力系统自动化研究工作。
- 曹彤(1990—), 女, 硕士, 经济师, 主要从事标准化技术工作。
- 张传计(1993—), 男, 博士研究生, 从事电气信息检测技术和智能变电站二次设备研究。