

基于改进数字滤波算法的电子式互感器稳态校验方法

顾强¹, 刘浩武^{1,2}, 徐晓萌³, 李晓辉¹, 陈彬¹, 葛磊蛟²

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384;

2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 3. 国网天津市电力公司, 天津 300055)

摘要:传统电子式互感器校验方法一般采用电磁式互感器作为标准源, 该校验方法不仅存在电磁互感器的铁磁谐振及铁磁饱和缺陷、增容困难、二次接线繁琐以及二次开路高压危险等客观困难, 而且面临模拟信号和数字信号直接对比的问题, 易导致电子式互感器稳态校验的效果差和准确性低, 为此, 提出了一种采用改进数字滤波算法的电子式互感器稳态校验方法。首先, 简述了电子式互感器的校验流程, 分析了传统电子式互感器稳态校验的不足; 其次, 详细阐述了改进的数字滤波算法, 并提出了改进的数字滤波算法电子式互感器稳态校验方法; 最后, 通过算例对所提稳态校验方法进行了验证, 以期对电子式互感器的大规模推广应用提供借鉴。

关键词:电子式互感器; 改进的数字滤波算法; 稳态校验方法; 标准源

中图分类号: TM452

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)02-0055-06

0 引言

电子式互感器是一种广泛应用于智能变电站的电参量测量装置, 也是一种模拟量输入、数字量输出的非传统互感器, 其采集信号通过合并单元提供给智能变电站的计量、保护和控制等进行应用。不仅担负着电网的精确计量, 也肩负故障监测等重要责任, 故在实际运行中对其进行离线式、在线式准确度校验是一种常态。在国家标准 GB/T20740.8—2007 电子式电压互感器^[1]和 GB/T20840.7—2007 电子式电流互感器^[2]中, 也明确规定了数字化变电站中电子式互感器校验的流程和标准, 以及准确检定的误差范围。但是遵照 IEC 60044 标准, 现有的以电磁式互感器作为标准源的电子式互感器校验方法, 直接用标准源生成的模拟信号经过 AD 转换后与被检测电子式互感器信号进行对比分析, 会因电磁干扰、标准源的准确度、模数采集卡的准确性、信号的不同步等多种不确定因素导致校验出现偏差, 有待深入研究和改善。

近年来国际国内的学者们对电子式互感器的校验进行了研究, 取得了一些成果。文献[3]提出了一种含电子式互感器校验仪的传变特性测试研究方案, 并分析光学装置、空心线圈和铁心线圈等3种不同类型的电子式电流互感器的误差特性; 文献[4]系统阐述了电子式互感器在数字化变电站中应

收稿日期: 2017-11-12; 修回日期: 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607055); 广东省绿色能源技术重点实验室项目(2008A060301002); 国家电网有限公司科技项目“面向电能贸易结算的电子式互感器计量运行态势多维度分析及风险评估研究”

用的原则以及需要比传统互感器增加的试验项目和试验方法, 并提出了数字化变电站的一种配置方案。另外, 一些国内同行从电子式互感器校验相关的信号处理方法^[5]、在线校验方法^[6]、数据采集方法^[7-8]、电磁干扰^[9]、数据校验方法^[10]等方面进行了一些研究。

本文针对传统电子式互感器校验过程中校验效果差和准确度低的问题, 通过多次采样数据, 结合中位值滤波法、算术平均滤波法、滑动平均滤波法等多种数字滤波方法的优点, 提出了一种采用改进数字滤波算法的电子式互感器稳态校验方法, 以期对电子式互感器的大规模推广应用提供技术支持和借鉴。

1 电子式互感器的校验方法

当前电子式互感器的准确度校验主要以传统方法为基础, 即以含铁心的传统电磁式互感器作为标准源。首先, 通过对铁心绕组抽头引线的方式实现对不同规格额定一次电压、电流的测量; 其次, 通过电子式互感器校验系统内部的 A/D 模数转换模块, 将模拟信号转换为数字信号; 再次, 将该数字信号与被测电子式互感器输出的数字信号对比; 最后, 采用差值法分析得出误差及相差数据, 从而实现电子式互感器的校验, 其框图如图 1 所示。

电磁式互感器由于其应用时间长、稳定性能较好等特点, 一般被选作电子式互感器的标准源, 但是以上的校验平台也存在以下几个突出的不足:

(1) 采用铁心式互感器作为标准互感器的校验方式, 存在铁磁谐振及铁磁饱和缺陷、增容困难、二

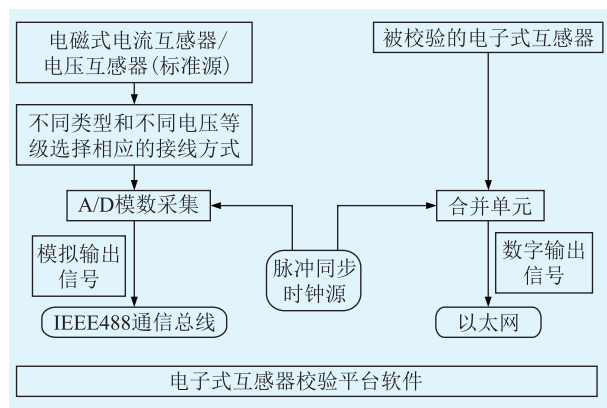


图1 电子式互感器的校验框图

Fig.1 Calibration chart of electronic transformers

次接线繁琐以及二次开路高压危险等问题,在实际的校验过程中,增加校验的操作流程难度和风险,从而导致电子式互感器快速、高效校验的效果差。

(2) 此种校验方法主要基于差值法原理,即将标准互感器的模拟输出信号与被校电子式互感器的数字输出做差,再对差值信号进行处理得到比差和角差,与标准互感器模拟输出相比,电子式互感器的数字输出是离散序列。因此,若将数字信号转换成模拟信号再用差值法将很难满足准确度要求。

(3) 由于数字输出电子式互感器的二次装置和一次侧存在延时现象,因此,将两路信号直接做差会引起较大偏差,进一步降低了校验的准确性。

为有效解决这些明显缺陷,拟在电子式互感器校验平台软件端采取一定的措施,即数字滤波算法,对校验进行修正。

2 改进的数字滤波校验方法

滤波技术是一种测量系统信号处理过程中对噪声分析和处理的技术,包括硬件滤波和软件滤波两种方式^[11]。其中,硬件滤波主要是指采用电阻、电容组成的RC滤波器或采用电感、电容组成的LC滤波器等模拟滤波器进行滤波的方式;软件滤波,即数字滤波,是指对所采集的输入数据,通过一定的计算或判断程序,从而减少、削弱噪声的影响。依据实际输入信号的不同,有多种不同的滤波方法,主要有限幅滤波法、中位值滤波法、算术平均滤波法、滑动平均滤波法,以及以上几种滤波法的混合使用等。

电子式互感器校验过程中,电磁干扰、标准源的准确度、模数采集卡的准确性、信号的不同步等均对校验结果有较大的影响^[12-15],但是本文所关注的重点是由数字信号和模拟信号种类不一致所引起重要的误差或者噪声,即标准源产生模拟信号,

而被校验对象是数字信号,为此在电子式互感器校验平台上,提出一种改进的数字滤波算法,对电子式互感器校验的准确性进行修正。

2.1 改进的数字滤波算法

改进的数字滤波算法流程如下:

步骤1:建立一个容纳 N 个数据的队列 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$;

步骤2:将采样数据输入队列,并判断队列是否已满;

步骤3:若队列未满,则将采样数据输出,并重复判断队列是否已满;

步骤4:若队列已满,先用冒泡法求取队列中的最大值 x_{\max} 和最小值 x_{\min} ,然后去除 x_{\max} 和 x_{\min} ,并求取剩余 $(N-2)$ 个数据的算术平均值 y ,如式(1)所示,将 y 输出,并重复判断队列是否已满。

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N x_i - x_{\max} - x_{\min}}{N - 2} \quad (1)$$

步骤5:对于已满的队列,按照先进先出原则,每次进来一个新数据的同时丢弃一个最“老”的数据,使整个队列始终保持固定长度 N 。且每当新输入一个数据后,先判断其是否为最大值 x_{\max} 或最小值 x_{\min} ,然后进行求取算术平均值 y_j , j 是采集数据的次数。

y_j 的计算按照先从输入的 N 个采样数据 x_i ($i=1, 2, \dots, N$)中去除最大值 x_{\max} 和最小值 x_{\min} ,然后按去除后的 $(N-2)$ 个采样数据,依据式(1)计算 y_j 。

按照以上方法进行10次采样,获得一组 $\{y_1, y_2, \dots, y_{10}\}$,然后对10个 y 值按照式(2)取算术平均值 y_{avg} ,作为本次采样值并输出。

$$y_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} y_i}{10} \quad (2)$$

2.2 改进的数字滤波校验流程

在电子式互感器校验平台应用过程中,为有效有序开展电子式互感器的校验和管理^[15-17],应用改进的数字滤波算法,根据电子式互感器校验的相位误差、电流误差、电压误差和A类不确定度等4个重要校验指标,在校验平台上制定相应的校验算法流程,如图2所示。

(1) 根据脉冲同步时钟信号,分别获取待测电子式互感器的数字信号和标准电磁式互感器所产生的模拟量转数字量系统的采样数据;

(2) 根据2.1节所述的改进数字滤波算法分别对所述待测电子式互感器和标准源的采样数据进

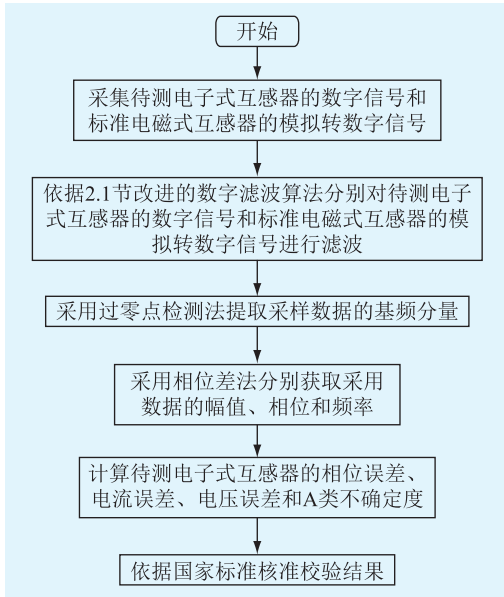


图2 改进的电子式互感器数字滤波校验流程

Fig.2 Improved digital filter check flow chart for electronic transformer

行数字滤波处理,并输出所述数字滤波处理数据;

(3) 采用过零点检测法分别提取采样数据的基频分量;

(4) 根据相位差法分别获取采样数据的幅值 A_m 、相位 φ_m 和频率 f ;

利用插值快速傅氏变换算法 (fast fourier transformation, FFT) 算法分别分析采集数据各次谐波的参数,如式(3)和式(4)所示:

$$|X_H(e^{j\omega})|_{\omega=k_m \frac{2\pi}{N}} = \left| W_H[k_m - (k_m + \delta_m)] \frac{2\pi}{N} \right| \approx \frac{A_m \sin(\pi\delta_m)}{2\pi\delta_m(1 - \delta_m)} \quad (3)$$

$$|X_H(e^{j\omega})|_{\omega=(k_m+1) \frac{2\pi}{N}} = \left| W_H[k_m + 1 - (k_m + \delta_m)] \frac{2\pi}{N} \right| \approx \frac{A_m \sin(\pi\delta_m)}{2\pi\delta_m(1 - \delta_m)(2 - \delta_m)} \quad (4)$$

可推得信号的幅值 A_m 、相位 φ_m 和频率 f 的值分别为:

$$A_m = \left| X_H(e^{j\omega}) \right|_{\omega=k_m \frac{2\pi}{N}} = \frac{2\pi\delta_m(1 - \delta_m^2)}{\sin(\pi\delta_m)} \quad (5)$$

$$\phi_m = |X_H(e^{j\omega})|_{\omega=k_m \frac{2\pi}{N}} - \frac{\delta_m \pi(N - 1)}{N} \quad (6)$$

$$f_m = \frac{m(k_1 + \delta_1)f_s}{N} \quad (7)$$

式中: m 为谐波次数; f_s 为采样频率; k_m 为谐波信号采样序列对应的离散频点; δ_m 为频谱偏离估计值,且

$0 \leq \delta_m \leq 1$; X_H 为采样点; W_H 为矩形窗。

(5) 根据式(5—7)所求的频率、相位和幅值计算待测电子式互感器的相位误差 φ_e 、电流误差 ε_i 、电压误差 ε_u 和 A 类不确定度 u_a , 如公式(8—10)所示。

$$\varphi_e = \varphi - (\varphi_{or} - 2\pi f T_{ldr}) \quad (8)$$

式中: φ 为待测电子式互感器的相位差; φ_{or} 为电子式互感器因技术产生的额定相位差; f 为频率; T_{ldr} 为数据处理和传输所需时间的额定值。

$$\varepsilon_i = \frac{K_{Cr} I_s - I_p}{I_p} \times 100\% \quad (9)$$

式中: K_{Cr} 为标准电流互感器的额定变比; I_p 为信号源电流; I_s 为测量条件下,待测电流互感器的实际二次电流。

$$\varepsilon_u = \frac{K_r U_s - U_p}{U_p} \times 100\% \quad (9)$$

式中: K_r 为标准电压互感器的额定电压比; U_p 为信号源电压; U_s 为测量条件下,待测电压互感器的实际二次电压。

$$U_a = S(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (11)$$

式中: U_a 是待测样本的校准值; x_k 为测量的电压/电流值; \bar{x} 为 k 次测量的平均值; $n-1$ 为自由度。

(6) 按 IEC 60044 原则,依据 GB/T 20840.7—2007 和 GB/T 20740.8—2007 校验标准,根据第 5 步的计算结果,核准电子式互感器的校验数据。

3 算例分析

选取天津市高新区 220 kV 智能变电站的某一国内知名品牌 3 台 0.5S 级电子式互感器作为案例进行分析,分别编号为电子式互感器 1 号,2 号和 3 号,其刚投入使用时的相位误差为 0.40,电流误差为 0.31,电压误差为 0.12, A 类不确定度为 0.05 (以上数据均为相对误差),3 台电子式互感器的投入运行时间分别为 2.4 a, 3.1 a 和 5.4 a。现分别将 3 台电子式互感器在电子式互感器校验平台进行检测,检测平台所选择配置有:电磁式互感器 0.2S 级作为标准源,40 M 采样频率的 A/D 模数采集卡,单脉冲异步的脉冲同步时钟器, CPU 主频为 3.7 GHz 的联想 Lenevo 主站平台,其检测结果见表 1。从表 1 中不难发现:

(1) 与刚投入运行时的原始数据对比可知,电子式互感器的投运时间越长,相位误差、电流误差、电压误差和 A 类不确定等偏差均相对较大。电子式互感器在实际运行过程中会产生一定的误差,且

表 1 电子式互感器的校验结果对比
Tab. 1 Comparison of calibration results of electronic transformers

项目	1号	2号	3号
相位误差	0.43	0.54	0.65
电流误差	0.32	0.42	0.51
电压误差	0.14	0.28	0.34
A类不确定度	0.07	0.13	0.21

与实际的工程运行情况,基本吻合。

(2) 检测过程中,采用单脉冲异步的同步时钟触发方式,确保了在同一时刻,分别获取模拟量转数字量系统和待测电子式互感器的数字输出信号,然后对数字输出信号直接进行频率、幅值和相位等比对,在数据处理方面大大降低了突发干扰的影响,校验的准确性高,不存在延时现象,一定程度上确保了电子式互感器校验的效果和准确性。

(3) 3个电子式互感器4个检测指标的误差均相对较小,其主要原因是所选用的标准源是0.2S级电磁式互感器,而被校验的电子式互感器为0.5S级,这与检测标准中所规定的标准源必须高于被检测样品2个数量级的规定有一定的差距,后续有待提高电磁式互感器的级别。

为对比分析改进的数字滤波方法有效性,在同一检测平台上,选取投运时间相对较久的3号电子互感器为样本,进行算术平均数字滤波法和改进的数字滤波法对比分析,其结果如表2和表3所示。

表 2 校验结果对比
Tab. 2 Comparison of calibration results

项目	改进的数字滤波算法	算术平均数字滤波法
相位误差	0.65	0.74
电流误差	0.51	0.68
电压误差	0.34	0.59
A类不确定度	0.21	0.38

表 3 运算时间对比
Tab. 3 Comparison of operation time s

项目	改进的数字滤波算法	算术平均数字滤波法
相位误差运算时间	22.9	15.2
电流误差运算时间	26.1	16.3
电压误差运算时间	28.5	17.3
A类不确定度运算时间	23.4	17.9

基于以上案例的小样本,从表2和表3可知:

(1) 改进的数字滤波算法与算术平均数字滤波算法相比,在相位误差、电流误差、电压误差和A类不确定等偏差均相对较小,其主要原因是多次采样

获得数据进行计算,有效规避了数据的采样误差,且与实际的运行数据情况吻合度较高。

(2) 通常校验标准源的输入信号除了含有基波分量外,还含有高次谐波分量及白噪声等。干扰量的来源一般也有两个方面,其一是电力系统的高次谐波,另一个是环境的电磁干扰和噪声干扰。因此,校验系统设计抗干扰措施主要包括部分环节屏蔽、系统接地、采集回路设计低通滤波器等硬件的抗干扰措施,而本文提出了一种对采样数据进行数字滤波处理的电子式互感器校验方法,有利于提高电子式互感器的校验精度。

(3) 本文所提出的改进数字滤波算法是在滑动平均值滤波算法、算术平均值滤波法以及防脉冲干扰平均滤波法的基础上进行了改进,相比于单纯的算术平均数字滤波算法,会更加适用于多次数据采集的计算。

4 结语

本文所提基于改进数字滤波算法的电子式互感器稳态校验方法,能够确保在同一时刻,分别获取模拟量转数字量系统和待测电子式互感器的数字输出信号,然后对数字输出信号直接进行频率、幅值和相位的比对,大大提高了电子式互感器校验系统的准确性;同时也需要进行多次数据采集,增加了一定的采用时间成本。

文中所提的改进数字滤波算法,是滑动平均值滤波算法、算术平均值滤波法以及防脉冲干扰平均滤波法等多种数字滤波的混合使用,在数据处理方面大大降低了突发干扰的影响,提高了电子式互感器校验的准确性。

参考文献:

- [1] GB/T 20740.8—2007 电子式电流互感器[S]. GB/T 20740.8—2007 Electronic current transformer[S].
- [2] GB/T 20840.7—2007 电子式电压互感器[S]. GB/T 20840.7—2007 Electronic current transformer[S].
- [3] 谢琼香,何瑞文,蔡泽祥,等. 3种电子式电流互感器的传变特性分析与比较[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 18-22. XIE Qiongxian, HE Ruiwen, CAI Zexiang, et al. Characteristics analysis and comparison of three types of electronics current transformers [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2014, 26(5): 18-22.
- [4] 刘孝先,曾清,邹晓莉,等. 电子式互感器的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 133-137. LIU Xiaoxian, ZENG Qing, ZOU Xiaoli, et al. Application of electronic transformer [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2010, 22(1): 133-137.

- [5] 张其林, 赵永标. 一种电子式电流互感器信号畸变识别方法与应用[J]. 湖北文理学院学报, 2016, 37(2): 22-27.
ZHANG Qilin, ZHAO Yongbiao. Recognition of electronic current transformer's signal distortion and its application [J]. Journal of Hubei University of Arts and Science, 2016, 37(2): 22-27.
- [6] 王佳颖, 刘忠战, 冯利民, 等. 电子式互感器在线校验技术研究[J]. 智能电网, 2017, 5(6): 584-589.
WANG Jiaying, LIU Zhongzhan, FENG Liming, et al. Research on the online calibration technology for electronic transformers[J]. Smart Grid, 2017, 5(6): 584-589.
- [7] 陈 勇, 李 聪, 刘升鹏. 电子式互感器高频数据采集与传输方案[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(3): 205-208.
CHENG Yong, LI Cong, LIU Shengpeng. A design scheme of electronic transformer high frequency signal acquisition and transmission[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(3): 205-208.
- [8] 张明珠, 李开成, 李振兴, 等. 基于高精度采集卡的电子式互感器校验系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 114-118.
ZHANG Mingzhu, LI Kaicheng, LI Zhenxing, et al. Design of calibration technology of electronic transformers based on high-precision acquisition card [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 114-118.
- [9] 冯利民, 王晓波, 吴联梓, 等. 500 kV GIS 变电站 VFTO 对于电子式互感器的电测骚扰研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 85-90.
FENG Limin, WANG Xiaobo, WU Lianzi, et al. Study on impact of VFTO electromagnetic interference on electronic transformer in 500 kV GIS substation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 85-90.
- [10] 杨慧霞, 郭 伟, 邓迎君. 几种电子式互感器校验方式的研究和比较[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 99-101.
YANG Huixia, GUO Wei, DENG Yingjun. Study and comparison on several different electronic transformer calibration methods[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 99-101.
- [11] 赵毅强, 李 旭, 赵公元, 等. 一种可配置数字滤波器设计及其 ASIC 实现[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 990-995.
ZHAO Yiqiang, LI Xu, ZHAO Gongyuan, et al. Design of configurable digital filter and its ASIC implementation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(4): 990-995.
- [12] 邓 威, 毛 娟. 智能变电站电子式互感器故障分析及建议[J]. 中国电力, 2016, 49(2): 180-184.
DENG Wei, MAO Juan. Analysis and proposition for malfunction of electronic transformer in intelligent substation[J]. Electric Power, 2016, 49(2): 180-184.
- [13] 樊 陈, 倪益民, 耿明志, 等. 智能变电站合并单元技术规范修订解读[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 1-5, 75.
FAN Chen, NI Yimin, GENG Mingzhi, et al. Interpretation of technical specification revision of merging unit in smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 1-5, 75.
- [14] 邹三红, 徐强超, 邝国安, 等. 智能变电站合并单元关键参数测试[J]. 广东电力, 2017, 30(5): 124-127.
ZOU Sanhong, XU Qiangchao, KUANG Guo'an, et al. Testing on key parameters of intelligent substation merging unit [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5): 124-127.
- [15] 田 斌, 鲍 刚, 李振华, 等. 电子式互感器电磁干扰及其关键技术现状研究[J]. 变压器, 2017, 54(6): 30-35.
TIAN Bin, BAO Gang, LI Zhenhua, et al. Research on electromagnetic interference and its key technical situation of electronic instrument transformer[J]. Transformer, 2017, 54(6): 30-35.
- [16] 葛磊蛟, 王守相, 王 尧, 等. 多源异构的智能配用电数据存储处理技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(s2): 159-168.
GE Leijiao, WANG Shouxiang, WANG Yao, et al. Storage and processing technology of the multi-source isomerized data for smart power distribution and utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(s2): 159-168.
- [17] 张雁秋, 魏 伟, 李红斌. 基于 Lagrange 插值频率估计的数字电能计量算法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(5): 80-84.
ZHANG Yanqiu, WEI Wei, LI Hongbin. Digital power metering algorithm based on Lagrange interpolation frequency estimation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(5): 80-84.
- [18] 易 斌, 潘 峰, 林国营, 等. 电子式互感器校验技术综述[J]. 广东电力, 2016, 29(2): 1-8.
YI Bin, PAN Feng, LIN Guoying, et al. Summary on calibration technology for electronic transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(2): 1-8.

作者简介:



顾 强

顾 强(1963—),男,本科,高级工程师,从事电力计量技术和管理研究工作(E-mail: qiang.gu@tj.sgcc.com.cn);

刘浩武(1994—),男,硕士研究生,研究方向为智能配用电(E-mail: liuhaowu@tju.edu.cn);

徐晓萌(1982—),女,本科,工程师,从事电网规划计划管理研究工作。

A Steady-state Calibration Method of Electronic Transformer Based on Improved Digital Filter Algorithm

GU Qiang¹, LIU Haowu^{1,2}, XU Xiaomeng³, LI Xiaohui¹, CHEN Bin¹, GE Leijiao²

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company Research Institute, Tianjin 300384, China;

2. School of Electrical Information and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300055, China)

Abstract: The traditional calibration method of electronic transformer usually uses the electromagnetic transformer as the standard source. This method is easy to cause low efficiency and low accuracy of the calibration of electronic transformer, due to the problems of the electromagnetic transformer, which including ferromagnetic resonance, magnetic saturation, difficulties of increasing capacity, complicated two wire connection and the hazard of two open circuit high voltage. And this method faces the problem of direct contrast between analog signals and digital signals. Therefore, a steady-state calibration method of electronic transformer based on the improved digital filtering algorithm is proposed. First of all, the calibration process of electronic transformer is introduced, and this paper analyzes the shortcomings of traditional calibration method of the electronic transformer. Secondly, the paper describes the improved digital filtering algorithm in detail, and proposes a steady-state calibration method of electronic transformer based on the improved digital filter algorithm. Finally, a case verifies the feasibility of the proposed steady-state calibration method, and provides the reference for the large-scale popularization of electronic transformers.

Key words: electronic transformer; improved digital filter algorithm; steady-state calibration method; standard source

(编辑 方 晶)

(上接第 48 页)

Current Distribution and Junction Temperature Calculation of Protective Thyristor for MMC Valve

ZHU Minglian, JIANG Tiangui, OUYANG Youpeng, XIE Yeyuan

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Aiming at the fault of pole-to-pole situation in the DC side of MMC, the fault current circuit of the MMC is established and the current distribution and junction temperature calculation of the diode and protective thyristor in the MMC are given for evaluating bipolar DC short circuit fault tolerance. The model and simulation of the fault current loop of the MMC is carried out under MATLAB/Simulink, and the experiment is carried out in the MMC back-to-back test system. Simulation and experimental results show that the proposed method is accurate and effective. The proposed method has important theoretical significance for checking the tolerance of pole-to-pole short-circuit fault and device selection in practical engineering in MMC.

Key words: modular multilevel voltage sourced converter; DC bipolar short circuit; fault tolerance

(编辑 钱 悦)