

电容式电压互感器铁磁谐振试验测控装置

宋守龙, 廖斌, 顾凤彪

(桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 电容式电压互感器的铁磁谐振试验, 需要对试验波形进行分析处理, 人工处理比较繁琐, 耗时较长。针对这一问题, 本文介绍了一种电容式电压互感器铁磁谐振试验测控装置, 可对短路开关进行控制, 自动采集和分析试验波形, 自动存储试验结果和波形数据。将该装置用于实际电容式电压互感器进行铁磁谐振试验中, 结果显示, 测控装置比人工处理波形省去了人工处理波形的时间, 提高了工作效率。

关键词: 电容式电压互感器; 铁磁谐振试验; 测控装置

Measurement and Control Device for Ferro-resonance Test of Capacitor Voltage Transformer

SONG Shoulong, LIAO Bin, GU Fengbiao

(Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: The ferro-resonance test of capacitor voltage transformers requires analysis and processing of the test waveform, which is cumbersome and time-consuming to manually process. In view of this issue, a kind of measurement and control device for ferro-resonance testing of capacitor voltage transformers is introduced in this paper, which can control the short-circuit switch, automatically collect and analyze test waveform, automatically save test results and test waveform. The device is used in the actual capacitor voltage transformer for the ferro-resonance test. The result shows the measurement and control device, compared to the manually processed waveform, saves time of manual waveform processing and improves work efficiency.

Keywords: capacitor voltage transformer; ferro-resonance test; measuring and control device

0 引言

电容式电压互感器由电容器和非线性电感元件组成^[1-2], 开关操作时一次或二次端子上的暂态现象会引起电容式电压互感器发生铁磁谐振^[3-12]。为了抑制铁磁谐振一般在其二次绕组接入阻尼装置^[2, 13-15]。若阻尼装置参数选择不当或阻尼装置出现故障, 电容式电压互感器被激发的铁磁谐振将维持较长时间甚至出现持续谐振。较长时间的铁磁谐振会导致继电保护误动作; 持续的铁磁谐振可能造成电容式电压互感器损坏, 危及电网的安全运行^[16-19]。因此, 电容式电压互感器相关标准的例行试验和型式试验中均规定要进行铁磁谐振试验, 要求将电容式电压互感器的二次绕组短路不少于 0.1 s, 然后消除短路, 电容式电压互感器的铁磁谐振振荡时间应不超过 0.5 s ($0.8U_r \sim 1.2U_r$) 或 2 s ($1.5U_r$)^[3, 20]; 型式试验还要求在 $0.8U_r$ 、 $1.2U_r$ 、 $1.5U_r$ (或 $1.9U_r$) 下各

试验 10 次, $1.0U_r$ 下试验 10 次^[3, 20]或 30 次^[21]。

铁磁谐振试验一般采用数字示波器采集电容式电压互感器的一次电压、二次电压和二次电流的波形, 然后利用数字示波器的水平光标和垂直光标在示波器的显示屏上测量波形的幅值和时间, 得到试验电压、短路时间、谐振时间、短路时的一次电压变化率等试验结果。由于试验次数较多, 这种人工测量方法十分繁琐、耗时较长, 试验效率低下^[22-27]。为了提高试验工作效率, 研制了一种电容式电压互感器铁磁谐振试验测控装置, 实现了短路开关的自动控制、波形数据的自动采集和存储、波形数据自动分析处理, 实时输出试验结果。

1 总体方案

铁磁谐振试验测控装置 (以下简称测控装置) 由测控单元和计算机两部分组成, 两者之间通过 USB 数据线连接。

铁磁谐振试验的电气原理图见图 1。一次电压经电容分压器降压后输送到测控单元的模拟信号输入端,二次电压通过 10×衰减探头输送到测控单元的模拟信号输入端,二次电流由电流互感器及其取样电阻转换为电压信号后输送到测控单元的模拟信号输入端。交流接触器的触头通过两根粗短

的绝缘导线与二次绕组端子连接,交流接触器的线圈与测控单元的控制接口连接。

测控单元在计算机及测控软件的操控下,控制交流接触器触头的通断,同时采集一次电压、二次电压及二次电流的波形。测控软件对采集的波形数据进行分析处理,得到铁磁谐振试验的试验结果。

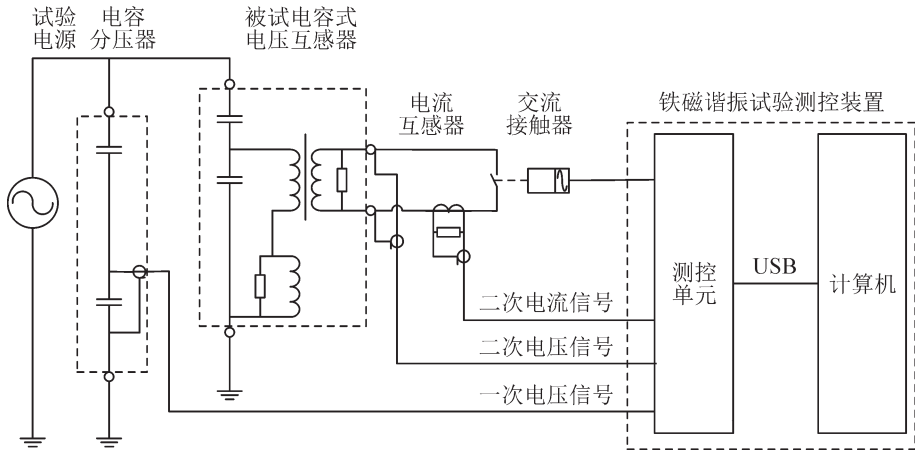


图 1 铁磁谐振试验的电气原理图
Fig. 1 Electrical principle diagram of ferromagnetic resonance test

2 硬件设计

测控单元需要控制交流接触器触头的通断并采集一次电压、二次电压及二次电流的波形数据,因此,其核心器件采用数据采集卡。测控单元的原理方框图见图 2。测控单元包括数据采集卡、信号调理模块、隔离放大器、光电隔离模块、开关驱动模块以及电源模块 1、电源模块 2。

有 4 路差分模拟输入通道、电压输入范围为±10 V、ADC 分辨率 16 位、最大采样率 50 kS/s,用于模拟信号波形采集^[28]。

NI USB-6002 还具有 13 个数字输入输出端,可由用户定义为输入或输出,其中的 PFI0、PFI1 可作为数字触发输入端。数字输入输出端用于波形采集的触发和短路开关的控制。

NI USB-6002 还提供了+5 V、150 mA 直流电源输出,可为外围电路提供工作电源。

NI USB-6002 通过 USB 数据线与计算机连接,并由 USB 接口提供工作电源。

2.2 隔离放大器及光电隔离模块

隔离放大器及光电隔离模块的主要作用是将数据采集卡与试验主回路进行电气隔离,提高测控单元的抗电冲击能力,避免试品异常放电产生的过电压对数据采集卡造成损坏。

隔离放大器用于隔离模拟输入信号,其输入侧与输出侧的绝缘电压为 1 500 Vrms,输入侧和输出侧分别由两个相互绝缘的电源模块提供工作电源;隔离放大器的放大倍数为 1,非线性度为 0.01%^[29]。

光电隔离模块用于隔离数字信号,其核心元件为光电耦合器,绝缘电压为 5 000 Vrms^[30]。

2.3 开关驱动模块

开关驱动模块将数据采集卡输出的开关控制信号转换为可以控制交流接触器的控制电压。

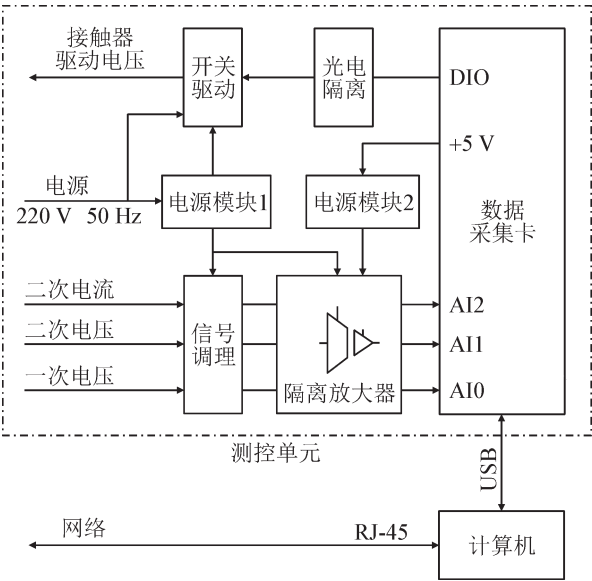


图 2 测控单元原理方框图
Fig. 2 Block diagram of measurement and control unit principle

2.1 数据采集卡

数据采集卡采用 NI USB-6002,NI USB-6002 具

2.4 信号调理模块

信号调理模块的作用是将模拟电压输入信号的幅值调整到数据采集卡可接受的范围内。他包括电压衰减电路和电压跟随器,电压衰减电路将输入的电压信号按比例降低到数据采集卡输入电压范围内,电压跟随器用来减小隔离放大器输入阻抗对电压衰减电路的影响。

2.5 电源模块

电源模块包括电源模块 1 和电源模块 2。
电源模块 1 将 220 V、50 Hz 交流电源转变为 +5 V 和±15 V 的直流电源,+5 V 电源为开关驱动模块提供工作电源,±15 V 电源为信号调理模块和隔离放大器的输入侧提供工作电源。

电源模块 2 将数据采集卡输出的+5 V 电源转换为±15 V 电源,为隔离放大器的输出侧提供工作电源。

3 软件设计

测控软件需要完成开关控制、数据采集、数据分析、波形及数据存储等基本功能以及其他辅助功能。测控软件的开发工具采用图形化软件开发环境 Labview2021 专业版,Labview 广泛应用于仿真、数据采集、仪器控制、测量分析和数据显示等应用系统的开发^[31]。

设计完成的测控软件操作界面及试验数据见图 3。

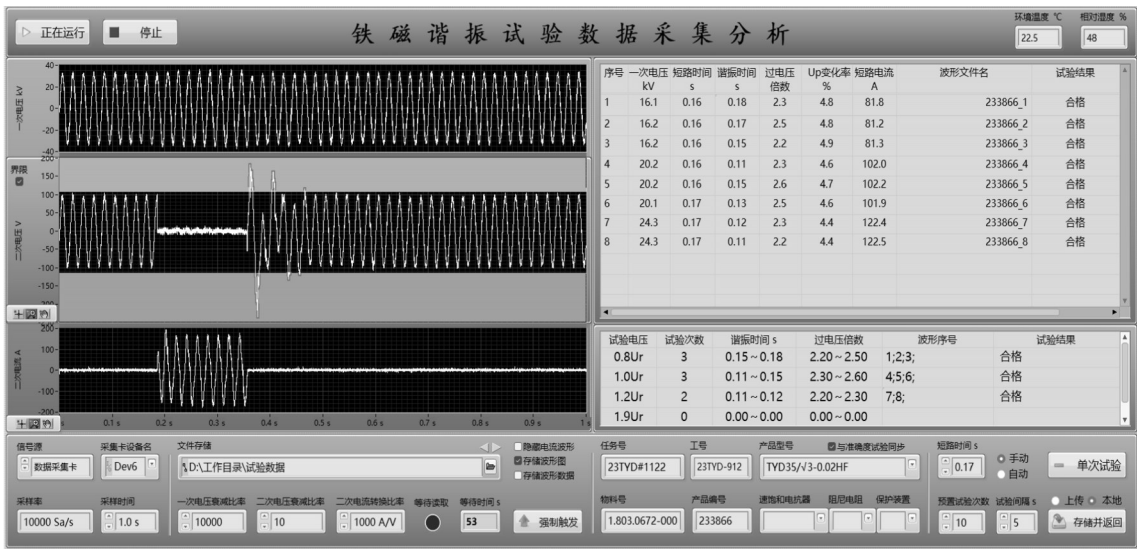


图3 测控软件操作界面
Fig. 3 Operation interface of measurement and control software

3.1 数据采集模块

数据采集模块需要对数据采集卡初始化、设置相关参数,然后从数据采集卡中读取波形数据,因此数据采集模块包括 DAQ 配置、读数据、清除任务等子程序,数据采集模块的程序框图见图 4。

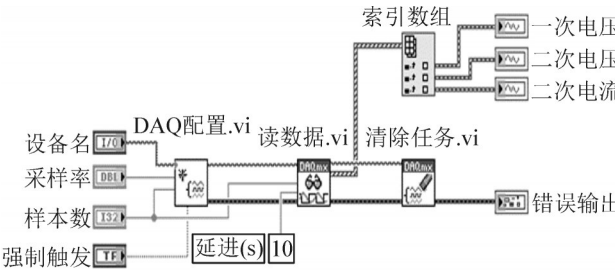


图4 数据采集模块程序框图
Fig. 4 Program block diagram of data acquisition module

DAQ 配置.vi 对数据采集卡的模拟输入通道进行初始化,设置采样率、样本数、触发方式等参数;

读数据.vi 从数据采集卡中读取波形数据,三路波形数据以数组方式输出;清除任务.vi 在完成数据读取后停止采集任务并释放占用的资源。

索引数组函数将读取的波形数据分解为一次电压、二次电压及二次电流波形数据。

3.2 数据分析模块

数据分析模块对数据采集模块输出的三路波形数据进行分析处理,得到所需的试验结果。数据分析模块包括短路位置索引、一次电压测量、谐振时间测量、过电压检测、二次电流测量等子程序。数据分析模块的程序框图见图 5。

子程序短路位置索引.vi 对二次电压波形数据进行分析处理,得到短路开始点的索引和短路点数,并计算输出短路时间。

子程序一次电压测量、谐振时间测量、过电压检测、二次电流测量根据短路开始点的索引和短路

点数,分别对一次电压波形数据、二次电压波形数据和二次电流波形数据进行分析处理,得到一次电压均方根值、短路时的一次电压变化率、短路时间、谐振时间、过电压倍数、二次电流均方根值等试验结果数据。

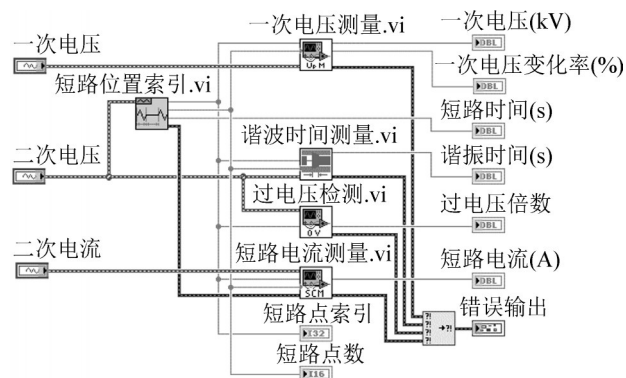


图5 数据分析模块程序框图

Fig. 5 Program block diagram of data analysis module

3.3 开关控制模块

开关控制模块需要为模拟信号的采集提供触发信号、控制短路开关的接通和关断、控制短路时间的长短。他包括数字端口配置子程序和数字端口数据写入子程序,程序框图见图6。

数字端口输出配置子程序 DPOUT 配置.vi 对数据采集卡的数字端口初始化、配置端口的数据方向。3 个数据写入子程序 DAQmx Write.vi 放置在顺序结构框内,第 1 个子程序输出数据采集的触发信号,第 2 个子程序输出开关导通信号并保持设定的短路时间,第 3 个子程序清除开关导通信号使开关关断。

开关控制模块置于两重嵌套的条件结构框内。选择手动控制时,按一次试验按钮,开关控制模块执行一次。选择自动控制时,按下试验按钮,程序根据设置的试验次数、试验间隔和短路时间连续执行开关控制模块,直到试验次数完成。

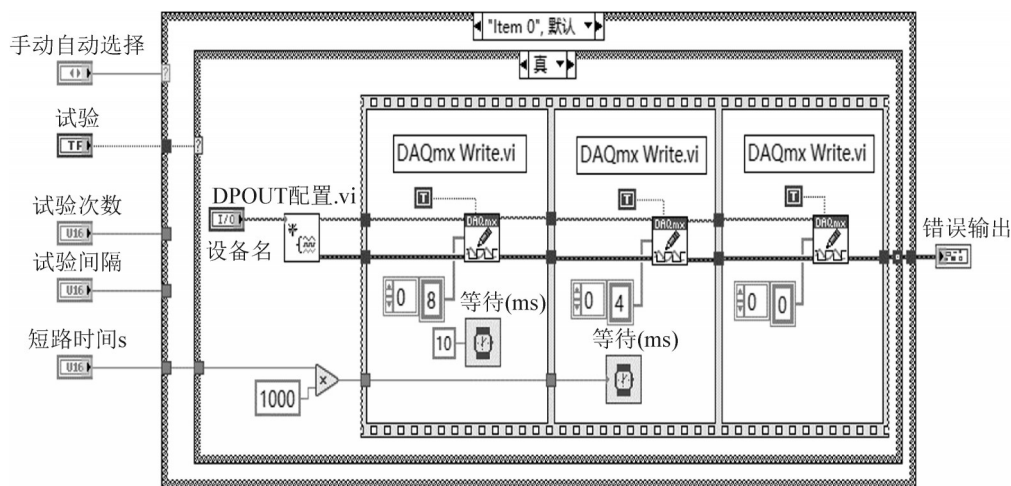


图6 开关控制模块程序框图

Fig. 6 Program block diagram of switch control module

3.4 数据存储模块

数据存储模块主要完成波形图像文件存储、波形数据文件存储、试验结果数据存储或向数据库上传试验结果数据。程序框图见图7。

根据设置的文件存储目录和预定的文件名创建各存储文件的路径。通过波形图控件的调用节点 Get Image 获取波形的图像数据,子程序 Write JPEG File.vi 将图像数据写入 JPEG 格式的图像文件;子程序写入测量文件.vi 将波形数据写入 LVM 格式的波形数据文件;子程序 Write Delimited Spreadsheet.vi 将试验结果数据写入 CSV 格式的数据文件。子程序互连接口.vi 可向数据库上传试验结果数据。

4 实际应用

采用该测控装置对一台 765 kV 电容式电压互感器进行铁磁谐振试验,在 $0.8U_r$ 电压下试验 10 次、 $1.0U_r$ 电压下试验 30 次、 $1.2U_r$ 电压下试验 10 次,每次试验间隔 10 s; $1.5U_r$ 电压下试验 10 次,每次试验后将试验电压降到 $1.2U_r$,试验时再升到 $1.5U_r$ 电压,每次试验间隔 60 s;如此操作的原因是此型号的电容器电压互感器在 $1.5U_r$ 电压下只能运行 30 s。测控装置自动存储的试验波形见图 8($0.8U_r$ 电压),自动存储的 60 次试验的试验记录及统计数据见图 9,为了减小图片尺寸,每个试验电压下的试验数据只保留了第 1 次和最后一次的数据,中间数据作了隐藏处理。

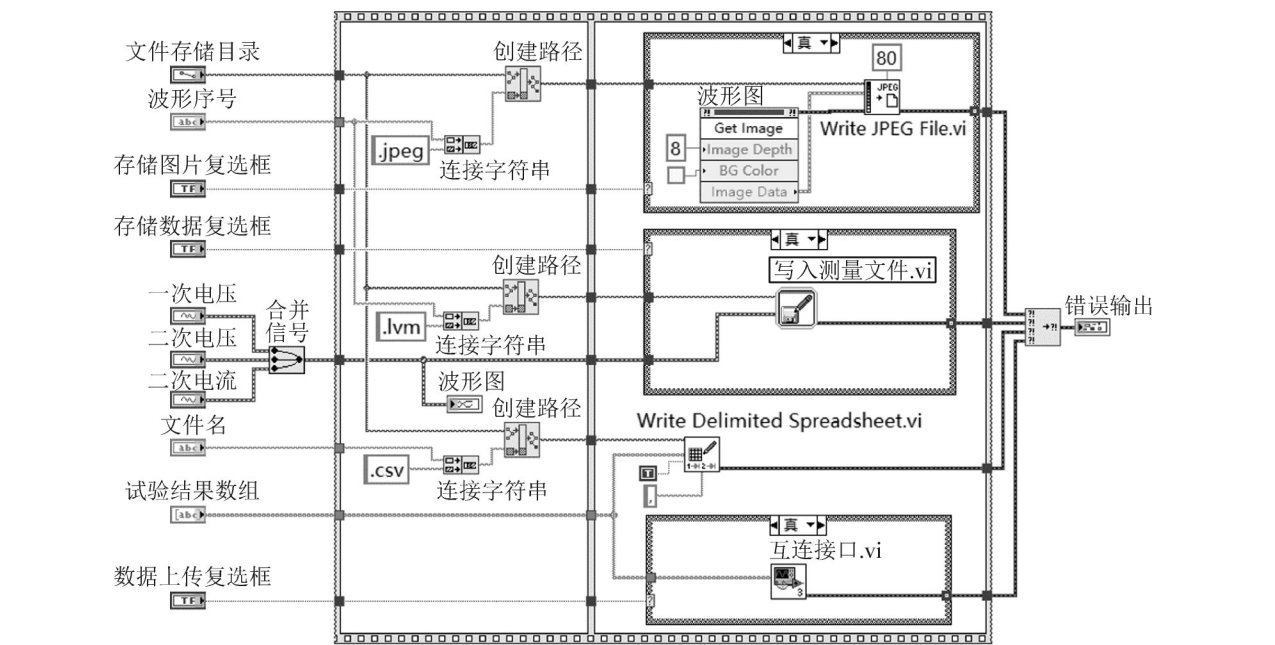


图7 数据存储模块程序框图
Fig. 7 Program block diagram of data storage module

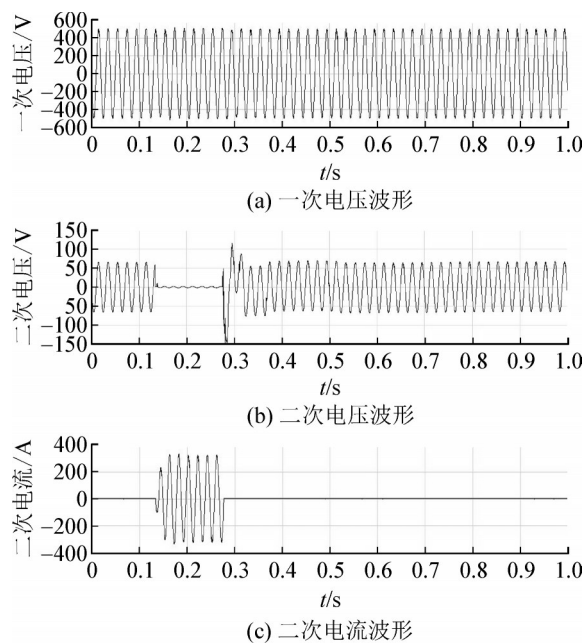


图8 测控装置存储的波形图
Fig. 8 Waveform saved in the measurement and control device

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	TYD765/√3-0.005H铁磁谐振试验数据							
2	序号	一次电压 kV	短路时间 s	谐振时间 s	一次电压变化率 %	短路电流 A	波形 文件名	试验结果
3	1	355	0.13	0.12	1.8	226	0.8Ur_1	合格
12	10	354	0.14	0.09	1.8	226	0.8Ur_10	合格
13	11	442	0.13	0.10	2.2	279	1.0Ur_11	合格
42	40	446	0.13	0.07	2.2	280	1.0Ur_40	合格
43	41	528	0.13	0.13	2.3	330	1.2Ur_41	合格
52	50	530	0.14	0.13	2.2	332	1.2Ur_50	合格
53	51	662	0.14	0.11	2.0	412	1.5Ur_51	合格
62	60	662	0.13	0.04	2.1	415	1.5Ur_60	合格
63	试验电压	试验次数	谐振时间 s	波形序号	试验结果			
64	0.8Ur	10	0.04 ~ 0.20	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	合格			
65	1.0Ur	30	0.07 ~ 0.10	11,12,13,14,15; ...;37,38,39,40	合格			
66	1.2Ur	10	0.07 ~ 0.13	41,42,43,44,45,46,47,48,49,50	合格			
67	1.5Ur	10	0.04 ~ 0.11	51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	合格			

图9 测控装置存储的试验数据表
Fig. 9 Test data table saved in the measurement and control device

作为对比,在 $0.8U_r$ 电压下,采用数字示波器采集试验电压波形及人工处理波形的方法再次试验了10次,并记录升压及人工处理波形所用的时间。人工处理波形的工作包括利用示波器的光标测量短路时间、谐振时间以及存储试验波形、记录试验数据,一次电压变化率因目测远小于标准限值10%而未进行测量,短路电流因标准未作要求而未进行测量。试验电压从0升至 $0.8U_r$ 用时30 s,试验10次用时550 s,平均每次55 s;由此推测 $1.0U_r$ 电压下试验30次用时27.5 min, $1.2U_r$ 电压下试验10次用时9.2 min, $1.5U_r$ 电压下试验10次(每次间隔60 s)用时15 min;试品叠装及试验接线等试验准备工作用时约40 min,拆卸试品、拆除接线等现场清理工作用时约30 min。两种测试方法所用时间见表1。

表1 两种测试方法所用时间
Table 1 Time taken for two testing methods

测试方法	试验准备 现场清理/ min	试验时间/min				合计/ min	提高 效率/%
		0.8Ur	1.0Ur	1.2Ur	1.5Ur		
人工处理	70	9.7	27.5	9.2	15	131.4	—
测控装置	70	2.0	5.0	1.5	14	92.5	42

由于765 kV电容式电压互感器由4节电容分压器组成,叠装和拆卸用时较长,试验准备及现场清理时间长达70 min,对110 kV电压等级以下的电容式电压互感器,试验准备及现场清理时间可缩短

至 20 min 左右,则测控装置比人工处理波形提高效率 90% 以上。

5 结语

电容式电压互感器铁磁谐振试验测控装置,实现了铁磁谐振试验短路开关的自动控制,实现了试验波形的自动采集、自动分析和数据自动存储,相比采用数字示波器采集波形及人工测量的方法,提高了铁磁谐振试验的工作效率。

参考文献

- [1] 李红斌,刘延冰,叶国雄,等. 电容式电压互感器铁磁谐振的数值仿真[J]. 高电压技术,1998,40(2):124-128.
LI Hongbin, LIU Yanbing, YE Guoxiong, et al. Numerical simulation on ferromagnetic resonances of capacitive voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 1998, 40(2): 124-128.
- [2] 朱鸿吉,侯成革,李洪臣. 电容式电压互感器铁磁谐振产生机理及其抑制方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(2):43-46.
ZHU Hongji, HOU Chengge, LI Hongchen. Production mechanism of ferro-resonance of capacitor voltage transformer and its suppression method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(2): 43-46.
- [3] 互感器 第5部分:电容式电压互感器的补充技术要求: GB/T 20840. 5—2013[S]. 2013.
Instrument transformers—Part 5: Additional requirements for capacitor voltage transformers: GB/T 20840. 5—2013[S]. 2013.
- [4] 郭天兴. 电力电容器技术及其应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2020.
- [5] 李应宏,王贵山,何学敏. 谐振机理在 CVT 故障中的影响分析及防护措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(1):82-86.
LI Yinghong, WANG Guishan, HE Xuemin. Influence analysis of resonance mechanism in capacitor voltage transformer fault and protective measures[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 82-86.
- [6] 黄治国,雷红才,苗青,等. 电容式电压互感器分频谐振的分析与对策[J]. 高电压技术,2004,30(7):58-59.
HUANG Zhiguo, LEI Hongcai, MIAO Qing, et al. Frequency dividing resonance and countermeasure of capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 58-59.
- [7] 黄放辉. 电容式电压互感器铁磁谐振及抑制[J]. 湖南电力,2001,21(2):51-53.
HUANG Fanghui. The Iron magnetism harmonic vibration of the voltage transformer of capacitance pattern and its restraining method[J]. Hunan Electric Power, 2001, 21(2): 51-53.
- [8] 张玲,郝春娟. 电压互感器铁磁谐振过电压及防止[J]. 电力自动化设备,2000,20(3):29-31.
ZHANG Ling, HAO Chunjuan. Ferroresonance over-voltage on power transformer and its prevention[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(3): 29-31.
- [9] 郭亮,李哲,李骁,等. 雷电过电压引发电容式电压互感器铁磁谐振特性分析与防护研究[J]. 电瓷避雷器,2019(6):147-151.
GUO Liang, LI Zhe, LI Xiao, et al. Analysis and prevention research of ferroresonance in capacitor voltage transformer caused by lightning overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 147-151.
- [10] 康忠健,姚玉洁,钟高文. 基于自适应扫频的配电网谐波谐振模态分析法[J]. 电网与清洁能源,2018,34(12):1-5.
KANG Zhongjian, YAO Yujie, ZHONG Gaowen. Harmonic resonance modal analysis method of distribution network based on adaptive sweep[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 1-5.
- [11] 文艺,陈少卿. CVT 暂态过电压响应研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(1):45-50.
WEN Yi, CHEN Shaoqing. Study on transient overvoltage response of CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(1): 45-50.
- [12] 肖嵘,赵丹丹,张嘉旻,等. 基于改进 CVT 的暂态电压扰动监测技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2023,44(5):58-66.
XIAO Rong, ZHAO Dandan, ZHANG Jiamin, et al. Study on transient voltage disturbance monitoring technology based on improved CVT[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 58-66.
- [13] 王德忠,王季梅. 电容式电压互感器速饱和电抗型阻尼器的研究[J]. 电工技术学报,2000,15(1):41-46.
WANG Dezhong, WANG Jimei. A study of the protective device with inductor in series resistance for capacitor voltage transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(1): 41-46.
- [14] 刘爱民,谷劲松. 电容式电压互感器中阻尼器的研究[J]. 电力电容器,2006,27(6):39-40.
LIU Aimin, GU Jinsong. A study of the protective device with inductor in series resistance for capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor, 2006, 27(6): 39-40.
- [15] 王治生. CVT 的新型阻尼装置[J]. 电力电容器,2007,28(6):23-25.
WANG Zhisheng. New damper installation of CVT[J]. Power Capacitor, 2007, 28(6): 23-25.
- [16] 邓万婷. 某 500 kV 线路电容式电压互感器二次回路铁磁谐振分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(1):

- 63-65.
DENG Wanting. Secondary circuits ferro resonance analysis of 500 kV line capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 63-65.
- [17] 申永红, 鄧嘯. 一起 110 kV 电容式电压互感器谐振故障原因分析[J]. 青海电力, 2008, 27(2): 48-49.
SHEN Yonghong, ZHI Xiao. A resonance fault analysis of 110 kV capacitive voltage transformer[J]. Qinghai Electric Power, 2008, 27(2): 48-49.
- [18] 王贵山, 李应宏. 一起 220 kV CVT 的铁磁谐振故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(1): 37-41.
WANG Guishan, LI Yinghong. Fault analysis on ferromagnetic resonance of 220 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1): 37-41.
- [19] 李山, 金铭, 杨定乾, 等. 某智能变电站 220 kV CVT 分频谐振分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 93-97.
LI Shan, JIN Ming, YANG Dingqian, et al. Frequency resonance analysis for 220 kV CVT at certain intelligent substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(5): 93-97.
- [20] Instrument transformers—Part 5: Additional requirements for capacitor voltage transformers: IEC 61869—5: 2011[S]. 2011.
- [21] 1 000 kV 交流系统用电容式电压互感器技术规范: GB/T 24841. 5—2022[S]. 2022.
Technical specification for capacitor voltage transformer of 1 000 kV AC system: GB/T 24841. 5—2022[S]. 2022.
- [22] 姚创, 魏菊芳, 于顺智, 等. 基于流敏电阻的电磁式电压互感器高压侧消谐技术研究[J]. 广东电力, 2023, 36(12): 97-105.
YAO Chuang, WEI Jufang, YU Shunzhi, et al. Research on harmonic elimination technology at high voltage terminal of inductive voltage transformer based on current dependent resistor[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(12): 97-105.
- [23] 朱保军, 咸日常, 刘兴华, 等. 35 kV PT 爆炸事故及其谐振过电压分析和预防[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 185-190.
ZHU Baojun, XIAN Richang, LIU Xinghua, et al. Explosion accident analysis and prevention of resonance overvoltage of 35 kV potential transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 185-190.
- [24] 汪本进, 王睿晗, 吴士普, 等. 特高压直流电压互感器换热结构设计及其对误差特性的影响研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 84-92.
- WANG Benjin, WANG Ruihan, WU Shipu, et al. Research on the heat exchange structure designing for UHV DCVT and its influence on error characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 84-92.
- [25] 张超, 丁心志, 王宾. 基于时域解析法的电容式电压互感器铁磁谐振分析与抑制[J]. 广东电力, 2022, 35(10): 56-64.
ZHANG Chao, DING Xinzhi, WANG Bin. Analysis and suppression of ferroresonance of capacitive voltage transformer based on time domain analytical method[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 56-64.
- [26] 杨昊, 汪洋, 刘炬, 等. 电容式电压互感器绝缘击穿故障处理及防范措施[J]. 东北电力技术, 2022, 43(6): 19-32.
YANG Hao, WANG Yang, LIU Ju, et al. Fault treatment and precautionary measure of capacitor voltage transformer insulation breakdown[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(6): 19-32.
- [27] 郭敏, 何国新, 石同恒, 等. 基于物联网的智能抗消谐电压互感器综合保护方法[J]. 电器与能效管理技术, 2020(9): 79-85.
GUO Min, HE Guoxin, SHI Tongheng, et al. Integrated protection method of intelligent anti harmonic voltage transformer based on internet of things[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(9): 79-85.
- [28] NI. USB-6002 低成本 DAQ USB 设备产品规范[EB/OL]. [2023-11-20]. <https://www.ni.com/docs/zh-CN/bundle/usb-6002-specs/resource/374371a.pdf>.
- [29] TEXAS Instruments. ISO124 ±10 V 输入精密隔离放大器[EB/OL]. [2023-11-20]. <https://www.ti.com/cn/lit/ds/sym-link/iso124.pdf?ts=1700796253983>.
- [30] UMW. EL101X Photo Transistor Coupler[EB/OL]. [2023-11-20]. <https://atta.szlcsc.com/upload/public/pdf/source/20231109/93768E743CBE2103E82A82663FEFD439.pdf>
- [31] ROBERT H. BISHOP, 乔瑞萍, 林欣. LabVIEW 7 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

作者简介:

宋守龙(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压试验工作。E-mail: 13977379705@139.com。

廖斌(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事电力电容器技术研究工作。

顾凤彪(1981—), 男, 工程师, 主要从事高电压试验工作。