

DOI: 10.7667/PSPC180454

基于数字物理混合仿真的 电子式电压互感器暂态特性及其测试技术研究

汪玉¹, 汤汉松², 高博¹, 郑国强¹, 丁津津¹

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230061;

2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009)

摘要: 介绍了阻容分压电子式电压互感器的原理架构, 分析了阻容分压电子式互感器经微分积分后的暂态传变特性。从继电保护应用的角度关注了电子式电压互感器的暂态传变特性对快速距离保护的影响。提出了一种基于数字物理混合仿真的电子式电压互感器暂态测试技术方案。采用数字仿真输出小电压信号再利用功率放大器将其放大, 再搭建电子式电压互感器阻容分压的物理仿真平台, 建立完整的测试系统。利用突变量检测确定初始时刻, 同步采集模拟量原始电压信号与试品数字信号, 进行暂态过程电子式电压互感器的暂态误差计算。通过开发的测试系统在实验室的应用, 以验证测试技术方案的可行性。

关键词: 电子式电压互感器; 暂态传变特性; 数字物理混合仿真; 阻容分压; 突变量检测; 暂态误差

Research on transient characteristics and test technology of electronic voltage transformer based on digital-physical hybrid simulation

WANG Yu¹, TANG Hansong², GAO Bo¹, ZHENG Guoqiang¹, DING Jinjin¹

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230061, China;

2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: According to the principle structure of the resistor-capacitor voltage-divided electronic voltage transformer, the transient transfer characteristics of the resistor-capacitor voltage-divided electronic transformer after differential integration are analyzed. With relay protection application, the influence of transient voltage transfer characteristics of electronic voltage transformer on fast distance protection is studied. A digital voltage transformer transient test technology scheme based on digital physics hybrid simulation is proposed. The small voltage signal is digitally simulated and amplified by a power amplifier. The physical simulation platform of the electronic voltage transformer resistance-capacitor voltage divider is built and a complete test system is established. The initial time is determined by the mutation detection, and the analog raw voltage signal and the digital signal of the sample are synchronously acquired, then, the transient error calculation of the electronic voltage transformer in the transient process is performed. The feasibility of the test technology solution is verified by the application of the developed test system in the laboratory.

This work is supported by Beijing Municipal Natural Science Foundation (No. 1183068).

Key words: electronic voltage transformer; transient transmission characteristics; digital-physics hybrid simulation; resistive-capacitive divider; fault component test; transient error

0 引言

在输变电线路和变电站中, 阻容分压型电子式电压互感器(ECVT)作为电力系统一次侧输入电压的

传感设备已得到了广泛的使用, ECVT 性能的好坏直接影响到继电保护、故障测距、监控等二次侧设备的正常工作。

继电保护设备在故障发生时的正确动作都必须基于互感器良好的暂态表现, 特别是基于瞬时采样点的快速保护算法更是要求互感器能够将故障发

基金项目: 北京自然科学基金项目资助(1183068)

生初期的暂态过渡过程进行高保真的真实传变。文献[1]研究了线路光纤差动保护中电磁式互感器和电子式互感器混用带来暂态特性差异问题。文献[2]基于电子式互感器的应用对线路距离保护的耐过渡电阻及暂态超越进行了改进。上述文献基本都是对针对电子式电流互感器的暂态特性进行的研究^[3-5]，而对电子式电压互感器的暂态传变特性关注的很少。近年来大量阻容分压原理的电子式电压互感器在智能变电站得到应用，也发生了好几起由于电子式电压互感器暂态传变过程存在直流分量，而导致快速距离保护的暂态超越引起线路保护越级误动的事故，电压互感器的暂态特性直接影响快速距离保护算法的计算精度^[6-7]。

目前国内针对电子式电压互感器的暂态特性也做了不少研究^[8]，但由于无法提供一次真正故障的暂态电压来作为测试源，也没有相应的暂态高压标准，所以针对电子式电压互感器的暂态特性测试工作一直都是停留在利用拉合刀闸和开关模拟电压的跌落和建立过程来进行暂态开环测试。还无法像电子式互感器稳态测试一样形成闭环测试系统。

本文就此展开研究，利用数字、模拟混合仿真的方式输出二次暂态电压信号作为测试源，电阻分压作为其暂态标准，按照阻容分压电子式电压互感器的分压比同比缩小主电容的容抗值建立阻容式分压电子式电压互感器暂态仿真测试平台，闭环测试 ECVT 在系统故障过程中的暂态响应精度并在实验室进行了测试应用。

1 ECVT 的原理架构

ECVT 是由传感头、采集器以及合并单元三部分组成，传感头将一次电压信号分压成为一个小电压信号，采集器对小电压信号进行信号调理以及模数转换的传感头具体结构组成见图 1，主要包括电容分压器、取样电阻。一、二次电容分压器是 ECVT 实现电能测量功能的核心环节。电容分压器通过两个电容器对一次侧的高压进行分压，从而得到二次侧低压。为了改善暂态性能，提高测量精度，通常在低压电容的两端并联一个精密的取样电阻 R 。

由图 1 的电路原理可知

$$\frac{U_2(t)}{R} + C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} = C_1 \frac{d[U_1(t) - U_2(t)]}{dt} \quad (1)$$

在整个回路中由于 R 很小，所以式(1)的近似公式为

$$U_2(t) \approx RC_1 \frac{dU_1(t)}{dt} \quad (2)$$

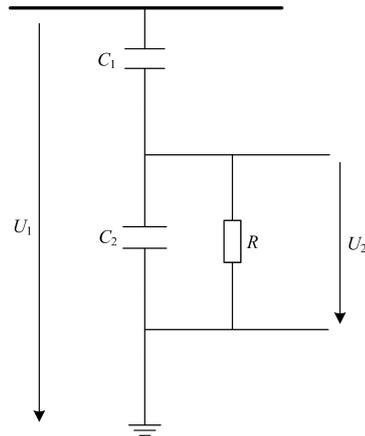


图 1 阻容分压电子式电压互感器分压原理图

Fig. 1 Voltage divider principle diagram of resistive-capacitive divider electronic voltage transformer

从式(2)可以看出电容分压器二次电压 U_2 为一次电压 U_1 的微分，因此必须要在电容分压器输出侧加上积分环节即可实现对一次电压的测量。由于电力系统故障时为感性负载，所以其电压会出现暂态阶跃信号，根据傅立叶变换阶跃信号可以看成复杂频谱的叠加信号，经过微分后会把信号按照角频率进行放大。此时如采用软件积分^[9]，会出现由于频率混叠或电压截止而导致的波形畸变且无法收敛，只能依靠软件积分事后零漂滤除来进行直流衰减。所以一般阻容分压的电子式电压互感器给保护用时都会采用硬件积分，软件积分信号一般给计量或测量装置使用。

由于实际运算放大器普遍都存在一个输入偏置电压，理想硬件积分器会很快饱和至电源电压值，所以工程中应用的硬件积分器一般都会采用有损积分器，如图 2 所示即在积分电容 C 两端并联一个电阻 R_2 ，构建 RC 回路消耗掉电荷。

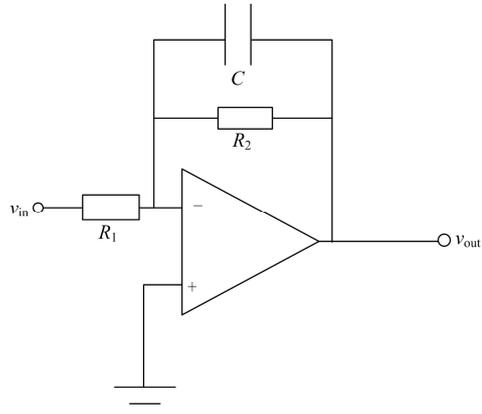


图 2 硬件积分原理图

Fig. 2 Hardware integration principle diagram

其最终积分公式为

$$H(s) = -\frac{R_2}{R_1} \times \frac{1}{1 + sR_2C} \quad (3)$$

传递函数为

$$H(j\Omega) = -H(0) \times \frac{1}{1 + j\frac{\Omega}{\Omega_0}} \quad (4)$$

式中: Ω 为输入信号的角频率, $\Omega = 2\pi f$; $H(0) = R_2/R_1$; $\Omega_0 = 1/(R_2C)$ 。

2 阻容分压电子式电压互感器暂态特性分析

阻容分压原理电子式互感器在设计时一般都是按照工频电压的传导过程来进行设计, 二次输出电压信号在额定时为 $4/1.732 \text{ V}$ 的微分信号。一次短路故障时, 如不考虑溢出等情况, 利用积分回路与微分回路进行参数匹配, 其暂态过程也可以完全还原为原始信号。但一次电压的暂态过程是一个暂态阶跃信号, 这个信号在其微分过程会被放大很多倍, 其微分后的输出电压峰值甚至可以达到几百伏, 这个电压显然已经超过了积分器的工作电压范围, 所以一般电子式互感器厂家在采集器设计时会积分器前端增加一个稳压管来对输入信号进行限压, 保护通道有时还会额外增加一个分压回路以降低微分后电压过高对积分器的影响。此时进入积分器的微分电压信号已经不再是原始电压信号的微分信号, 而是一个被削顶后的电压信号, 当这个信号进入积分器后如处理不好就会在积分器内产生一个无法衰减的直流偏置电压, 这个电压只能依靠图 2 中的电阻 R_2 来进行消耗并衰减, 这个过程就是由 R_2 与 C 的参数配合来决定。这个衰减过程直接决定了阻容分压原理电子式电压互感器的暂态过程的传变精度^[10]。

3 数字模拟混合仿真的电子式电压互感器测试系统

3.1 测试系统架构

如图 3 所示, 整个测试系统以数字、物理混合仿真作为测试源, 上位机搭载 Matlab 仿真测试软件利用其 Simulink 仿真模型, 建立系统一次模型, 按照真实系统故障仿真其电压在故障时的变化过程, 将一次电压数据发送至测试主机。测试主机将测试数据以小电压模拟量的方式发送至电压型功率放大器, 由放大器按比例输出, 一般电压型功率放大器输出值为二次值, 其额定电压为 100 V , 所以仿真输出电压与实际一次电压比例为 $U_n/100 \text{ V}$ 。

按照电子式电压互感器的电压与电阻参数搭建

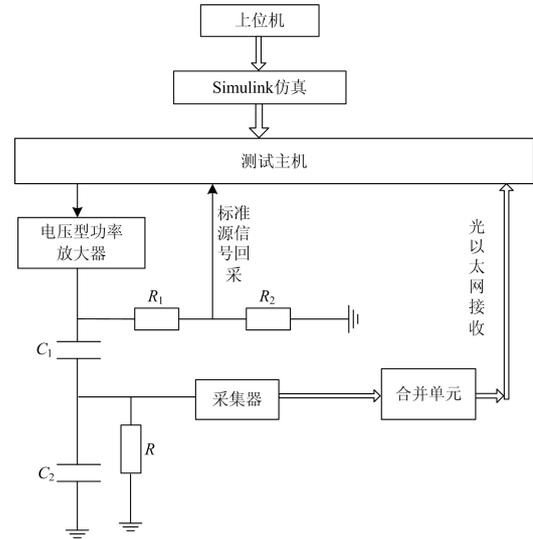


图 3 基于 Simulink 数字、物理混合仿真的电子式电压互感器暂态测试原理示意图

Fig. 3 Transient testing principle diagram of electronic voltage transformer based on Simulink digital simulation and physics simulation

阻容分压电子式互感器本体的仿真物理模型。如图 1 所示, 阻容分压原理的电子式电压互感器其主电容 C_1 是与电阻串联进行微分分压, 如式(2)所示, 其电容值只会影响输出电压的幅值而不会改变其暂态阶跃特性。而保护电容 C_2 是与采样电阻 R 并联在电压暂态突变时构成了一阶的阶跃响应回路, 其阶跃响应函数为

$$U_2(t) = U_2(\infty)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})\varepsilon(t) \quad (5)$$

式中: $U_2(\infty)$ 为阶跃电压初始值; τ 是电路的时间常数, $\tau = RC_2$ 。

为确保仿真模型最终输出的小电压信号与电压互感器原有的输出值一致, 按照电压的缩小比例改变其阻容分压回路的分压比将主电容值 C_1 按照 $U_n/100 \text{ V}$ 比例进行放大, 保护电容值 C_2 以及电阻值 R 与试品保持一致使其整回路的暂态阶跃响应的时间常数不变。测试主机采集 R_1 、 R_2 电阻分压后的小电压信号作为测试标准信号源, 电阻采用高精度无感电阻以保证分压的暂态精度, 测试主机同时接收来自合并单元的数字量信号作为试品信号并进行同步处理后进行暂态误差测试^[11-12]。

3.2 一次侧短路故障仿真

仿真电路如图 4 所示, 搭建 220 kV 的交流输电系统模型, 包括 220 kV 电源模块、 220 kV 变电站模块、输电线路模块、故障模块及电子式电压互感器模块, 系统仿真步长 $2 \mu\text{s}$ ^[13]。

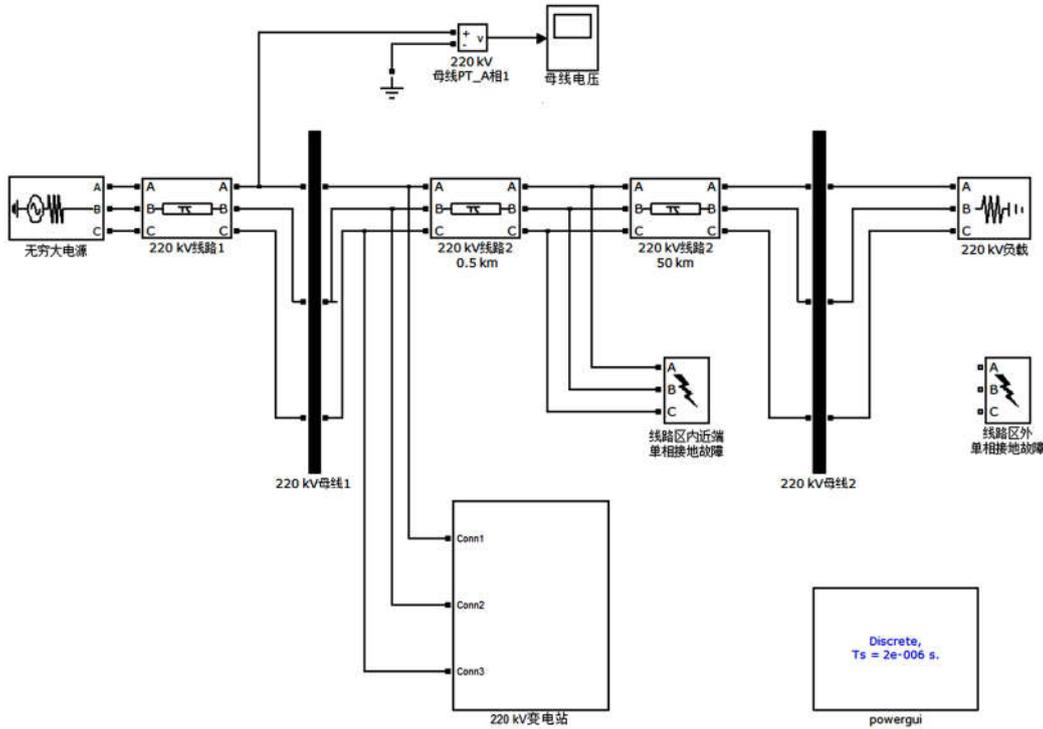


图 4 220 kV 一次系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of 220 kV primary system

输电线路采用 π 型电路，线路长为 50 km，电压取自母线电压。故障类型为单相金属性接地故障，故障位置分别为线路近区与 50 km 线路区外，故障时刻为 90° 角故障。

对上述仿真波形进行数值分析，可以得知一次电压信号在故障瞬间的暂态过程是一个伴随有高频振荡趋稳过程的阶跃电压。

3.3 电子式电压互感器暂态测试系统

电子式电压互感器暂态测试时利用图 5 和图 6 一次侧短路故障仿真后输出的暂态电压信号进行同比例缩小后作为测试数据源信号。测试系统架构如图 7 所示。

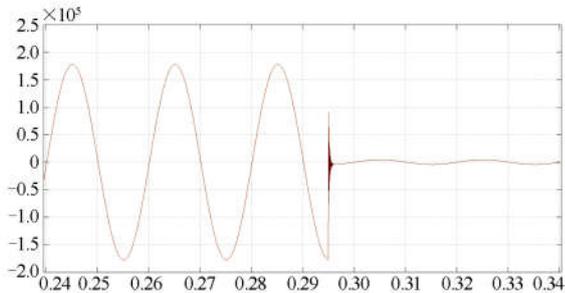


图 5 相角 90° 近区单相金属性接地故障波形

Fig. 5 Fault waveform of metal single-phase grounding fault in the near range of 90° phase angle

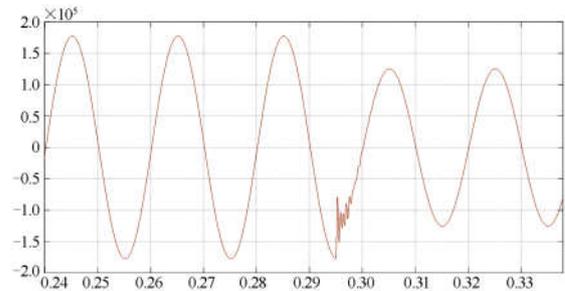


图 6 相角 90° 区外单相金属性接地故障

Fig. 6 External metal single-phase grounding fault of 90° phase angle

标准源信号 U_2 经过高精度电阻分压后，输出峰值在 ADC 量程范围内的电压 U_3 ，根据实际暂态电压中的主要成分的带宽，信号调理的截止频率设定为 20 kHz，采用高精度 ADC 进行采集，采样频率不低于 100 kHz，以保证比试品的截止频率高出两个数量级，从而使得相对于试品而言是一个近似的连续不失真波形。ADC 的每一个采样值均进行时间的标定，得到标准源电压值 U_{ref} 。为了减少接收环节带来的时序抖动以及采样同步误差，采用 FPGA 来同步接收来自于合并单元的光纤数字量采样值信号^[14-16]以及 ADC 芯片的模拟量采样值信号。

目前数字化继电保护对电子式互感器基本都是

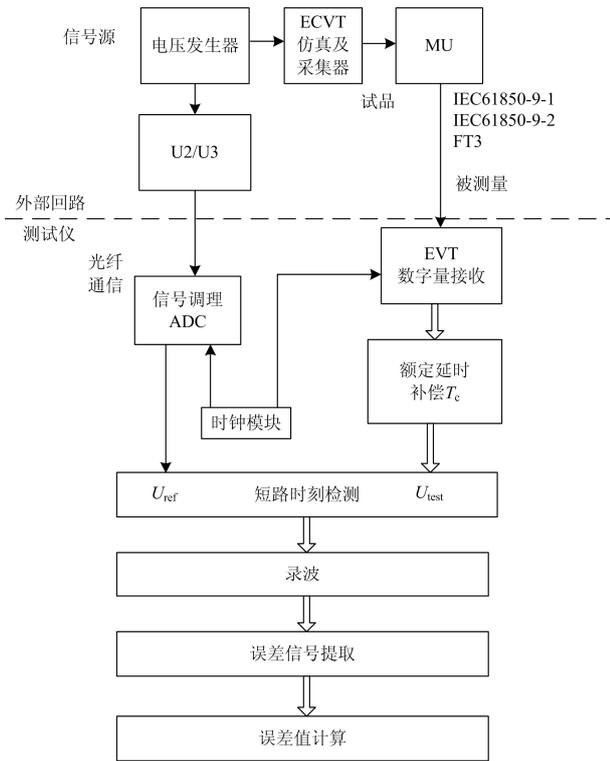


图 7 电子式电压互感器暂态测试系统

Fig. 7 Transient test system of electronic voltage transformer

不依靠同步时钟而采用绝对延时法来进行采样^[17], 本系统采用绝对延时法来对电子式电压互感器进行暂态测试。FPGA 接收到 MU 数据后^[18-19], 对每一帧采样值报文进行时间标定, 按照电子式互感器的额定延时 T_c 进行时标修正后得到被测电压值 U_{test} ^[20]。修正后的采样值与标准源信号采样值通过时标完成了同步处理。暂态试验的起始时刻, 通过突变量检测来进行捕捉, 检测到暂态起始时刻后进行标准源和被测量的数据录波, 突变前至少记录 2 周波数据并计算其波形峰值以及有效值作为误差判断基准值, 突变后根据试验时长进行记录, 随后进行误差电压的提取并计算其瞬时误差值以及基波误差值, 从而完成电子式电压互感器的暂态测试。

4 测试系统应用

该系统在实验室对国内某厂家的 ECVT 进行了暂态测试, 该 ECVT 已在武高所进行过稳态测试验证。该 ECVT 的主回路电容 C_1 为 2 500 pF, 保护电容 C_2 为 1.5 μ F, 采样电阻为 11.5 Ω , 额定电压 220 kV 时的输出电压为 2.31 V。按照图 1 搭建物理仿真模型改变 ECVT 的主回路电容, 将 ECVT 的主回路电容 C_1 按照 220 kV/100 V 进行 2 200 倍放大, 放大后电容值为 5.5 μ F, 其余回路参数与试品一致, 按照

图 3 所示分别施加近区故障与远端故障进行暂态测试。测试结果如图 8 和图 9, 图中绿色为标准信号, 黄色为试品信号, 红色为误差信号。

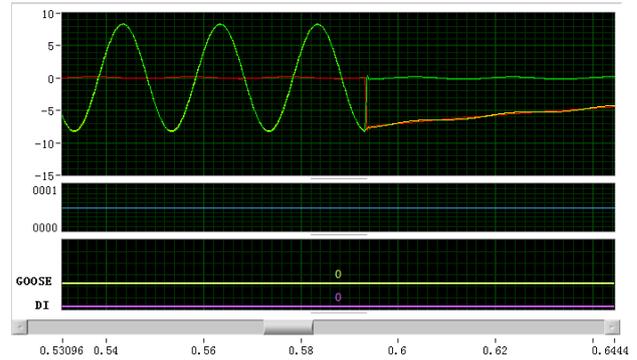


图 8 近区故障暂态测试图

Fig. 8 Transient test diagram of the near-zone fault

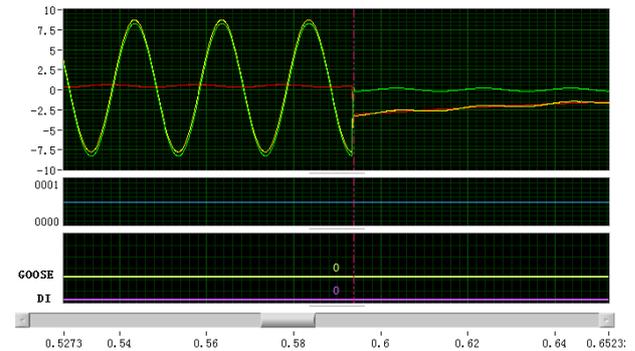


图 9 远端故障暂态测试图

Fig. 9 Transient test diagram of the external fault

将采集器更换为带有分压回路的采集器进行暂态测试, 分压比为 10:1, 测试结果如图 10 和图 11, 图中绿色为标准信号, 黄色为试品信号, 红色为误差信号。

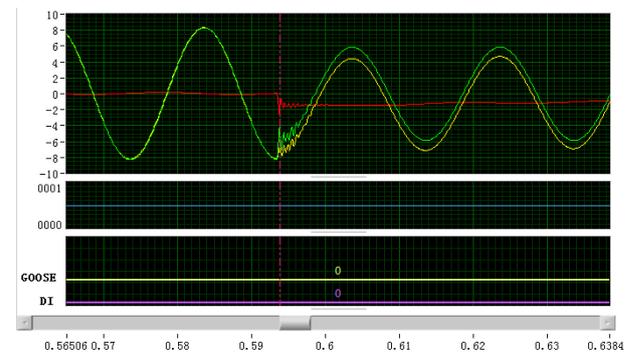


图 10 近区故障带分压回路的暂态测试图

Fig. 10 Transient test diagram of the near-zone fault with voltage divider

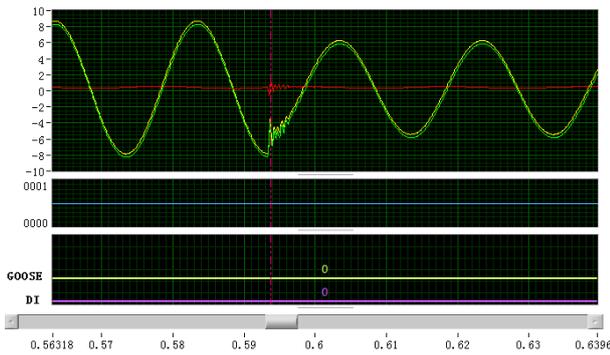


图 11 远端故障带分压回路的暂态测试图

Fig. 11 Transient test diagram of the external fault with voltage divider

对以上波形进行误差分析,分析波形内一周波后的基波误差以及暂态过程的最大值瞬时误差,测试结果见表 1。经过多次测试,测试结果基本一致。

表 1 ECVT 暂态测试数据

Table 1 Transient test data of ECVT

故障类型	近区故障		远端故障	
	1:1	10:1	1:1	10:1
分压方式	1:1	10:1	1:1	10:1
一周波后基波 误差/%	1.27	0.53	0.62	0.32
最大瞬时误差/%	96.2	38.7	16.7	1.5

上述测试过程是仿真了系统极端运行方式下的暂态过程,改变系统参数与故障初始相位角进行了重复性测试,测试结果的趋势与表 1 基本一致,其暂态瞬时误差值与其电压突变值的变化趋势一致。

从测试结果可以分析得出,阻容分压的电子式电压互感器在故障时其微积分过程无法响应电压的突变过程,从而出现了衰减直流分量导致暂态瞬时误差严重超差。在微分与积分之间增加分压回路可以有效遏制这种直流电压的初始峰值,但近区故障时其直流分量依旧很大,远端故障时的暂态瞬时误差满足要求。暂态过程的整周波的基波有效值基本都可以满足暂态精度的要求。所以这种暂态行为对于基于电压瞬时值的快速保护存在很大的不正确动作的风险,但对于基于电压整周波基波值的保护而言没有影响。这种测试方法可以很好地对 ECVT 的暂态转变特性进行测试和分析,并对一些快速响应的保护提出了新的技术要求,以解决阻容分压原理电子式电压互感器的暂态特性中直流偏置给快速保护带来的风险。

5 结论

电子式电压互感器的暂态转变特性直接影响到电力系统快速保护的動作性能与動作指标,尤其

是对线路保护中的快速距离保护以及变压器磁通制动原理的差动保护影响最大^[21],近区故障时由于微分后电压过高导致积分器信号失真,积分回路已经很难进行完整的信号还原,从而导致最终的输出信号中含有很高的衰减直流分量,所以在工程应用中不能忽略对电子式电压互感器暂态转变特性的测试,以免留下安全隐患。通过本文所开发的数字物理混合仿真暂态测试系统,回避了暂态一次电压以及一次暂态电压标互缺失所带来的影响。利用数字仿真输出一系统故障后电压信号并搭建物理仿真平台将其按照阻容分压的方式输出微分信号给实际电子式互感器的采集器以及合并单元,并同步采集模拟标准信号以及试品的数字信号,计算暂态过程的瞬时误差值以及一周波后的基波误差值。通过已经研制出的测试系统在实验室的测试验证,测试结果与理论分析基本一致,证明本方案切实可行。

参考文献

- [1] 李旭,黄继东,倪传坤,等.不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(3):141-145.
LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [2] 倪传坤,张克元,杨生苹,等.基于电子式互感器的 R_L 模型距离保护应用研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(15):132-135.
NI Chuankun, ZHANG Keyuan, YANG Shengping, et al. Application of R-L model distance protection based on ECT[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 132-135.
- [3] 李长云,李庆民,李贞,等.直流偏磁和剩磁同时作用下保护用电流互感器的暂态特性研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(23):107-111.
LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. DC magnetic bias and remanence while under the effect of protection of transient characteristic of current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 107-111.
- [4] 戴魏,郑玉平,白亮亮,等.保护用电流互感器转变特性分析[J].电力系统保护与控制,2017,45(19):46-54.
DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis of protective current transformer transient response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [5] 樊占峰,白申义,杨智德,等.光学电流互感器关键技术研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(3):67-74.
FAN Zhanfeng, BAI Shenyi, YANG Zhide, et al. Research on key technology of optical current transformer[J]. Power

- System Protection and Control, 2018, 46(3): 67-74.
- [6] 康小宁, 张新, 索南加乐, 等. 电压互感器和电流互感器暂态特性对距离保护算法的影响[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(8): 955-960.
KANG Xiaoning, ZHANG Xin, SUONAN Jiale, et al. Influence of transient characteristics of capacitor voltage transformer and current transformer on distance protection[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(8): 955-960.
- [7] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [8] 王佳颖, 郭志忠, 张国庆, 等. 电子式电压互感器暂态特性仿真与研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 62-65.
WANG Jiaying, GUO Zhizhong, ZHANG Guoqing, et al. Investigation and simulation of transient characteristics of electronic voltage transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 62-65.
- [9] 张可畏, 王宁, 段雄英, 等. 用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 104-108.
ZHANG Kewei, WANG Ning, DUAN Xiongying, et al. Digital integrator for electronic current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 104-108.
- [10] 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.
LIU Qi, XU Yan, GAO Fei, et al. Simulation research on electronic voltage transformer transient process[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(10): 37-43.
- [11] 赵勇, 孔圣立, 罗强, 等. 电子式电流互感器暂态传变延时测试技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 125-130.
ZHAO Yong, KONG Shengli, LUO Qiang, et al. Research on testing technology of ECT transmission delay time in transient state[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 125-130.
- [12] 王佳颖, 郭志忠, 张国庆, 等. 电子式电压互感器暂态特性仿真与研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 62-65, 75.
WANG Jiaying, GUO Zhizhong, ZHANG Guoqing, et al. Investigation and simulation of transient characteristics of electronic voltage transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 62-65, 75.
- [13] 李谦, 张波, 蒋偷宽, 等. 变电站内短路电流暂态过程及其影响因素[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1986-1993.
LI Qian, ZHANG Bo, JIANG Yukuan, et al. Transient process of short-circuit current in substations and its influential factors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1986-1993.
- [14] 互感器第八部分: 电子式电流互感器: GB/T 20840.8[S].
- [15] 变电站通信网络和系统 第 9-1 部分: 特定通信服务映射-通过单向多路点对点串行通信链路的模拟量采样值: DL/T860.91 [S].
- [16] 变电站通信网络和系统 第 9-2 部分: 特定通信服务映射-通过 ISO8802-3 的模拟量采样值: DL/T860.92 [S].
- [17] 陶文伟, 高红亮, 杨贵, 等. 智能变电站过程层冗余组网模式及网络延时累加技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 124-129.
TAO Wenwei, GAO Hongliang, YANG Gui, et al. Research on redundant networking mode and network delay accumulation technology of smart substation process layer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 124-129.
- [18] 李澄, 袁宇波, 罗强. 基于电子式互感器的数字保护接口技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 84-87.
LI Cheng, YUAN Yubo, LUO Qiang. Research on interfacing technology for digital protection based on ECT/EVT[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 84-87.
- [19] 龚坚, 彭晖, 乔庐峰, 等. 标准 802.3 以太网 MAC 控制器的 FPGA 设计与实现[J]. 军事通信技术, 2005(4): 21-24.
GONG Jian, PENG Hui, QIAO Lufeng, et al. FPGA design and implementation of standard 802.3 ethernet MAC controller[J]. Journal of Military Communications Technology, 2005(4): 21-24.
- [20] 高吉普, 徐长宝, 王宇, 等. 光学电子式电压互感器暂态特性及其测试技术研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(4): 84-89.
GAO Jipu, XU Changbao, WANG Yu, et al. The optical electronic voltage transformer based on faraday magneto-optical theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(4): 84-89.
- [21] 徐长宝, 高吉普, 鲁彩江, 等. 适用电子式互感器的变压器保护磁通制动技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 80-86.
XU Changbao, GAO Jipu, LU Caijiang, et al. Flux restraint technology of transformer protection for electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 80-86.

收稿日期: 2018-04-20; 修回日期: 2018-07-16

作者简介:

汪玉(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护技术; E-mail: 303959568@qq.com

汤汉松(1974—), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 研究方向为智能电网技术研究和电子式互感器相关技术; E-mail: xsunson@163.com

高博(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护技术。E-mail: gb506@126.com

(编辑 周金梅)