

雷电冲击电压对配电一二次融合成套设备测量准确度的影响

贺翔¹, 赵海洋², 程显², 徐铭铭¹, 朱剑鹏², 马建伟¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为解决一二次融合成套开关设备中二次设备受电磁干扰影响所导致的准确度问题,设计了一套抗干扰测量系统,并基于雷电冲击电压试验电路和抗干扰测量系统对配电网一二次融合成套开关设备测量准确度进行雷电冲击电压干扰测试,采集电压波形并进行时频域分析,得到导致其测量准确度下降的原因。提出在馈线终端采集单元基准端加保护器件和互感器二次输出端加滤波装置这2种防护方案,并对方案的效果进行理论分析和试验验证。结果表明,雷电冲击电压将通过互感器传至二次设备,使得互感器二次侧产生较高的耦合电压,其试验实测幅值达几千伏,频率在几MHz至30 MHz之间,对互感器的准确度影响较大;通过在互感器二次出线端口增加高频滤波装置能有效降低耦合电压,干扰信号强度降低为原来的20%左右,比差和相差降低为原来的40%左右。

关键词:雷电冲击电压;一二次融合;测量准确度;电磁干扰;二次设备;电压互感器

中图分类号:TM 930

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912013

0 引言

近年来,配电网一二次设备融合是配电设备标准化、集成化发展的趋势^[1-2]。电网智能化需要将一次设备升级为智能电力设备,二次设备需要同时升级为智能控制单元。互感器是一二次融合高低压的分界点,二次设备馈线终端FTU(Feeder Terminal Unit)进行配电网故障判断和数据上传,其稳定性、可靠性、准确度对配电网的安全起着至关重要的作用^[3-5]。一二次融合后二次设备工作在一次设备产生的高温、高压、强电磁干扰环境中,二次元件又都是电子元器件,设备测量准确度受到较大影响,易引起二次设备误动、拒动、准确度下降、死机等问题^[6-7]。

国内外学者已经对电磁干扰影响二次设备可靠性进行了一些研究:文献[8-9]研究了智能变电站开关操作时对二次设备端口的电磁干扰特性,试验表明其对二次设备产生比较高的耦合电压,采用浪涌保护器吸收二次设备信号传输线上的电压行波能够有效降低正负方向电压幅值;文献[10]研究了电子电压互感器采集单元在浪涌干扰下的可靠性问题,提出了在电源输入端和输出端加防护措施的方法,实验验证结果表明其能够有效提高测量准确度;文献[11-12]研究了雷电冲击电压空间磁场的计算问题,获得了变压器智能组件典型位置的磁场分布并与试验结果进行比对。目前的研究大多是针对开关操作时电弧重燃产生的电磁干扰对二次设备和互感器产生的影响,而关于雷电冲击电压对二次设备测量的影响研究较少。配电网一二次融合正处于发展阶段,生产厂家也只是做到成套阶段,目前正在使用的智能配电设备已多次出现互感器数据失真、通信

丢包等各种电磁干扰问题,因此有必要对雷电冲击电压对一二次融合成套开关设备准确度的影响进行试验研究。

本文搭建雷电冲击电压试验平台,针对雷电冲击电压干扰配电网一二次融合成套开关设备问题进行试验测试,得出雷电冲击电压对其测量准确度的影响程度,并设计了一套抗干扰测量系统,采集互感器的波形数据进行时频域分析,得到干扰一二次融合成套开关设备测量准确度的原因,提出在馈线终端采集单元基准端加保护器件和互感器二次输出端加滤波器这2种防护方案,并进行理论分析和试验验证。

1 雷电冲击电压对一二次融合成套开关设备测量准确度的影响

当雷电冲击电压或电力系统发生过电压时,不仅连接引线上产生过电压,断路器的一定空间范围内也会产生快速变化的电场和磁场,通过导线传导和空间辐射的形式影响二次设备的正常工作。为验证一二次融合成套开关设备的可靠性,需要在实验室模拟现场工况进行性能检测。

1.1 试验测试方案

试验接线示意图如图1所示,图中升压变压器对标准电压互感器和一二次融合成套设备施加一次电压,FTU采集互感器二次端输出的信号,互感器测试仪采集标准互感器和FTU输入端的电压以及经信号转换装置后FTU的输出信号,从而计算比差和相差,计算方法分别如式(1)、(2)所示;雷电冲击电压发生器对断路器端子施加冲击电压,同时向信号转换装置和互感器测试仪发出同步信号以达到同时测量的目的。

$$f = \frac{K_n U_s - U_p}{U_n} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Phi = \Phi_s - \Phi_p \quad (2)$$

其中, f 为互感器比差; K_n 为电压互感器的额定变比值; U_s 为电压互感器二次侧电压的方均根值; U_p 为标准电压互感器电压的方均根值; Φ 为互感器相差; Φ_s 为互感器相位移; Φ_p 为标准互感器相位移。

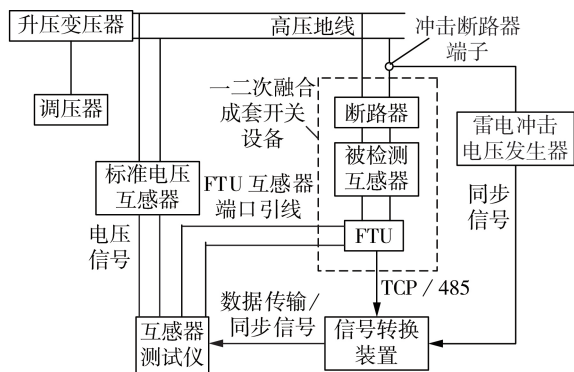


图 1 试验接线示意图

Fig.1 Schematic diagram of test wiring

根据国家标准 GB 3906—2006 和 DL/T 593 对 10 kV 断路器冲击电压试验的要求,相对于地、相间和断口间应该经受 75 kV、85 kV 的雷电冲击电压试验,这为试验中雷电冲击电压选取提供了标准^[13],因此本文试验中对一二次融合成套开关设备的断路器端子处施加的雷电冲击电压从 20 kV 开始以 10 kV 为梯度递增至最高值 70 kV,每组试验进行 5 次,以测试雷电冲击电压对设备采集准确度的影响。试验装置实物图如附录 A 中图 A1 所示。

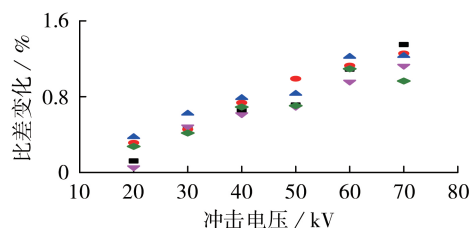
1.2 试验结果分析

将某型号的 10 kV 一二次融合成套开关设备连接到试验电路中进行性能测试,试验前测得该设备的比差在 0.1 %~0.25 % 之间波动、相差在 -4'~4' 之间波动。表 1 为 40 kV 雷电冲击电压干扰下的误差数据变化。由表可知,在雷电冲击电压的干扰下,互感器测试仪检测到 FTU 输入端和 FTU 输出端的比差和相差均发生了跳变,且 FTU 输出端的误差比 FTU 输入端的误差大,这可能是雷电冲击电压产生的瞬态过电压通过导线传导至 FTU 内部引起的。

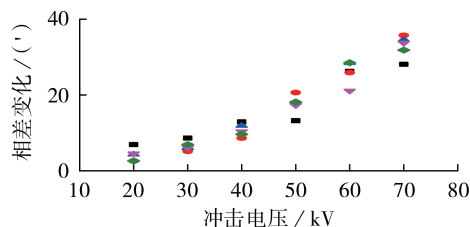
表1 40 kV雷电冲击电压干扰下误差数据变化
Table 1 Error data change under 40 kV lightning
voltage surge interference

试验次数	比差变化/%		相差变化/(°)	
	FTU输入端	FTU输出端	FTU输入端	FTU输出端
1	0.650 4	1.131 9	12.912	20.296
2	0.736 0	1.203 9	8.640	15.064
3	0.788 1	1.020 7	11.912	18.072
4	0.612 1	1.092 3	10.368	21.696
5	0.690 4	0.969 9	9.640	23.250

FTU 互感器输入端和 FTU 输出端在不同的雷电冲击电压干扰下 5 次试验的比差变化和相差变化分别如图 2、3 所示。由图可知, 每组雷电冲击电压下, FTU 输入端和 FTU 输出端测量数据的比差变化和相差变化有一个上下波动范围, 但整体变化是随着雷电冲击电压的升高, 比差变化和相差变化均不断地增大; 在相同的雷电冲击电压干扰下, FTU 采集后输出的测量值误差要比 FTU 输入端误差要大, 说明雷电冲击电压不仅干扰互感器本身的准确度, 对 FTU 采集单元也产生很大的干扰; 目前国家电网对 10 kV 一二次融合成套设备测量准确度的要求是一次互感器准确度为 0.5 级, 一二次融合成套化后互感器测量准确度等级为 1 级(《国家电网公司一二次融合成套柱上断路器 / 负荷开关入网专业检测大纲》), 由数据可知, 在雷电冲击电压高于 40 kV 以后准确度误



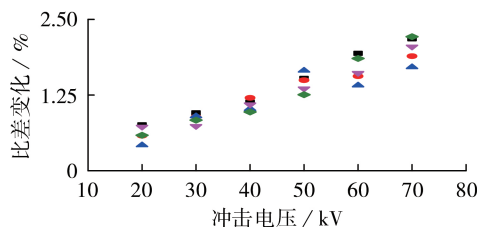
(a) 比差变化



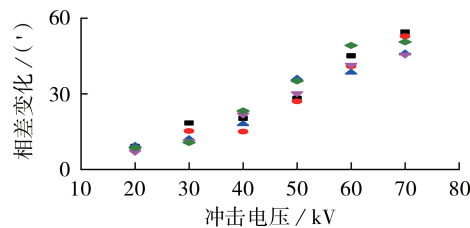
(b) 相差变化

图2 FTU输入端的数据变化

Fig.2 Change of FTU input data



(a) 比差变化



(b) 相差变化

图3 FTU输出端的数据变化

Fig.3 Change of FTU output dada

差超出国家电网的要求,并且随着冲击电压的增加准确度误差还会进一步扩大。

2 影响因素的分析

2.1 影响因素定位

雷电冲击电压施加到断路器端子上相当于雷电冲击电压施加在互感器一次侧,在施加时刻使一次侧标准电网电压波形产生畸变,这是引起一次侧互感器准确度下降的原因之一;雷电冲击电压产生的电磁干扰通过引线传导和空间辐射方式对FTU采集单元也产生较大的干扰。

一二次融合试验样品的互感器二次侧输出有效值为100 V,再经FTU内部互感器转化为峰值2.5 V的交流信号,AD采集芯片采集交流电压信号传输给控制器,该样品使用的AD芯片为AD7606,采用DC 2.5 V基准电压源。采集单元结构图如附录A中的图A2所示,其中电源电压输入为DC 24 V,保护电路防止电磁干扰从电源端进入,隔离电源将DC 24 V转换为DC 5 V,为信号调理电路、AD转换器、控制器、网络模块等提供电源,ADR421将DC 5 V电源转换为DC 2.5 V为AD芯片提供基准电压源。

由FTU采集原理分析可知,采集电压是以基准电压为参考而得到的,基准电压的稳定是采集精度的保证,雷电冲击电压产生的电磁干扰会通过互感器导线传导和空间辐射方式对FTU产生瞬态过电压,导致FTU采集模块基准电压波动。

为进一步确定干扰位置,对FTU互感器二次电压信号和FTU内部AD芯片的参考电压进行采集。为避免雷电冲击电压产生的电磁干扰对测量装置的影响,保证测量的准确性,需要研制一种抗干扰测量系统。

2.2 抗干扰测量系统

图4为抗干扰测量系统示意图。抗干扰测量系统主要由屏蔽箱、数字存储示波器、逆变器、锂电池、光电转换模块、计算机等构成,示波器采集高压探头的电压输出量,示波器采集到的波形通过串口号经光电转换模块传输到计算机,由于雷电冲击电压会产生复杂的电磁干扰环境,测量系统的抗干扰能力是系统设计的主要难点。

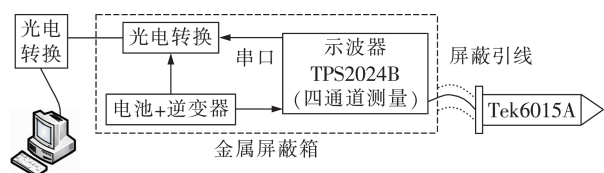


图4 测量系统组成示意图

Fig.4 Schematic diagram of measurement system

测量系统为屏蔽雷电冲击电压产生的电磁干扰对示波器的影响,除高压探头外所有的设备都放置

到屏蔽箱内,并使用电池独立供电。屏蔽箱体可以屏蔽外部的电磁干扰进入箱内,干扰示波器测量端口信号;逆变器和电池组成的供电系统可以避免空间电磁干扰沿外部电源线传导到示波器内。

高压探头及其电缆采用编织网形成整体性屏蔽,高压探头对于无法直接测量的位置,采取屏蔽引线连接至电压测量点处,屏蔽引线的长度应尽可能短,以减弱导线的电感和电阻带来的影响^[14-15]。

为减弱空间电磁干扰对示波器信号采集线路的影响,在屏蔽箱内加装光电转换装置,将示波器测量的电信号转换为光信号后,由光纤传输至远端的测量控制平台,再次经光电转换后,成为计算机可以识别控制的电信号。

2.3 测试结果分析

对一二次融合成套开关设备进行40 kV雷电冲击电压干扰试验,使用测量系统对FTU的互感器二次电压信号输入端和FTU内部AD芯片的参考电压进行采集,典型波形如图5、6所示。图5(a)为FTU互感器二次电压波形,由图可知,在雷电冲击电压发生时,采集波形为互感器二次侧的电压波形与经互感器变比转换后雷电冲击电压波形的叠加,干扰时间约为100 μ s,并且在初始时刻会产生瞬变的电压浮动;图5(b)为图5(a)中干扰电压的放大波形图,该波形为典型的阻尼振荡波形,正向最大峰值达到1.5 kV,反向最大峰值达到-1.4 kV,对其进行频谱分析后得到图6。从图6中可知,波形的频率主要为高频分量,主要分布在几MHz至30 MHz之间,且高频分量衰减速度较快。综上所述,这种干扰波形为

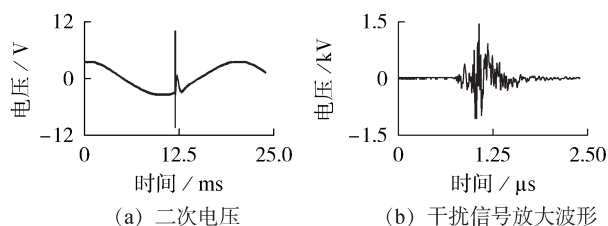


图5 互感器二次电压及干扰波形

Fig.5 Secondary voltage signal of transformer and interference waveform

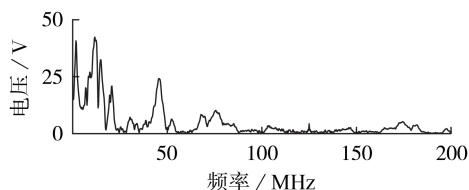


图6 互感器二次电压信号中干扰电压频谱分析图(频域)
Fig.6 Spectrum analysis diagram of interference voltage of transformer's secondary voltage signal in frequency domain

典型的电磁干扰波形图,在雷电冲击电压的瞬间会在二次侧耦合一个高频的阻尼振荡波,波形持续时间特别短暂,干扰幅值特别大。

基准电压的波形图如图 7 所示,由图可见,基准电压端口的干扰波形也为阻尼振荡波形,正向干扰最大峰值达到 1 kV,反向干扰最大峰值达到 -1 kV。基准电压频谱分析图如图 8 所示,由图可知,在基准电压端产生的干扰波形与互感器二次电压干扰波形基本一致。因此,雷电冲击电压产生的电磁干扰通过互感器引线传导至基准电压端,产生高频阻尼振荡波,导致 AD 采集模块电压采集产生误差。

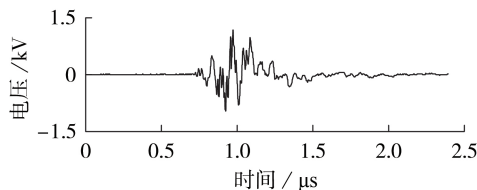


图 7 40 kV 雷电冲击电压干扰下基准电压输出波形

Fig.7 Reference voltage output waveform under 40 kV lightning impulse voltage interference

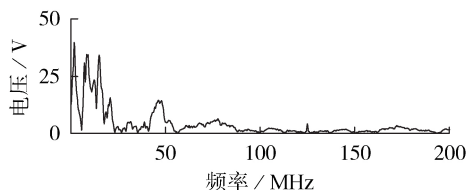


图 8 基准电压中干扰电压的频谱分析图(频域)

Fig.8 Spectrum analysis diagram of interference voltage of reference voltage in frequency domain

雷电冲击电压波形与互感器二次侧波形进行叠加,导致互感器二次侧信号发生波形畸变;雷电冲击电压会产生强烈的电磁干扰,通过电缆传导到二次侧耦合一个高频的阻尼振荡波,波形幅值可达几千伏,频率在几 MHz 至 30 MHz 之间,在基准电压端产生的干扰信号对馈线终端 AD 采集模块采集电压的准确度产生较大的影响。

3 提高可靠性措施

3.1 在 FTU 采集基准单元加保护器件

由于雷电冲击电压产生的电磁干扰会对二次设备耦合一个高频阻尼振荡波,对测量准确度产生较大干扰,需要对其干扰波进行抵制,提高设备稳定性。影响 FTU 内部 AD 采集准确度的关键是基准电压的稳定,因此,首先考虑在 AD 采集模块信号基准电压端加瞬变电压抑制器二极管(TVS)保护器件^[16-18]。

当两端经受瞬间的高能量冲击时,TVS 会迅速改变阻抗吸收瞬变的大电流,将两端电压箝制在预定的电压数值上,保证电路工作的可靠性。由于电压输出

信号最大幅值为 2.5 V,此处选择 3.3 V 的 TVS 作为保护器件,增加保护器件后的示意图如图 9 所示。

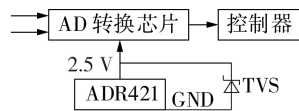


图 9 增加 TVS 后的电路图

Fig.9 Circuit diagram after adding TVS

增加 TVS 后进行 40 kV 雷电冲击电压试验,对 FTU 互感器二次电压信号和基准电压进行采集,典型的二次电压干扰信号和基准电压波形分别如图 10 和图 11 所示。由结果分析可知:在 FTU 互感器二次输入端产生的干扰电压正向峰值由 1.5 kV 下降到 1 kV,反向峰值由 -1.4 kV 下降到 -1.1 kV;基准电压的正向干扰峰值由 1 kV 减少到 800 V,反向干扰峰值由 -1 kV 减少到 -700 V 左右。在 40 kV 雷电冲击电压的干扰下对一二次融合成套开关设备测量准确度进行测量,误差变化数据如表 2 所示,由表可见,测量的准确度有提升,但并不理想,需要进一步采取措施进行抑制。

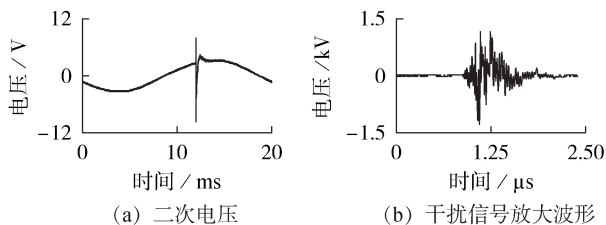


图 10 增加 TVS 后互感器二次电压信号干扰波形

Fig.10 Secondary voltage signal of transformer and interference waveform after adding TVS

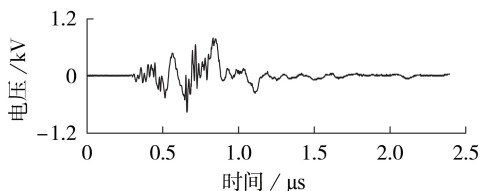


图 11 增加 TVS 后基准电压输出波形

Fig.11 Output waveform of reference voltage after adding TVS

表 2 增加 TVS 管后误差数据变化

试验次数	比差变化 / %		相差变化 / (′)	
	FTU 输入端	FTU 输出端	FTU 输入端	FTU 输出端
1	0.450 4	0.831 9	10.912	14.296
2	0.536 0	0.903 9	9.640	15.064
3	0.488 1	0.920 7	9.912	16.072
4	0.412 1	0.899 9	10.368	15.696
5	0.390 4	1.069 9	8.640	13.250

3.2 在互感器二次输出端增加防护措施

由于干扰信号主要是高频阻尼振荡波,干扰频

率在几 MHz 到 30 MHz 之间,考虑在干扰传导线上施加滤波器装置滤除高频阻尼振荡干扰波;二次设备馈线终端的供电和信号输入由互感器通过电缆提供,故在互感器二次侧加装滤波装置。常见的干扰抑制电路如附录 B 中的图 B1 所示,图中 P 、 N 接互感器二次端口, P' 、 N' 接 FTU 端口, E 接地线。

图 B1 中滤波器电路包括 L 型滤波电路(共模滤波器)和 π 型滤波电路(差模滤波器),将其看成独立网络端口进行等效分解后如附录 B 中的图 B2 所示。

L 型滤波电路和 π 型滤波电路具有相同的传递函数,假设电感 L 的电阻为 R ,由运算方程得电路传递函数为:

$$A(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{\frac{1}{sC} I(s)}{\left(sL + R + \frac{1}{sC}\right) I(s)} = \frac{1}{s^2 LC + sRC + 1} \quad (3)$$

其频率特性为:

$$A(j\omega) = \frac{1}{j\omega RC + 1 - \omega^2 LC} \quad (4)$$

幅频特性为:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega RC)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \quad (5)$$

$$20 \lg A(\omega) = -20 \lg \sqrt{(\omega RC)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2} \quad (6)$$

设 $\omega < \frac{1}{RC}$, 当 $\omega \ll \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时,则有:

$$20 \lg A(\omega) = -20 \lg \sqrt{(\omega RC)^2 + 1} \approx 0 \quad (7)$$

当 $\omega \gg \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时,则有:

$$20 \lg A(\omega) \approx -20 \lg \sqrt{(\omega^2 LC)^2} = -20 \lg (\omega^2 LC) \quad (8)$$

由式(3)~(8)分析可知当 $\omega \gg \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时, $A(\omega)$ 会

大幅度地衰减,频率每升高 10 倍, $A(\omega)$ 将下降 20 dB。

根据电磁干扰信号为频率在几 MHz 到 30 MHz 之间的高频阻尼振荡波,又考虑到实际电路中电感和电容不能选得太大(电感太大会造成体积太大,电容太大将影响高频响应),因此根据试验结果以及结合实际情况最终选择电感 $L = 6 \text{ mH}$, 电容 $C_x = 0.22 \text{ }\mu\text{F}$, 电容 $C_y = 4.7 \text{ nF}$ 。增加滤波器装置后的电路示意图如图 12 所示。

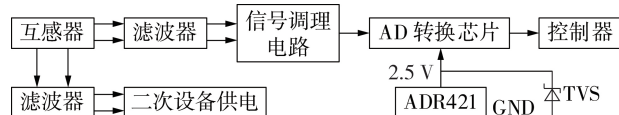


图 12 增加滤波器后电路结构图

Fig.12 Structure diagram after adding filter

增加 2 种保护措施后,在 40 kV 雷电冲击电压干扰下进行试验,对 FTU 互感器二次电压信号和基准

电压进行采集,典型的波形如图 13 和图 14 所示。由结果分析可知,在 FTU 互感器二次输入端产生的干扰电压正向峰值进一步下降到 500 V,反向峰值下降到 -500 V,基准电压的正向干扰峰值减少到 200 V,反向干扰峰值减少到 -200 V 左右;实测在 40 kV 雷电冲击电压的干扰下一二次融合成套开关设备测量准确度进行测量,误差变化数据如表 3 所示,可见测量的准确度得到了较好的提升。

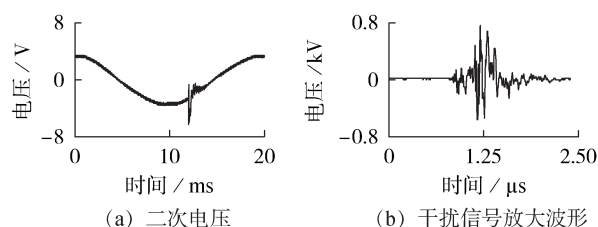


图 13 增加滤波器后互感器二次电压信号及干扰波形

Fig.13 Secondary voltage signal of transformer and interference waveform after adding filter

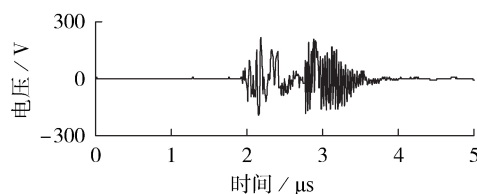


图 14 增加滤波器后基准电压输出波形

Fig.14 Output waveform of reference voltage after adding filter

表 3 增加滤波器后误差数据变化

Table 3 Error data change after adding filter

试验次数	比差变化/%		相差变化/(°)	
	FTU 输入端	FTU 输出端	FTU 输入端	FTU 输出端
1	0.305 19	0.767 69	5.912	8.296
2	0.320 92	0.419 91	6.640	7.064
3	0.289 61	0.578 87	6.912	9.072
4	0.310 23	0.609 63	4.368	9.696
5	0.356 81	0.526 94	6.640	8.696

4 结论

(1) 雷电冲击电压会导致一二次融合成套设备的测量准确度下降,随着雷电冲击电压幅值增加,测量准确度误差不断扩大,雷电冲击电压达到 40 kV 以上时超出国家电网对一二次融合成套开关设备的准确度要求。

(2) 雷电冲击电压波形会与互感器二次侧波形发生叠加,导致互感器二次侧信号波形畸变。雷电冲击电压发生时会产生强烈的电磁干扰,通过电缆传导到二次侧耦合出一个高频阻尼振荡波,幅值可达几千伏,频率在几 MHz 至 30 MHz 之间,其在基准电压端产生的干扰信号对 FTU 的 AD 采集模块的采集准确度产生较大影响。

(3)在基准电压端口增加TVS保护措施,可以将干扰信号强度降至原来的70%左右,比差和相差受干扰程度降至原来的80%左右;在此基础上进一步在互感器二次侧增加滤波装置,则可将干扰信号强度降至原来的20%左右,比差和相差受干扰程度降至原来的40%左右,测量准确度得到了较好的提升。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李红青,张志丹,朱吉然,等. 配电网新型二次融合成套设备测试方法研究[J]. 湖南电力,2018,38(2):47-52.
LI Hongqing, ZHANG Zhidan, ZHU Jiran, et al. Research on novel fusion equipments test method of primary and secondary in distribution network[J]. Hunan Electric Power, 2018, 38(2):47-52.
- [2] 李于达,王海燕,刘刚,等. 配电网中的馈电自动化技术发展综述[J]. 电网技术,2006,30(增刊1):242-245.
LI Yuda, WANG Haiyan, LIU Gang, et al. Summarization of feeder automation in distribution automation system[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement 1):242-245.
- [3] 鞠平,周孝信,陈维江,等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):2-11.
JU Ping, ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang, et al. “Smart Grid Plus” research overview[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5):2-11.
- [4] 程显,韩书谟,何周,等. 40.5 kV 环保型气体绝缘开关柜气室结构设计[J]. 高电压技术,2015,41(8):2772-2779.
CHENG Xian, HAN Shumo, HE Zhou, et al. Structure design of the chamber for 40.5 kV environment-friendly cubicle gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8):2772-2779.
- [5] 程显,陈占清,何周,等. 真空开关低分散性永磁操动机构控制系统设计[J]. 郑州大学学报(工学版),2017,38(3):58-62.
CHENG Xian, CHEN Zhanqing, HE Zhou, et al. Design of the low-dispersion control system for the permanent magnetic actuator of vacuum switch[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2017, 38(3):58-62.
- [6] 王玉峰,邹积岩,廖敏夫. 开关柜中电快速瞬变脉冲群耦合途径的研究及电磁隔离[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):102-105.
WANG Yufeng, ZOU Jiyang, LIAO Minfu. Coupling paths of EFT/B in switch cabinet and electromagnetic shielding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(8):102-105.
- [7] 王增平,姜宪国,张执超,等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(2):13-18.
WANG Zengping, JIANG Xianguo, ZHANG Zhichao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2):13-18.
- [8] 张一茗,李少华,金光耀,等. 电磁干扰对智能高压开关二次设备的影响研究[J]. 高压电器,2017,53(2):191-198.
ZHANG Yiming, LI Shaohua, JIN Guangyao, et al. Research of the effect of electromagnetic interference on secondary equipment in high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2):191-198.
- [9] 罗汉武,乐健,毛涛,等. ± 800 kV 特高压直流换流站二次设备回路传导电磁干扰特性[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):173-178.
LUO Hanwu, LE Jian, MAO Tao, et al. Conducted electromagnetic interference of secondary equipment circuit in ± 800 kV UHVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):173-178.
- [10] 胡蓓,冯翔翔,唐鹏,等. 浪涌干扰下电子式电压互感器的测量准确度研究[J]. 电测与仪表,2014,51(23):18-23.
HU Bei, FENG Xiangxiang, TANG Peng, et al. Measurement accuracy of EVT during the surge[J]. Electrical Measurement & Instrument, 2014, 51(23):18-23.
- [11] 赵军,陈维江,高飞,等. 变压器雷电冲击试验空间磁场对智能组件影响的计算分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3981-3990.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, GAO Fei, et al. Calculation and analysis of space magnetic field effect on intelligent components in transformer lightning impulse test[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14):3981-3990.
- [12] 张晓,余占清,罗兵,等. 雷电脉冲电磁场对电站敏感设备的电磁干扰[J]. 高电压技术,2014,40(6):1696-1702.
ZHANG Xiao, YU Zhanqing, LUO Bing, et al. Electromagnetic interference of lightning pulse electromagnetic field to sensitive equipment in power stations[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6):1696-1702.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 高压交流断路器型式试验标准:GB/T 1984—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [14] 吕建勋,袁海文,陆家榆,等. 直流特高压环境下数据采集系统的电磁防护技术[J]. 高电压技术,2013,39(12):2994-2999.
LÜ Jianxun, YUAN Haiwen, LU Jiayu, et al. Electromagnetic protection technology of data acquisition system in UHVDC environment[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12):2994-2999.
- [15] 曹更新,王芊,余荣云,等. 提高数字接口设备抗干扰性能的措施[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):124-126.
CAO Gengxin, WANG Qian, YU Rongyun, et al. Measures to improve anti-jamming performance of digital interface devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4):124-126.
- [16] 李清泉,牛亚民. 变电站开关操作引起的瞬变电磁场及其防护[J]. 高电压技术,2001,27(4):35-37.
LI Qingquan, NIU Yamin. The transient electromagnetic fields caused by the operation of disconnector in substation and protection[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):35-37.
- [17] HUANG Shangyuan, CHEN Jinmu, ZHANG Jinsong. Some operating experiences of 10 kV small signal EVT in Fengzhou digital substation[C]//2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. Yichang, China: IEEE, 2011: 6108-6110.
- [18] DHIA B. Towards an EMC roadmap for integrated circuits [C]//2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 8-11.

作者简介:



贺翔(1973—),男,河南南阳人,高级工程师,主要从事配电网研究及应用方面的工作;

赵海洋(1992—),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向为智能高压电器(E-mail:775165692@qq.com);

程显(1982—),男,河南平顶山人,

贺翔教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要从事高压断路器开断与电弧等离子调控技术、新型电力开关装备开发及其高可靠性应用等方面的研究工作(E-mail:chengxian@zzu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

(下转第224页 continued on page 224)

GB/T 20989—2007[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

- [16] 解婷,汤广福,郑健超,等. 高压直流晶闸管故障电流下反向电压特性的分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1): 140-146.

XIE Ting, TANG Guangfu, ZHENG Jianchao, et al. Analysis on reverse voltage characteristics of HVDC thyristor valves in the fault state[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 140-146.



张翔

要研究方向为高压直流输电、直流融冰等
(E-mail: zhangxiang@nrec.com);

黄华(1984—),男,江苏海门人,高级工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为晶闸管换流阀相关技术(E-mail: huanghua@nrec.com);

周晨(1989—),男,江苏海安人,工程师,硕士,主要研究方向为晶闸管换流阀相关技术(E-mail: zhouchen@nrec.com)。

(编辑 李莉)

作者简介:

张翔(1978—),男,安徽明光人,高级工程师,硕士,主

Operational test equivalent study of converter valve under different system frequencies

ZHANG Xiang, HUANG Hua, ZHOU Chen, ZHANG Zijing, SHI Yangyang, ZHENG Li

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

Abstract: The operational test of the converter valve is one of the key tests to ensure the steady and reliable operation of the converter valve. On the basis of loss compensation, the specific calculation method of equivalent parameters of operational tests under different system frequencies is deduced based on the equivalence principle of thyristor junction temperature. Taking Belo Monte phase II valve which is working in 60 Hz system for example, its operational test parameters in the domestic 50 Hz synthetic test system are calculated, and the temperature measuring test of the radiator table is carried out on the synthetic circuit to check the junction temperature of the thyristor. The test results prove the validity of the equivalent test method, which provides test guidance for subsequent domestic converter valve going overseas.

Key words: converter valve; operational tests; equivalent study; thyristor junction temperature; test parameters

(上接第219页 continued from page 219)

Impact of lightning impulse voltage on measuring accuracy of primary and secondary integration-set of distribution equipment

HE Xiang¹, ZHAO Haiyang², CHENG Xian², XU Mingming¹, ZHU Jianpeng², MA Jianwei¹

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to solve the reliability problem caused by the electromagnetic interference of the secondary equipment in PSIDE (Primary and Secondary Integration-set of Distribution Equipment), an anti-interference measuring system is designed. Based on the lightning impulse voltage test circuit and the anti-interference measuring system, the lightning impulse voltage interference test of the PSIDE is conducted, and the reason of the decline of its measurement accuracy is obtained by time-frequency domain analysis of the transformer voltage waveform. Two protection schemes are proposed. One is adding protection device in the feeder terminal reference unit and the other is adding filter device at the secondary output end of the transformer. The effect of the protection schemes are analyzed and tested. The results show that lightning impulse voltage is transmitted to the secondary equipment through transformer, which results in high coupling voltage at the secondary side of transformer. The peak value of the coupling voltage is up to several kilovolts while the frequency is arranged from several MHz to 30 MHz, which has a great impact on the accuracy of transformer. By adding high frequency filter device in outlet terminal of the secondary side of transformer, the peak value of the coupling voltage is effectively reduced, the interference signal intensity is reduced to 20% of the original value and the phase and ratio differences of the transformer are reduced to 40% of the original values.

Key words: lightning impulse voltage; primary and secondary integration-set; measuring accuracy; electromagnetic interference; secondary equipment; voltage transformer

附录 A



图 A1 试验装置实物图

Fig.A1 Physical diagram of test device

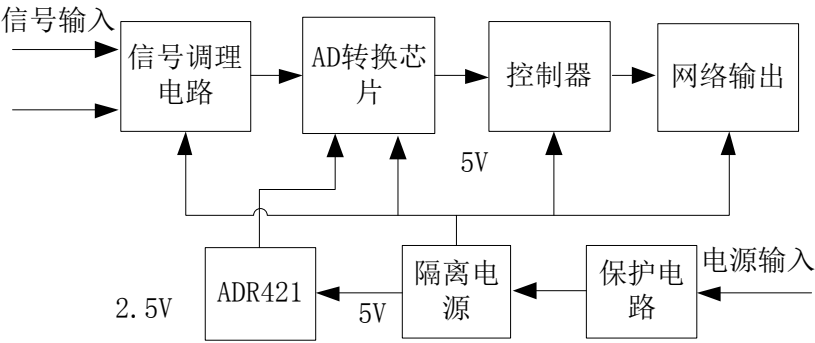


图 A2 FTU 采集单元结构图

Fig.A2 Schematic diagram of FTU acquisition unit structure

附录 B

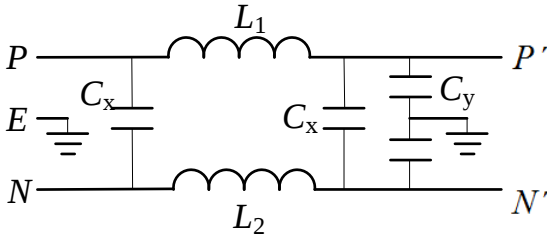
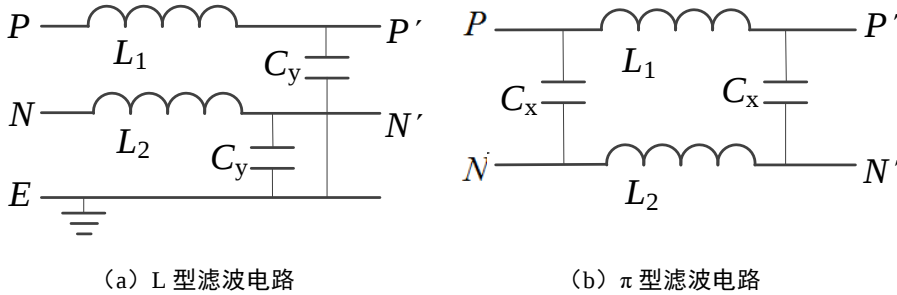


图 B1 滤波器电路原理图

Fig.B1 Circuit principle schematic of filter



(a) L 型滤波电路

(b) π 型滤波电路

图 B2 等效滤波器电路

Fig.B2 Equivalent filter circuit