

短路电流对二次设备电磁干扰分析及抗干扰措施

张 赢¹, 袁晓东^{2,3}, 曹春诚¹, 程 显^{2,3}, 朱剑鹏^{2,3}

(1. 国网呼伦贝尔供电公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021100; 2. 郑州大学电气工程学院, 郑州 450000; 3. 河南省输配电装备与电气绝缘工程技术研究中心, 郑州 450000)

摘要: 目前智能配电网的建设不断推进,加快了配电开关一二次设备相关技术的发展,也对长期处于复杂电磁环境下的二次设备提出了更高的要求。文中基于合成试验回路搭建了短路电流对配电开关二次设备电磁干扰试验平台,开展开断故障电流对相关干扰对成套设备的影响研究,分析干扰信号产生原因、频谱特性。针对干扰的特性设计一套抗干扰测量系统,利用 ATP-EMTP 模拟合成回路进行仿真分析并进行实际测试验证。结果表明:成套设备进行开断试验时,二次设备端口会受到较大的干扰。电流波形也会发生畸变,干扰电流的最高可到 26 A,且干扰电流受电流互感器磁饱和和退饱和的影响,通过增加抗干扰措施,二次设备输出准确度与之相比提升约 40%。本次的试验结果可为一二次融合成套设备中二次设备电磁兼容研究提供相关依据。

关键词: 一二次融合;电磁干扰;合成试验回路;暂态恢复电压;ATP-EMTP;二次设备

Analysis on Electromagnetic Interference of Short Circuit Current to Secondary Equipment and Research on Anti-interference Measures

ZHANG Ying¹, YUAN Xiaodong^{2,3}, CAO Chuncheng¹, CHENG Xian^{2,3}, ZHU Jianpeng^{2,3}

(1. State Grid Hulunbuir Power Co., Ltd., Inner Mongolia Hulunbeier 021100, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 3. Henan Power Transmission and Electrical Insulation Engineering Research Center, Zhengzhou 45000, China)

Abstract: At present, the construction of smart distribution network is continuously promoted, which speeds up the development of related technologies of primary and secondary equipment of distribution switch, and, however, higher requirement of the secondary equipment under the long term and complicated electromagnetic environment is put forward. In this paper, the test platform of the electromagnetic interference of short circuit current to the secondary equipment of distribution switch is set up on the basis of synthetic test circuit. The study on the influence of the related interference of the breaking fault current on the complete set equipment is developed, the reason of interference signal generation and also the spectrum characteristic are analyzed. As for the interference characteristic, a set of anti-interference measurement system is designed, the ATP-EMTP is used to simulate synthetic circuit for simulation analysis and actual test verification. The results show that in case of breaking test of the complete set equipment the secondary equipment port will be disturbed greatly. The current waveform will also be distorted, the maximum interference current can be up to 26 A and the interference current is affected by the magnetic saturation and desaturation of the current transformer. With addition of the anti-interference measures, the output accuracy of the secondary equipment is increased by about 40% over the previous one. The test result this time can provide related evidence for the electromagnetic compatibility study of the secondary equipment of the primary and secondary fusion complete set equipment.

Key words: primary and secondary fusion; EMI; synthetic test circuit; transient recovery voltage; ATP-EMTP; secondary device

收稿日期:2023-09-01; 修回日期:2023-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51977195, 51777025);河南省高校重点科研项目(16A470014, 19A470008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51977195, 51777025), Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan(16A470014, 19A470008).

0 引言

近年来,随着智能配电网建设的发展,智能配电设备需求量日益增加,开关本体与二次测量、控制智能组件的模块化、标准化和集成化发展增加了馈线自动化终端单元(feeder terminal unit, FTU)在瞬态电磁环境下的敏感性和脆弱性^[1-3]。一二次融合后二次设备长期工作于一次高压开关附近,其开断过程产生的高频瞬态电磁干扰会严重影响二次设备正常运行,造成信号串扰,甚至出现误动、拒动等故障现象,对一二次融合一体化发展提出新的挑战^[4-9]。

国内外在电磁干扰影响二次设备性能可靠性方面进行了大量研究。文[10-12]开展了10 kV柱上开关及开关柜合成回路试验,对采集信号进行小波分析得到二次设备干扰电压的频带及能量分布;文[13]研制了瞬态电磁骚扰测量系统,经过测试得出相关操作会在二次端口引起骚扰电压。现有研究大多针对高压开关操作在智能设备产生的电场及磁场大小进行测量,关于一二次融合设备实际开断过程对二次设备的影响研究较少^[14-23],因此,有必要对一二次融合成套设备开断过程引起的二次设备电磁干扰问题进行深入研究。

文中基于合成试验回路进行一二次融合成套设备开断特性试验,采集不同短路电流、燃弧时间及瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)下二次设备端口电流波形,提出在互感器二次侧加装保护器件及滤波装置的防护措施,并利用ATP-EMTP软件仿真分析及实际测试验证了方案的有效性。

1 试验电路

1.1 配电开关一二次融合中的传导耦合干扰

目前,配电开关一二次设备正处于成套化发展阶段。开关动作引起的高频干扰会通过电缆线侵入到馈线终端内部,由于测量及保护电流互感器(current transformer, CT)集成在固封极柱内部,具有良好的空间屏蔽效果,辐射干扰引起的影响较小,主要考虑流经互感器及二次设备的传导耦合干扰。等效转换电流传导电路见图1。干扰电流可以通过接地网阻抗、接地引线电感和寄生电容的作用传导到二次设备。

1.2 成套设备开断试验

试验采用35 kV/20 kA合成试验回路,采用电流引入法。高压合成试验电路图见图2。由于采用的是单极合成试验回路,故只将成套设备中C相接入回路进行测试,分别设置不同短路开断电流、燃弧时间及TRV幅值,利用FL2-A型超光分流器采集二次设备输出端电流信号,连接示意图见图3。该定值分流器可看作电流取样用的标准电阻器,由于

压降及电感值均较小,基本不会影响CT正常工作。

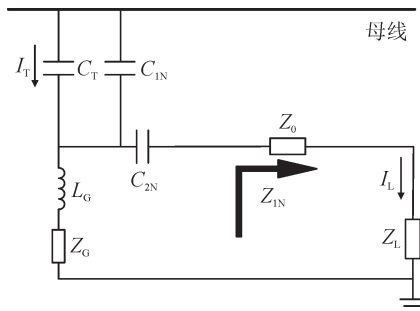
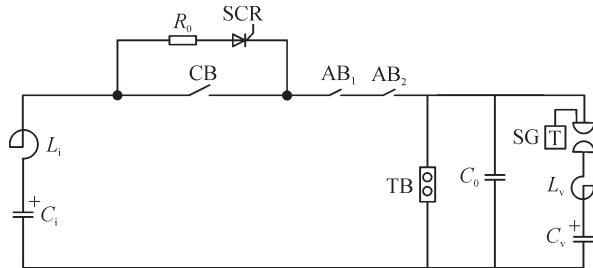


图1 暂态电流传导路径等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of transient current conduction path



AB₁、AB₂—保护开关; C₀—调频电容; SG—电压源点火球隙; C_v、L_v—电压源电容、电感。

图2 合成回路试验电路图

Fig. 2 Circuit diagram of synthetic test circuit

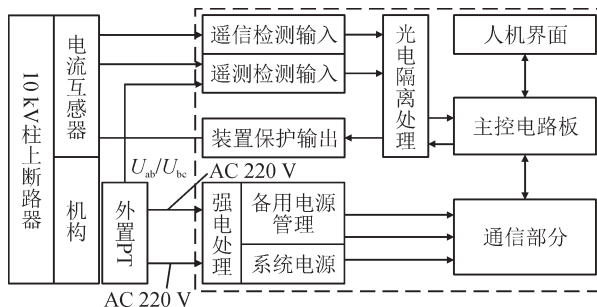


图3 测试电路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test circuit

试验过程中为防止断路器开断过程产生的强电磁干扰影响测试结果,将合成回路控制台通过光纤信号与FTU馈线终端控制部分协同配合,试验装置实物图见图4,回路具体参数见表1。

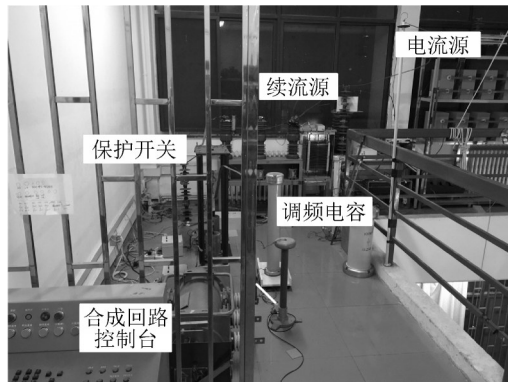


图4 测试电路实物图

Fig. 4 Physical diagram of test circuit

表1 合成回路试验参数

Table 1 Test parameters of synthetic circuit

参数	C_1/mF	L_1/mH	$C_2/\mu\text{F}$	L_2/mH	$C_0/\mu\text{F}$
数值	16.0	0.6	6.0	2.0	0.2

2 试验结果及分析

2.1 开断特性分析

在开断过程中,电流过零阶段会产生高频振荡电压出现明显波动,衰减振荡过程也可能增加二次设备的电磁干扰。由于单次燃弧过程中高频干扰幅值较小,频带较宽,可能在电流互感器上产生较高的过电压,并通过传输电缆传导到二次设备端口。因此,需要对断路器开断过程引起的干扰信号进行准确测量。

2.2 试验结果及分析

保持试品开关TB闭合,保护开关AB₁、AB₂合闸、CB分闸,将额定条件下FTU输出电流波形作为保护开关触头振动引起的开断干扰波形见图5。

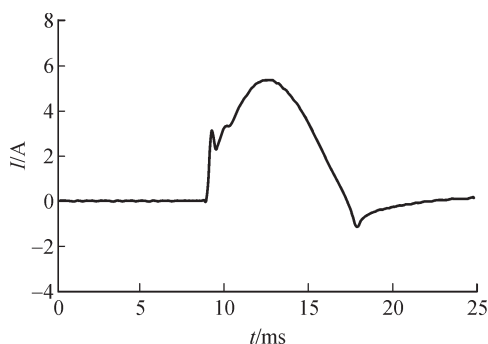


图5 FTU输出侧干扰波形

Fig. 5 Interference waveform on output side of FTU

工作在不同条件下时二次设备输出电流干扰波形,见图6-8。

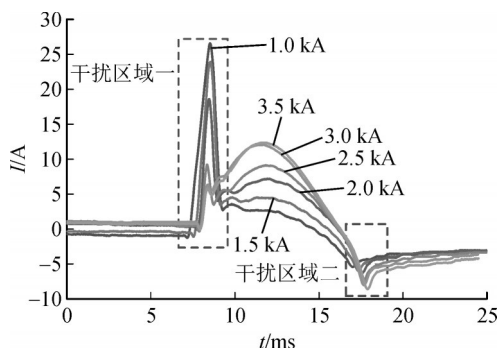


图6 不同开断电流下FTU输出侧干扰波形

Fig. 6 Interference waveform of FTU output side under different opening currents

在图6中,当短路电流逐渐增大时,尖峰干扰电流由26.2 A降低至5.3 A,原因是电磁互感器发生了磁饱和现象,试验中对干扰电流测量采用的是电磁

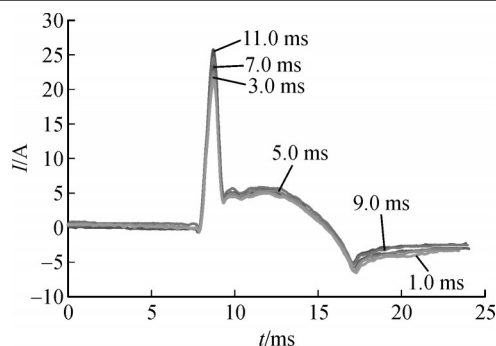


图7 不同燃弧时间下FTU输出侧干扰波形

Fig. 7 Interference waveform of FTU output side under different arc time

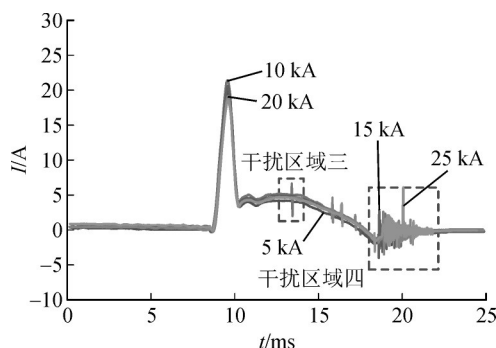


图8 不同TRV下FTU输出侧干扰波形

Fig. 8 Interference waveform of FTU output side under different TRV

式互感器,其额定电流为630 A,此电流互感器为测量元件不具有保护功能。当所测量的电流超过1 000 A时,将会发生磁饱和现象。当电流互感器发生磁饱和后,一次电流与二次电流不再成比例关系。电磁式电流互感器的工作原理与变压器基本相同,所以当CT的饱和程度越严重,励磁阻抗就会越小,励磁电流会极大的增大,使互感器误差成倍的增大,严重时会使一次电流变为励磁电流,造成二次电流为零的现象。因此在试验中,在1.0 kA到3.5 kA的短路电流下,电流越大CT磁饱和现象就会越严重,才会出现短路电流增大,而干扰电流峰值减少的现象。

在图6中的干扰区域二,开断电流越大时,干扰区域二的反向峰值电流越大,当电流由1~3.5 kA时,反向干扰电流从-5.1 A变化至-8.6 A;上述现象主要由于电流越大造成的电流互感器饱和程度越严重,而退饱和时反向峰值电流越大。

图7为保持短路电流为1.78 kA,调整TB燃弧时间得到的FTU输出端电流干扰波形。燃弧时间由1 ms增大至11 ms过程中,干扰波形变化较小且趋势一致,主要原因为短路电流注入能量保持不变,燃弧时间长短基本不会影响干扰电流幅值。

图8为不同幅值TRV条件下FTU输出端电流干扰波形。可以得出TRV由5 kV升高至25 kV过程中,区域三(燃弧阶段)干扰电流较小,说明TRV的引入对燃弧阶段电流信号影响较小;区域四(电流零点阶段)产生了高频干扰信号,干扰幅值及频率均逐渐增加,说明这一阶段二次设备比较容易受到TRV的强电磁干扰。

成套设备开断过程中FTU输出端在电流零点附近会出现较大干扰,电流波形出现明显畸变,且变化趋势保持一致,造成这种现象的原因为开断电流引入过程初期有较高的能量注入到馈线终端内部,由于缺少有效吸能电路,会在电流引入点附近出现持续时间为1 ms左右的电流跃变,但其侵入能量随即沿二次设备内部阻感元件迅速消散并使工作电流恢复正常状态。开断成功后触头两端会出现暂态恢复电压,但由于其能量扩散速度较快、持续时间较短,对馈线终端内部的信号采集、处理器件造成的干扰影响相对较弱,电流波形畸变现象不明显。

综上所述:成套设备开断过程中短路电流、燃弧过程中产生的振荡干扰频率明显增大,电流传输过程中干扰信号也会通过辐射及传导干扰作用在FTU信号采集端口,而二次设备内部结构复杂,干扰信号侵入后会造成其功能损坏。

3 二次设备干扰形成过程及抗干扰措施

3.1 FTU 采集原理及干扰形成过程分析

为了解决成套设备开断过程引起的电磁干扰问题,对馈线终端内部采集单元结构展开研究见图9,可以得到成套设备开断短路电流产生的电磁信号会在终端内部迅速传播。其中,AD采集芯片型号为AD7606,基准电压源为2.5 V,采集范围0~5 V。采集单元输入电压为DC 24 V,调理电路、AD转换芯片、DSP控制器、输出模块的供电均为5 V电源,并通过转换电路获取2.5 V的对比电压。

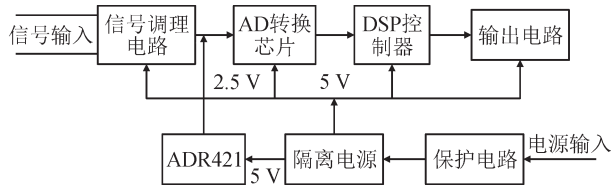


图9 采集单元结构示意图

Fig. 9 The schematic diagram of the acquisition unit

由采集单元结构可知:输入AD转换芯片的信号为调理电路输出电压与基准电压的叠加,而成套设备开断过程中产生的电磁干扰会通过互感器及

传输线传导到FTU造成基准电压波动,进而影响FTU内部核心控制器信号处理能力,造成输出侧电压偏移。因此,需要对AD转换芯片基准电压进行采集。

断路器开断过程中FTU内所承受的基准干扰电压见图10。正向干扰电压最高到达0.62 kV,反向干扰电压接近0.53 kV,干扰时间约为200 μ s,且振荡衰减趋势较为明显。对其进行傅里叶变换得到频谱特性见图11,可以得出干扰波形频率区间主要为高频分量,集中分布在0~20 MHz之间,且随频率增大干扰幅值迅速减弱。

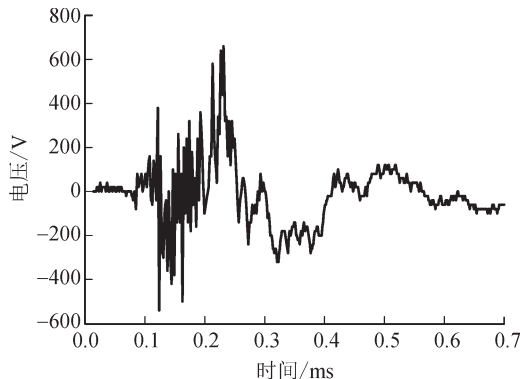


图10 开断条件下基准电压时域波形

Fig. 10 Time domain waveform of reference voltage under switching off condition

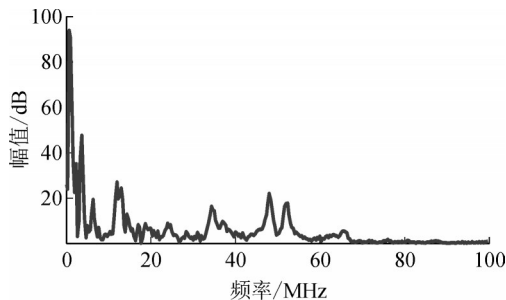


图11 开断条件下基准电压频域波形

Fig. 11 Frequency domain waveform of reference voltage under switching off condition

3.2 开断过程仿真测试

分析FTU工作原理和开断过程中干扰信号传播路径得出基准电压变化为馈线终端输出波形发生畸变的主要原因,由AD转换芯片的时域及频域波形可知干扰电压的频谱分布特性。基于上述试验结果,利用ATP-EMTP电磁暂态软件模拟成套设备实际开断过程,仿真电路模型见图12。其中, U 为系统交流电源, R_L 、 C_L 为线路等值参数, R_C 为模拟负荷阻抗, R_F 为短路等效阻抗。

正常工作时 K_1 为合闸状态,利用电阻器模拟触头间隙接触电阻,该支路为主干电流; K_2 闭合时发生短路故障, K_1 断开并通过可变电阻 R_{arc} 两端压降模

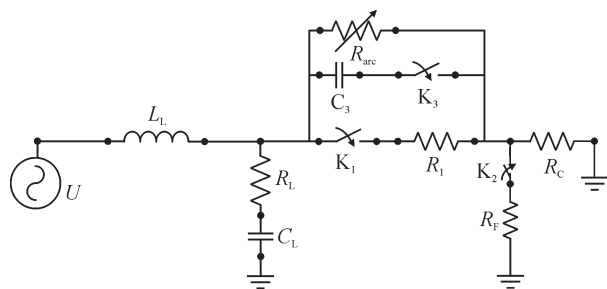


图12 仿真电路模型

Fig. 12 The model of simulated circuit

拟燃弧过程中触头弧压变化,并进行迭代运算;主电流过零时 K_3 闭合,电容 C_3 为成套设备断开后的等效电容。

开断电流波形见图13,当间隙电压低于介质击穿电压时,分断成功,满足国标和后续试验要求。

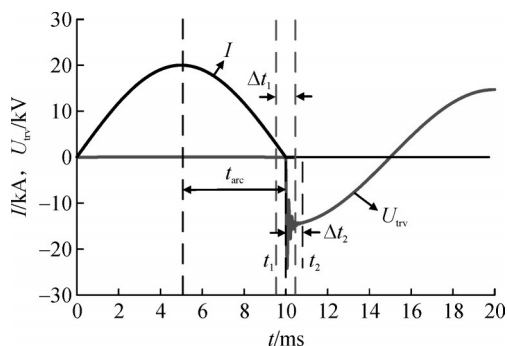


图13 开断过程仿真波形

Fig. 13 Simulation waveform of interruption process

3.3 抗干扰信号测量系统设计

为了提高信号采集过程的准确度,设计的抗干扰信号测量系统见图14。为了减弱射频干扰和杂散电容信号对测量系统的影响,采集信号均经过光纤隔离采样系统进入TPS2024B四通道200 MHz数字示波器。图14中的金属屏蔽装置内部共有3部分组成,分别为:检测部件、转换部分、及电源部件。3部分的相互配合共同组成了整个屏蔽系统。

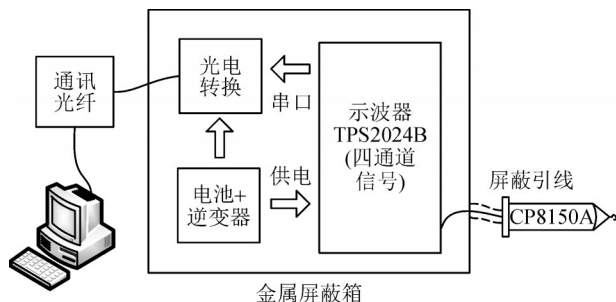


图14 信号测量系统组成示意图

Fig. 14 Diagram of signal measurement system

3.4 抗干扰措施仿真及试验测试

为了抑制成套设备开断过程中高频干扰对电子式互感器及由电缆连接的二次设备内部电路的影响,考虑在采集单元输入端接入低通滤波装置及

TVS管对高频信号进行滤波处理。

一般情况下差模干扰频谱分布主要集中在1 MHz以内,由于成套设备开断过程产生的干扰信号频谱分布在0~20 MHz,差模信号成分较低。考虑到触头间电弧能量会以传导及辐射方式在二次设备产生共模干扰,并通过不对称电流转换为差模干扰,影响测控信号正常工作,甚至造成器件损坏,采用的低通滤波电路原理见图15,包括共模滤波结构(L型)和差模滤波结构(π 型),等效分解后的电路模型见图16。

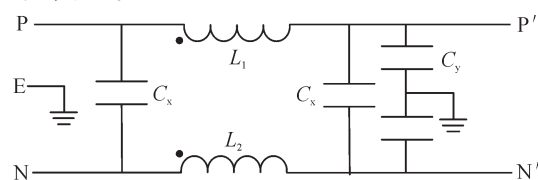
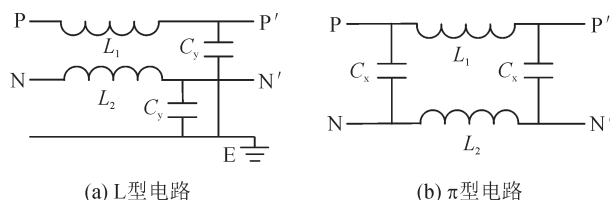


图15 滤波电路原理图

Fig. 15 Filter design circuit diagram



(a) L型电路

(b) π 型电路

图16 等效滤波电路

Fig. 16 Equivalent filter circuit

π 型滤波器由C型滤波器和RC型滤波器组成,当差模信号流入时先经过 C_x 滤波,再进入由 L_1 、 L_2 和 C_x 构成的滤波电路中进一步对交流成分进行滤除。假设电感阻值为 R ,由分压原理可以得到共模滤波电路传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{LC_s^2 + RC_s + 1} = \frac{1}{-\omega^2 LC + j\omega RC + 1} \quad (1)$$

式(1)中,幅频特性和相频特性为:

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

$$\varphi(\omega) = -\arctan\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right) \quad (3)$$

为了表示频率在较大范围内变化时电路特性的变化,幅频特性可以表示为

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = -20 \lg \sqrt{(\omega RC)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2} \quad (4)$$

在低频时,即 $\omega^2 LC \ll 1$, $\omega \ll \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时,可得

$$L(\omega) = -20 \lg \sqrt{(\omega RC)^2 + 1} \approx 0 \text{ dB} \quad (5)$$

在高频时,即 $\omega^2 LC \gg 1$, $\omega \gg \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时,则有

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

由式(1)–(6)并根据额定电流及漏电流安全规范,电感值过大会造成二次设备内部场强增大,电容值过大会影响高频响应,综合考虑干扰信号频段及滤波能力确定电感 L_1 、 L_2 为6 mH,电容 C_x 、 C_y 为0.22 μ F、4.7 nF。

当较大的冲击干扰TVS管时,可以迅速改变被保护器件两端的瞬变大电流,将电压钳位在预设值。由于输出电压额定值为2.5 V,选择保护电压为3.3 V的TVS管,等效仿真模型见图17。

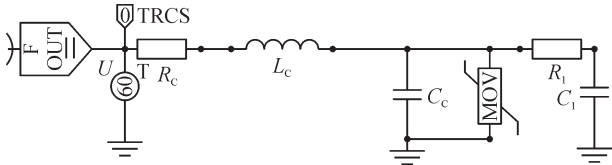


图 17 电流互感器仿真模型

Fig. 17 Simulation model of current transformer

在开断电流为1.78 kA条件下进行仿真测试,分布采集有、无干扰防护措施下互感器二次侧电流信号,对仿真干扰波形进行放大见图18、19。可以得到:加入滤波装置后正向干扰电流峰值由21.3 A下降到0.4 A左右,反向干扰电流由-28.2 A下降到-2.0 A左右,且干扰频率明显降低。

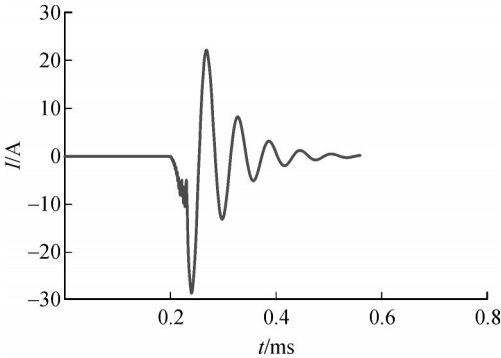


图 18 电流互感器仿真测试波形

Fig. 18 Current transformer simulation test waveform

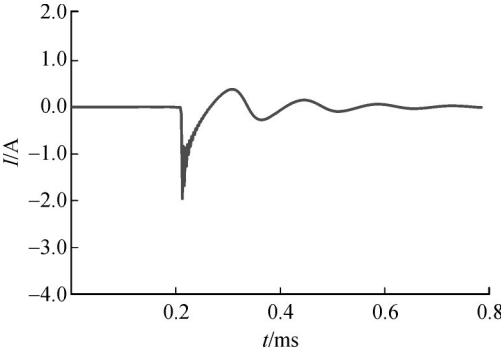


图 19 增加TVS管与滤波器后试验波形

Fig. 19 Simulated waveforms of TVS tubes and filters

基于上述仿真测试结果,实际测试过程中在馈

线终端采集单元输入端接入滤波装置及TVS管对高频信号进行滤波处理,同时采集基准电压输出波形进行对比,得到典型波形见图20,结果表明干扰电压正向峰值降低到220 V左右,反向峰值降低至-180 V左右,且干扰频率分量明显减少,FTU输出端波形畸变程度也得到明显改善。

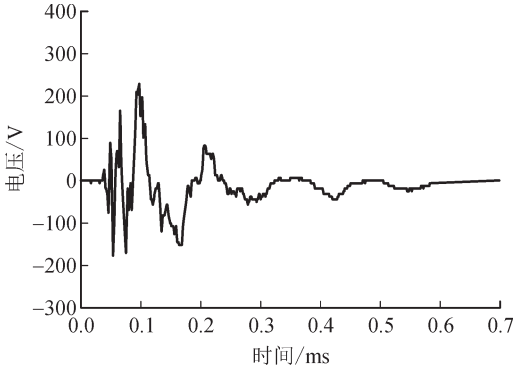


图 20 增加抑制措施后基准电压输出波形

Fig. 20 Output waveform of reference voltage after adding suppression measures

接入滤波装置的前后分别进行对比试验,对其进行得到对比见表2。结果表明:断路器开断短路电流产生的干扰波经防护措施抑制后传导到电流互感器的比差值明显减小,基本维持在0.8%以下,进一步证明了该抗干扰防护措施的有效性和可靠性。

表 2 加入抑制措施后电流互感器比差值变化

Table 2 The variation of ratio difference of current transformer after inhibiting measures

试验编号	防护前比差值变化/%	防护后比差值变化/%
1	1.154	0.314
2	1.209	0.578
3	1.083	0.423
4	1.116	0.764
5	0.968	0.509
6	1.212	0.829

4 结论

文中基于合成试验回路进行配电开关一二次融合成套设备开断特性对二次设备电磁干扰研究,主要得到以下结论:

1)成套设备开断过程中短路电流增大会造成电流引入点干扰电流由26.2 A降低至5.3 A,电流零点反向干扰电流从-5.1 A变化至-8.6 A;燃弧时间变化不会产生额外干扰现象,这主要是电流互感器磁饱和和退饱和作用的影响;TRV对触头燃弧阶段影响较小,但在电流零点附近会产生高频瞬态干扰。

2)分析采集单元原理及结构得出一二次融合成

套设备开断过程产生的强电磁干扰会通过互感器及电缆传导到二次设备耦合出高频振荡波,造成FTU内部基准电压波动,正向干扰电压峰值约为0.65 kV,反向干扰电压峰值可达0.55 kV,频带分布在0~20 MHz之间,进而影响到AD采集芯片测量准确度。

3)接入抗干扰措施的仿真结果表明设计的抗干扰防护措施可将干扰电流降低至20%以下,基准电压干扰波形得到有效改善,测试过程中电流互感器比差值准确度提高约40%,干扰信号幅值及频率均得到显著抑制。该试验结果为配电开关一二次融合成套设备中二次设备抗电磁兼容研究提供参考依据。

参考文献:

- [1] 温英才.变电站二次系统电磁干扰与预防措施研究[D].北京:华北电力大学,2015.
WEN Yingcai.Research on EMI and preventive measures of substation secondary system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [2] 雷 杨,杨 帆,沈 煜,等.基于一二次深度融合的多智能体FTU研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(9):152-162.
LEI Yang, YANG Fan, SHEN Yu, et al.A multi-agent FTU based on deep-merging of primary and secondary equipment [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 152-162.
- [3] 郭上华,王 钢.融合FTU和配变告警信息的有源配网故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):92-99.
GUO Shanghua, WANG Gang.An active distribution network fault location method based on FTU and transformer alarm information[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22):92-99.
- [4] 陈国炎,李俊均,陈 颖,等.数据驱动的配电开关设备交互式诊断平台[J].电工电能新技术,2019,38(3):10-17.
CHEN Guoyan, LI Junjun, CHEN Ying, et al.Data-driven and interactive fault diagnosis of distribution switches[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(3):10-17.
- [5] 陈昶文,王少宁,徐恒通.高频变压器介质阻挡放电现象实验研究[J].电工电能新技术,2020,39(11):18-24.
CHEN Changwen, WANG Shaoning, XU Hengtong.Experimental study on dielectric barrier discharge of high frequency transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(11):18-24.
- [6] 汪 涛,骆仁松,文继峰,等.基于辅助绕组的高频变压器绕组损耗测量方法[J].电工技术学报,2022,37(10):2622-2630.
WANG Tao, LUO Rensong, WEN Jifeng, et al. A measurement method of winding loss for high-frequency transformer based on auxiliary winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10):2622-2630.
- [7] 胡云枫,杨芷宁,李 超,等.电磁继电器电磁辐射特性的试验研究[J].电工电能新技术,2020,39(3):49-54.
HU Yunfeng, YANG Zhining, LI Chao, et al. Study on electromagnetic radiation characteristics of electromagnetic relay[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(3):49-54.
- [8] 欧阳子卿,杜志叶,黎 鹏,等.封闭容器内部短路燃弧特性及电弧电压计算[J].电力自动化设备,2018,38(11):155-161.
OUYANG Ziqing, DU Zhiye, LI Peng, et al. Internal arcing characteristic and arc voltage calculation in closed container[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 155-161.
- [9] 叶 海,李彩云,任旭超,等.变电站二次电缆瞬态电磁骚扰的特征统计方法与不确定度分析[J].电力系统保护与控制,2023,51(15):166-174.
YE Hai, LI Caiyun, REN Xuchao, et al.Statistical analysis method and uncertainty of transient electromagnetic disturbance measured on secondary cables in substations[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 166-174.
- [10] 赵 军,陈维江,张建功,等.冲击试验对屏蔽电缆电磁骚扰的计算分析[J].高电压技术,2015,41(11):3775-3782.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jiangong, et al.Calculation and analysis of electromagnetic disturbance of shielded cables by impact test[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11):3775-3782.
- [11] 张建功,赵 军,谢鹏康,等.VFTO作用下电子式电流互感器二次端口电磁特性仿真分析[J].电工技术学报,2015,30(s2):88-94.
ZHANG Jiangong, ZHAO Jun, XIE Pengkang, et al. Simulation and analysis of electromagnetic properties at the secondary port of electronic current transformers under very fast transient overvoltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(s2):88-94.
- [12] 黎 鹏,黄道春,阮江军,等.柱上开关开断对二次智能设备的电磁干扰研究[J].电工技术学报,2015,30(8):27-37.
LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. The EMI study of pole-mounted switch's breaking on its secondary smart devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8):27-37.
- [13] 葛国伟,程 显,谢 伟,等.弧后电流测量装置电流转移特性试验研究[J].高电压技术,2019,45(3):950-958.
GE Guowei, CHENG Xian, XIE Wei, et al. Experimental research on vacuum arc current commutation of post arc

- current measure equipment[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 950-958.
- [14] 赵 军, 陈维江, 张建功, 等. 智能变电站二次设备对开关瞬态的电磁兼容抗扰度要求分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1687-1695.
- ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jiangong, et al. Analysis on electromagnetic compatibility immunity requirements for secondary equipment during switching transient operations in intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1687-1695.
- [15] 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 Engineering, 2017, 53(2): 191-198.
- [16] 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 the influence of space magnetic field on intelligent components in transformer lightning impact test [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3981-3990.
- [17] 刘志恒, 段雄英, 廖敏夫, 等. 电子式电流互感器电磁抗干扰仿真与测试[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 994-999.
- LIU Zhiheng, DUAN Xiongying, LIAO Minfu, et al. Simulation and test of electromagnetic interference with electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 994-999.
- [18] 吴恒天, 焦重庆, 崔 翔, 等. GIS变电站开关操作引起的二次设备端口电磁骚扰模拟实验及分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3387-3395.
- WU Hengtian, JIAO Chongqing, CUI Xiang, et al. Analysis and simulated experiment for port disturbance voltage due to switching operation in GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3387-3395.
- [19] 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(8): 102-105.
- WANG Yufeng, ZOU Jiyan, LIAO Minfu. Research on the coupling way of electric fast transient pulse group and electromagnetic isolation in switchgear[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008(8): 102-105.
- [20] 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. China: IEEE, 2011: 6108-6110.
- [21] 程 显, 葛国伟, 杨培远, 等. 基于真空断路器与SF₆断路器串联的新型混合式高压直流断路器理论分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 68-74.
- CHENG Xian, GE Guowei, YANG Peiyuan, et al. Theoretical analysis of novel hybrid HVDC circuit breaker based on a series of vacuum interrupter and SF₆ interrupters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 68-74.
- [22] BURGER D, ENBOHLEN S, KÖHLER W. Impact of multiple restrikes at vacuum circuit breakers on the EMC of medium voltage switchgear[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. Italy: IEEE, 2012: 1-6.
- [23] BAJRAMOVIC Z, TURKOVIC I, MUJEZINOVIC A, et al. Overvoltages in secondary circuits of air-insulated substation due to disconnector switching[C]//2012 IEEE International Conference on Power System Technology. New Zealand: IEEE, 2012: 1-4.

张 赢(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 337263649@qq.com)。

程 显(1982—), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为开关设备与绝缘技术(E-mail: chengxian@zzu.edu.cn)。