

文章编号:1671-6833(2020)04-0074-07

雷电冲击对一二次融合成套开关电磁干扰研究

程 显<sup>1,3</sup>, 朱剑鹏<sup>1,3</sup>, 赵海洋<sup>1,3</sup>, 袁晓东<sup>1,3</sup>, 贺 翔<sup>2</sup>, 徐铭铭<sup>2</sup>

(1.郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001; 2.国网河南省电力公司 电力科学研究院,河南 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,河南 郑州 450000)

摘 要: 配电开关一二次设备标准化、集成化发展对长期处于复杂电磁环境下的二次设备可靠运行提出了更高要求。搭建雷电冲击电压试验平台,采集电压互感器二次侧、馈线终端输入及输出电压信号,分析得到冲击电压引起的二次设备端口电磁干扰频谱分布,并设计滤波方式对其进行有效抑制。结果表明:雷电冲击对电压互感器、馈线终端均会产生瞬态高频电磁干扰,辐射耦合引起的干扰电压峰值约为 3 kV,频带为 3.6~16.4 MHz。传导耦合引起的干扰电压峰值约为 4.5 kV,频带主要分布在 1.2~6.7 MHz、12.5~20 MHz。加入滤波装置后正负向干扰电压峰值降低均超过 23%,且未发生故障现象。该试验结果为一二次融合配电开关二次设备电磁兼容研究提供参考。

关键词: 一二次设备;雷电冲击电压;馈线终端;频谱分布;抗电磁干扰

中图分类号: TM835 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.04.006

0 引言

随着一二次融合配电开关一体化发展,设备的智能化成为当今电网发展的主要趋势,一次高电压设备与二次测控设备的集成化,增加了二次设备对瞬态干扰的敏感性和脆弱性<sup>[1]</sup>。相比于传统开关设备,将二次设备放置到现场一次设备附近可能使其受到雷电过电压干扰,破坏设备的绝缘特性<sup>[2-3]</sup>。

配电开关一二次设备一体化进程不断加快,融合产品的电磁兼容性能问题日益突出,国内研究者主要对高压开关操作引起的二次设备瞬态电磁特性进行了研究,并提出了相应的抗干扰措施<sup>[4]</sup>。文献[5-8]通过 10 kV 柱上开关及开关柜开断过程对二次智能设备的电磁干扰进行研究,得到干扰信号的频带及能量分布情况;文献[9]在 252 kV 智能气体绝缘金属封闭开关(gas insulated switchgear, GIS)开合母线充电电流试验中,对二次设备上产生的电磁干扰进行了测量,耦合电压超过 1 kV;文献[10]中对变电站隔离开关及断路器操作引起的二

次回路干扰电压测量表明其主频为 1~4 MHz,且幅值不高于 1 kV;文献[11-13]中研制了瞬态电磁干扰测量系统,得到开关动作引起的二次设备电磁干扰特征,试验表明最大共模干扰幅值接近 2 kV。国内外对一二次融合配电开关二次设备电磁兼容的研究较少,且主要是针对高压开关操作对二次回路产生的电磁场进行测量<sup>[14-15]</sup>。

笔者搭建了雷电冲击试验平台,利用信号屏蔽测量装置采集电压互感器(potential transformer, PT)二次侧、馈线终端(feeder terminal unit, FTU)输入及输出侧电压信号,得到冲击电压下二次设备产生的干扰电压,对结果进行频谱分析,得到干扰电压频带分布,并设计滤波方式进行有效抑制,为配电开关一二次融合设备抗电磁干扰改进研究提供参考。

1 雷电冲击电压试验测试

1.1 雷电干扰传播路径

当雷电直击输电线路或杆塔时,由于直击雷过电压和感应雷过电压的作用,传输线路上产生

收稿日期:2020-01-20;修订日期:2020-05-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777025);中国博士后科学基金项目(2017M622370);河南省高校重点科研项目(19A470008);国家轨道交通电气化与自动化工程技术研究中心开放课题(NEEC-2017-B07)

作者简介:程显(1982—),男,河南郑州人,郑州大学教授,博士,主要从事开关设备与绝缘技术研究,chengxian@zzu.edu.cn。

的高频雷电波经一次设备侵入到变电站母线,部分干扰信号通过设备杂散电容传入控制电缆,另一部分则会耦合至二次电缆屏蔽层产生足够强度的感应过电压,图 1 为雷电干扰传播至母线的路径示意图。

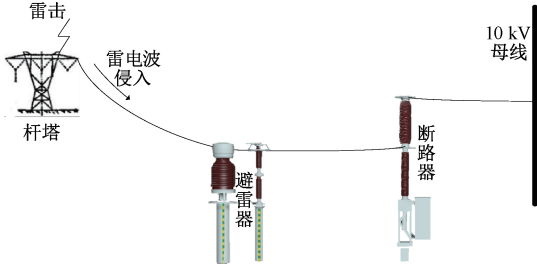


图 1 雷电干扰传播路径示意图

Figure 1 Schematic diagram of lightning interference propagation pathway

雷电波传导到母线上会产生高频振荡波,图 2 为雷电干扰传播路径等效电路图,当母线暂态电压  $U_B$  作用于电压互感器一次侧时,干扰电压将通过接地网阻抗、接地引线电感和寄生电容的作用传导到二次设备。图中  $C_T$  为互感器套管电容; $L_G$  为引线电感; $Z_G$  为接地阻抗; $C_{1N}$ 、 $C_{2N}$  为互感器一次侧、二次侧与屏蔽层之间的寄生电容; $Z_0$  为二次回路电缆波阻抗; $Z_L$  为二次回路电缆负载阻抗。

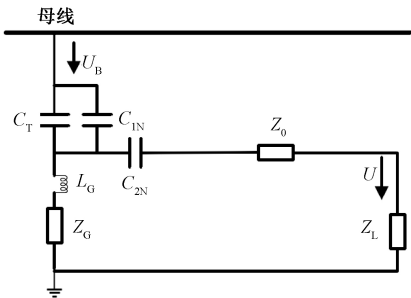


图 2 雷电干扰传播路径等效电路图

Figure 2 Equivalent circuit diagram of lightning interference propagation path

1.2 试验装置及参数

雷电冲击试验原理如图 3 所示。图中,  $T$  为调压器; $r$  为保护电阻; $D_1$  为高压硅堆; $R$  为充电电阻; $C_1$ 、 $C_2$  为主电容; $g_1$  为点火球隙; $g_2$  为中间球隙; $g_0$  为隔离球隙; $R_1$  为放电电阻; $R_f$  为波前电阻。

雷电发生装置为 CJDY-200 型冲击电压发生器,额定电压为 100 kV,PT 为 JDZW-10R 型电压互感器,变比为 10 kV/0.1 kV,准确等级 0.5 S。按照雷电冲击电压发生器试验标准及变电站雷电波侵入引起电磁干扰的等效性要求设定试验参数

见表 1。

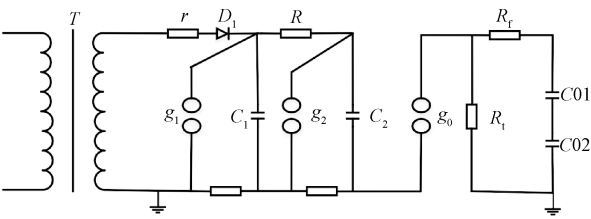


图 3 雷电冲击试验原理图

Figure 3 Schematic diagram of lightning impulse test

表 1 电压发生器参数

Table 1 Voltage generator parameters

波头时间 $t_1/\mu s$	波尾时间 $t_2/\mu s$	分压电容 $C_0/pF$	效率 $\eta/\%$
1.4	51	1 000	91.6

通常情况下,雷电冲击试验系统包括如图 4 所示 5 个基本部分。利用控制系统调整雷电冲击电压幅值,产生的瞬态干扰电压通过连接在母线上的设备传导到二次设备,并利用测量装置采集端口电压干扰波形,最后上传到主控系统。

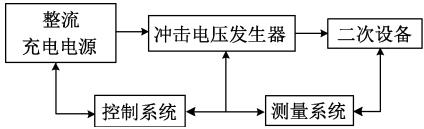


图 4 雷电冲击试验系统

Figure 4 Lightning impulse test system

由于馈线终端通过连接电缆对高压开关设备进行信号采集测量及远程操控,瞬态干扰可能通过电磁波耦合或近场耦合、电缆传导至二次设备造成故障。根据 GB 3906—2006 对 10 kV 高压开关设备冲击电压试验要求,相对于地、相间和断口间应分别承受 75、85 kV 的雷电冲击电压,试验中选取辐射干扰电压峰值为 100 kV,传导干扰电压峰值为 70 kV,初始电压设置为 20 kV,并以 10 kV 的梯度递增方式施加到一二次融合配电开关的断路器高压端子位置,试验装置实物连接如图 5 所示。

1.3 抗干扰电压信号测量系统

抗干扰电压信号测量装置如图 6 所示,由高压探头、数字示波器、逆变器、隔离变压器、光电转换器和屏蔽箱等部分组成,利用频率为 75 MHz 的 Tek6015A 无源高压探头采集各端口电压信号。

为了减弱射频干扰和杂散电容信号对测量装置的影响,所有采集信号均经过光纤隔离采样系统进入泰克 TPS2024B 四通道 200 MHz 带宽数字

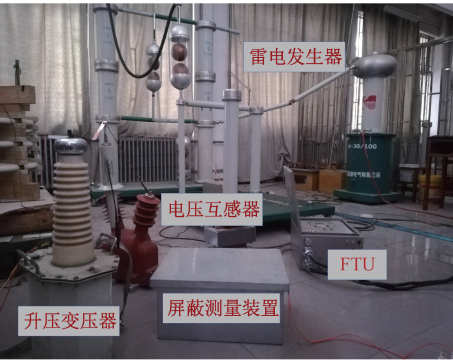


图 5 试验装置实物图

Figure 5 Physical chart of the test device

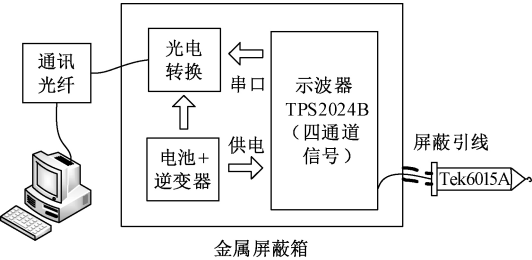


图 6 信号测量系统组成示意图

Figure 6 Diagram of signal measurement system

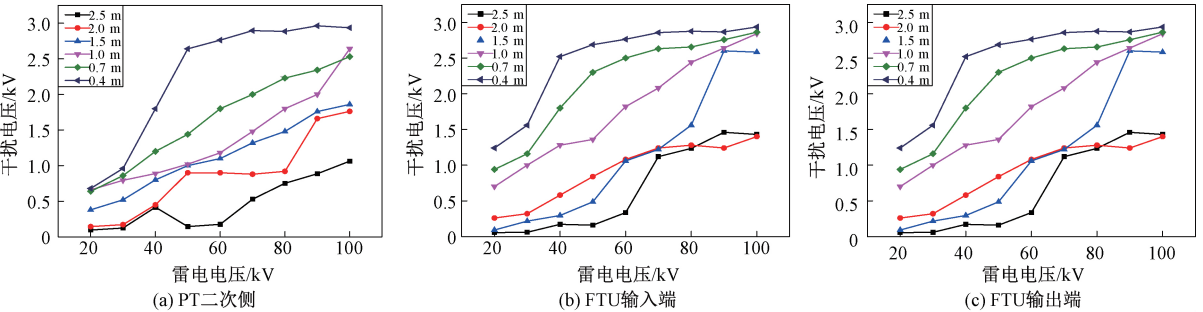


图 7 雷电波辐射耦合下端口干扰电压峰值

Figure 7 Peak value of interference voltage under the coupling of lightning wave and radiation

落,但整体仍呈上升趋势。

在雷电冲击电压等级相同的情况下,当冲击电压距离断路器端子 2.5 m 时,干扰电压也会随着雷电电压等级的升高逐渐增大,但基本维持在 1 kV 左右。试验过程中,随着距离的不断减小,当冲击电压距离缩短到 0.4 m 时,3 个端口辐射电压峰值均出现明显跃变,且各电压等级下的雷电干扰电压均达到最大值。可以得出:磁场强度随雷击距离的减小明显增大,各端口受到的干扰电压峰值也明显增大,甚至会对二次设备的测量控制功能产生影响。

图 8 为不同雷电波幅值辐射耦合下的 FTU 输入端电压时域及频域波形,其中图 8(a)为雷电波辐射干扰下 FTU 输入端干扰电压波形,可以得出 PT 二次侧输出电压正弦波有效值为 100

示波器。屏蔽箱体有效防止外部空间的电磁干扰进入箱内,干扰示波器端口信号,电池和逆变器组成的供电系统有效避免了空间电磁干扰沿电源线进入示波器内。在屏蔽箱内加装的光电转换装置能够将示波器测量的电信号转换为光信号,由光纤传输至远端的测量、控制装置,再次经过光电转换成为计算机可以直接识别处理的电信号。

2 试验结果

2.1 雷电波辐射干扰试验

图 7 为雷电波辐射干扰条件下馈线终端处于不同水平距离及冲击电压等级下的正向辐射干扰电压峰值折线图。其中,试验距离变化范围为 0~2.5 m,试验电压变化范围为 20~100 kV。

由图 7 可知,雷电冲击电压为 20 kV 时,PT 二次侧、FTU 馈线终端输入及输出端的正负向辐射干扰电压峰值基本保持在 1 kV 以内,当雷电干扰电压升高到 100 kV 时,各端口的正负向辐射干扰电压峰值最大可以达到 3 kV 左右,且随着冲击电压等级的升高,干扰电压会出现一定程度的跌

V,周期为 20 ms,且雷电电压干扰下输入波形发生明显畸变;图 8(b)为对应图 8(a)中 12.5 ms 左右波形畸变位置的局部放大图,观察可知,雷电冲击电压的侵入会使正常工作电压波形出现高频振荡干扰,其电压峰值约为 1.25 kV,干扰时间约为 2 μs,但很快衰减甚至消失。主要原因是二次设备内部存在较为复杂的阻感电路,而这些器件会对瞬态干扰波形具有较好的抑制作用;图 8(c)为经傅立叶变换得到的频谱特性,干扰频带主要分布在 3.6~6.4 MHz。其中,二次设备输入端产生的高频振荡可能是雷电冲击电压下降引起的,低频振荡与二次设备内部的阻抗、导纳有关。

2.2 雷电波传导干扰试验

图 9 为传导耦合试验中不同冲击电压下正负

向干扰电压峰值折线图,根据高压交流断路器雷电冲击试验要求设置试验电压范围为 20~70 kV。

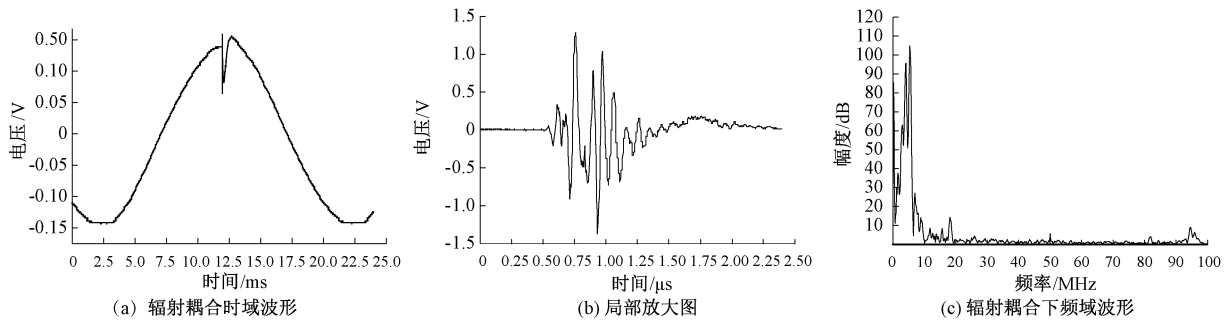


图 8 雷电波辐射耦合下 FTU 输入端电压波形

Figure 8 Waveform of FTU input voltage under radiation coupling of lightning waves

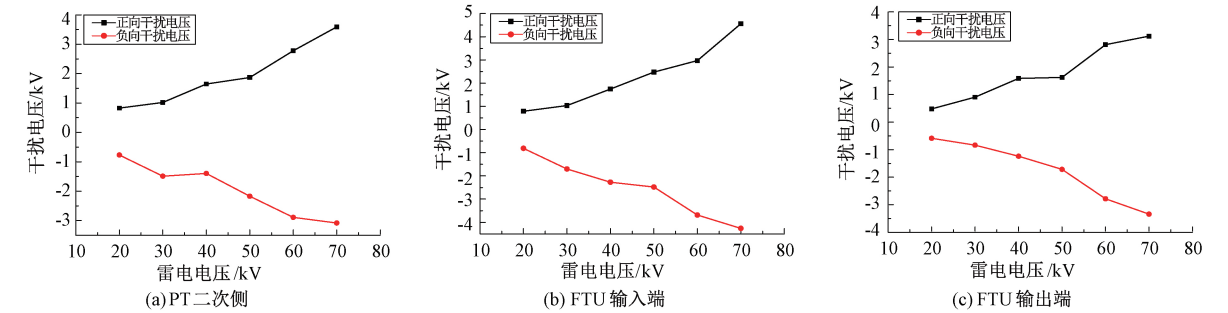


图 9 雷电波传导耦合下端口干扰电压峰值

Figure 9 Peak value of port interference voltage under lightning wave conduction coupling

由图 9 可知,干扰电压峰值与雷电冲击电压等级呈正相关,当冲击电压为 20 kV 时,PT 二次侧、FTU 馈线终端输入及输出端正负向干扰电压峰值均处于 0.9 kV 以内,当冲击电压升高到 70 kV 时,FTU 输入端正向干扰电压可达 4.5 kV,PT 二次侧及 FTU 输出端干扰电压也均处于 3 kV 以上或-3 kV 以下,且明显高于对应电压等级下的空间辐射耦合干扰电压峰值。

图 10 为不同雷电波幅值传导耦合下的 FTU 输入端电压时域及频域波形,其中图 10(a)为雷电波传导耦合下 FTU 输入端干扰电压波形,可以得出 PT 二次侧输出电压正弦波有效值为 100 V,周期为 20 ms,电压波形也发生了畸变;图 10(b)

为对应图 10(a)中 12.5 ms 左右波形畸变位置的局部放大图,观察可得雷电冲击电压的侵入会使正常工作电压波形出现高频振荡干扰,其电压峰值约为 1.45 kV,干扰时间约为 1.5  $\mu$ s,持续时间较短的主要原因也是二次设备内部存在较为复杂的阻感器件对瞬态干扰波形具有较为明显的抑制作用;观察可得干扰峰值为 1.45 kV 左右,干扰时间约 1.5  $\mu$ s;图 10(c)为经傅立叶变换得到的频谱特性,干扰频带主要分布在 1.2~6.7 MHz、12.5~20 MHz 之间。传导耦合下雷电冲击电压直接侵入 PT 电压互感器一次侧,干扰电压波形相比于辐射耦合更为密集,且干扰电压幅值更高。由时域及频域波形可知:传导试验造成的瞬态干扰信号频带分布较

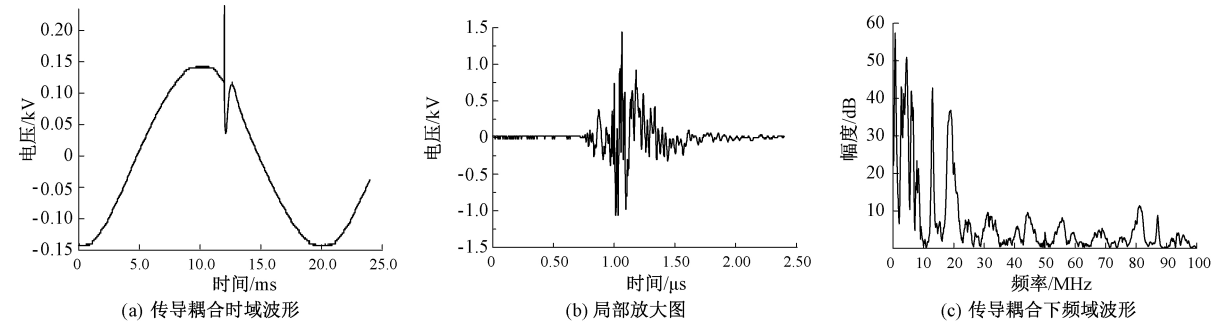


图 10 雷电波传导耦合下 FTU 输入端电压波形

Figure 10 Waveform of FTU input voltage under lightning wave conduction coupling



宽,说明冲击电压传导耦合能增加二次回路高频干扰范围,对二次设备造成更大危害。

试验结果及分析可知:二次回路的阻感效果会对雷电冲击电压产生的瞬态干扰产生一定的衰减作用,但在信号传输过程中由于缺少有效的电磁干扰抑制措施,二次设备还是会受到严重的空间辐射耦合及传导耦合干扰。因此,基于试验过程中出现的电磁干扰问题开展了提高一二次融合配电开关二次设备可靠性的研究。

3 雷电冲击电压干扰抑制措施

为了减弱雷电冲击电压对二次设备的干扰影响,可进行以下几种防护措施:①对于馈线终端内部的干扰,硬件上一般采用在二次设备端口施加隔离变压器、浪涌吸收器和 TVS 管等方式;②利用金属屏蔽材料对二次设备进行金属屏蔽;③将外壳接地,为瞬态高频干扰提供泄放途径。

滤波器电路原理图如图 11 所示。由于雷电冲击电压干扰信号主要为分布在 1~20 MHz 之间的高频阻尼振荡波,考虑到二次设备电感值过大会造成内部场强增大,电容值过大会影响高频响应,因此,根据干扰电压频段及滤波能力确定电感。设定电感  $L$  为 6 mH,电容  $C_A$ 、 $C_B$  分别为 0.22  $\mu$ F、4.7 nF,将  $P$ 、 $N$  连接在电压互感器二次输出端口, $P'$ 、 $N'$  连接在 FTU 馈线终端输入端口。

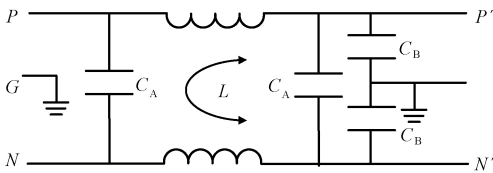


图 11 滤波器电路原理图

Figure 11 Schematic diagram of filter circuit

该滤波器电路主要包括 L 型滤波结构(共模滤波器)和  $\pi$  型滤波结构(差模滤波器)。当共模信号流过 L 型滤波器时,由于两个线圈绕向一致,所产生的磁场可以相互抵消,能有效抑制共模传导干扰;而  $\pi$  型滤波器由 C 型滤波器和 RC 滤波器组成,当差模信号流入时先经过  $C_A$  的滤波,再进入由  $L_1$  和  $C_A$  构成的滤波电路中进一步对交流成分进行滤除,其网络端口等效电路结构如图 12 所示。

接入滤波器装置后的电路示意图如图 13 所示。在 40 kV 雷电冲击电压干扰条件下进行试验,并采集 FTU 馈线终端输出端电压干扰波形,

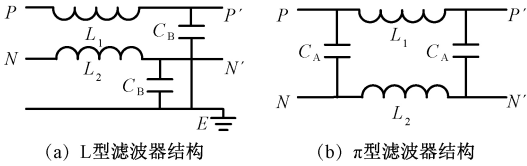


图 12 滤波器等效电路结构

Figure 12 Equivalent circuit structure of filter

对比未接入滤波器的典型干扰波形如图 14 所示。由图 14 可以看出,接入滤波器后馈线终端输出端产生的正向干扰电压峰值由 1.36 kV 下降到 450 V 左右,反向干扰电压峰值由 800 V 下降到 480 V 左右,且干扰电压频率明显降低,干扰持续时间明显缩短,削弱了雷电冲击电压对二次测量、控制单元的不利影响。结果表明,该滤波器对降低一二次融合馈线终端运行过程中的电磁干扰问题具有比较显著的改善作用。

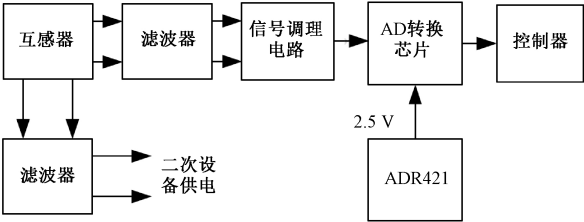


图 13 接入滤波器后的电路结构图

Figure 13 Circuit structure diagram after Accessing Filter

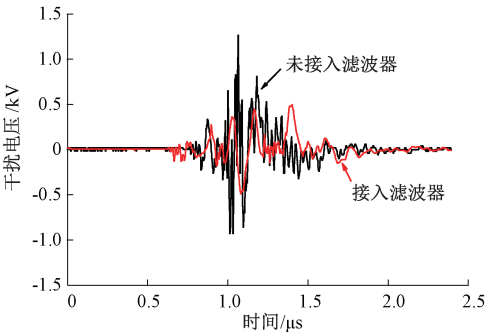


图 14 接入滤波器前后 FTU 输出电压波形

Figure 14 Output voltage waveform of FTU before and after adding the filter

接入滤波器后,多次测量馈线终端输出侧正负向干扰电压幅值如表 2 所示。对比可知:雷电干扰波经滤波抑制后再通过电压互感器和电缆线路侵入 FTU,正负向干扰电压峰值均有明显减小。相同雷电冲击电压等级下,馈线终端正向电压峰值从滤波前的平均 812 V 下降到滤波后的 624 V 左右,下降幅度为 23.2%;负向电压峰值从滤波前的平均 -784 V 上升到滤波后的 -563 V 左右,下降幅度为 28.2%,且未发生误动、拒动等故障现象。

表 2 加入滤波器后正负向干扰电压峰值

Table 2 Positive and negative interference voltage peak after adding filter

试验编号	正向最大电压/V	负向最大电压/V
1	726	-653
2	745	-531
3	530	-586
4	632	-658
5	506	-486
6	712	-569
7	512	-468
8	635	-554

4 结论

笔者搭建了幅值为 100 kV 的雷电冲击电压试验平台,对配电开关二次设备进行电压干扰试验,通过测量装置采集电压互感器二次侧、FTU 馈线终端输入及输出侧电压信号,频谱分析得到二次设备端口的电磁干扰特性,提出干扰抑制措施并进行试验验证,得到以下结论:

(1)施加雷电冲击电压时,电压互感器二次侧、FTU 馈线终端输入以及输出侧都产生较为明显的瞬态高频干扰。雷电波辐射干扰条件下,冲击电压为 100 kV 时,干扰电压峰值达到 3 kV,频带主要分布在 3.6~16.4 MHz 之间;雷电波传导干扰条件下,冲击电压为 70 kV 时,干扰电压峰值约为 4.5 kV,频带主要为 1.2~6.7 MHz 之间、12.5~20 MHz 之间。

(2)针对雷电冲击电压对一二次融合配电开关二次设备造成的瞬态高频干扰问题,可以采取滤波、屏蔽、接地等措施进行有效抑制。试验结果表明,加入滤波器后 FTU 馈线终端输出侧正负向干扰电压峰值降低了 20% 以上,且尖峰数量明显减少,干扰信号得到显著抑制。试验结果为一二次融合配电开关二次设备电磁兼容改进研究提供参考。

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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 嵇建飞,袁宇波,庞福滨.智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度实验分析[J].电工技术学报, 2014,29(增刊1):454-462.

[6] 梁振光.变电站电磁骚扰耦合路径分析[J].高电压技术,2008,34(11):2423-2427.

[7] 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.

[8] 黎鹏,黄道春,阮江军,等.10 kV 开关柜开断对二次智能设备的电磁干扰[J].电网技术,2015,39(1):110-117.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 吴茂林,崔翔.变电站地电位差对屏蔽电缆的电磁干扰分析[J].高电压技术,2005,31(3):53-55,60.

[12] 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.

[13] 许珉,岐召阳,刘玮,等.单相 500 kV GIS 电子式组合互感器发热有限元分析[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(3):11-15.

[14] 崔翔.2002 年国际大电网会议系列报道:电力系统电磁兼容研究进展[J].电力系统自动化,2003,27(4):1-5.

[15] 扈海洋,容展鹏,赵军,等.变电站二次系统防雷保护分析[J].电力与能源,2015,36(4):512-515.

Research on Electromagnetic Interference of Lightning Impact Test of  
Primary and Secondary Distribution Switches

CHENG Xian<sup>1,3</sup>, ZHU Jianpeng<sup>1,3</sup>, ZHAO Haiyang<sup>1,3</sup>, YUAN Xiaodong<sup>1,3</sup>, HE Xiang<sup>2</sup>, XU Mingming<sup>2</sup>

(1.School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 3.Henan Province Transmission and Distribution Equipment and Electrical Insulation Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** With the standardization and integration of primary and secondary equipment of power distribution switches, higher requirements for the reliable operation of secondary equipment under long-term complex electromagnetic environment were put forward. A lightning impulse voltage test platform was used to collect the secondary side of the voltage transformer, the feeder terminal unit (FTU) input and output voltage signals, and to analyze the above-mentioned waveform to obtain the electromagnetic interference spectrum distribution of the secondary device port caused by the impulse voltage, which was effectively suppressed by the filtering method. The test results showed that the lightning impulse would produce transient high frequency electromagnetic interference to the voltage transformer and feeder terminal unit, the peak value of the interference voltage caused by radiation coupling was about 3 kV, the frequency band was 3.6–16.4 MHz; the peak value of the interference voltage caused by conduction coupling was about 4.5 kV, the frequency bands were mainly distributed between 1.2–6.7 MHz and 12.5–20 MHz. After adding the filter, the positive and negative interference voltage peaks were reduced by more than 23%, and no fault occurred. The test results could provide reference for the EMC research of secondary equipment for primary and secondary fusion distribution switches.

**Key words:** primary and secondary equipment; lightning impulse voltage; feeder terminal unit; spectrum distribution; anti-electromagnetic interference

(上接第 45 页)

[17] WYMAN B, ESPIE E, GUIONNEAU C, et al.  
TORCS: the open racing car simulator[EB/OL]. (2013–12–15)[2019–11–12]. <http://www.cse.chalmers.se/~chrdimi/papers/torcs.pdf>.

Research on Autopilot Control Algorithm Based on Deep Reinforcement Learning

WANG Bingchen, SI Huaiwei, TAN Guozhen

(School of Computer Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

**Abstract:** In order to improve the learning efficiency of the autopilot car control algorithm based on reinforcement learning, this paper proposes an autopilot strategy learning algorithm DDPGwE (Deep Deterministic Policy Gradient with Expert, DDPGwE) combined with expert experience. DDPGwE used a DDPG-based reinforcement learning framework to conduct online training of the model; used real human driving data to pre-train the Actor network, and added an LSTM prediction mechanism to the Actor network to improve the prediction of the future status of autonomous vehicles. The experimental results in the simulation platform TORCS showed that Compared with the original DDPG algorithm, the algorithm proposed in this paper greatly reduced the training time and speeded up the convergence speed, which improved the stability and generalization ability of the model.

**Key words:** neural network; reinforcement learning; autopilot; DDPG algorithm; actor-critic network; LSTM