

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.025

反射式全光纤电流互感器电磁兼容性能研究

颜 语, 潘 丁, 张旭乐, 朱明东

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要:文中介绍了反射式全光纤电流互感器的工作原理,描述了针对电子式电流互感器工作在复杂的强电磁环境中的电磁兼容能力要求,介绍了电子式电流互感器抗电磁干扰措施,最后针对全光纤电子式电流互感器进行了电磁兼容测试,主要包括:射频传导抗扰度测试、静电放电抗扰度测试、浪涌冲击抗扰度测试、电快速瞬变脉冲群抗扰度测试、阻尼振荡波抗扰度测试。初次试验结果不能完全满足要求,通过相应整改,采用对电源模块、信号板输入电源增加滤波电容、TVS管等元件,对电源线增加磁环,对机箱增加导电弹簧片,机箱内走线合理布局等电磁兼容优化措施,提高互感器的抗干扰能力,再次测试满足要求。

关键词:全光纤电流互感器;屏蔽;滤波;抗干扰;电磁兼容

Study of Electromagnetic Compatibility Based on Reflective Fiber Optical Current Transformer

YAN Yu, PAN Ding, ZHANG Xule, ZHU Mingdong

(XJ Co., Ltd., Henan Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper firstly introduced the principle of reflective fiber optical current transformer, described the electromagnetic compatibility requirements of reflective fiber optical current transformer which works in a complex strong electromagnetic environment, then presented the measures against electromagnetic interference of reflective fiber optical current transformer. Finally, in connection with fiber optical current transformer, some electromagnetic compatibility tests were carried out in this paper, mainly consists of the radio frequency conducted immunity test, the electrostatic discharge immunity test, the surge immunity test, the electrical fast transient burst immunity test and the damped oscillatory waves immunity test. According to the results of the initial tests, it can not able to meet the requirements completely. In order to improve the anti-interference capability, the appropriate corrections were implemented by various optimization measures of electromagnetic compatibility, which include the addition of elements like filter capacitor and TVS tube applied on power modules and signal board input power. In this paper, the magnetic was also joined to the power line, and the conductive spring contacts reed was added to the chassis, traces in the chassis were also rational distributed. By the results of the second tests, it is totally satisfactory.

Key words: fiber optical current transformer; shielding; filter; anti-interference; electromagnetic compatibility

0 引言

基于 IEC 61850 标准新一代数字化变电站实现信息化和自动化的基础使大量先进数字化互感器应用于电网的各个环节。电流互感器是电力系统所采用的电流传变设备,负责检测一次高压输电线路中的电流信息,并转化为相应的电信号传送给二次低压设备进行测量、控制和保护,其性能好坏直接影响到电流

的准确计量和控制保护系统的正确动作。传统电流互感器由于自身存在的电气绝缘性能差,易发生磁饱和、磁滞、剩磁现象,二次开路危险,易污染环境等技术缺陷,近年来正逐步被新型传感原理的电子式电流互感器所代替。在新型电子式电流互感器技术分类中,基于磁光 Faraday 效应的全光纤电流互感器不仅能够克服传统电流互感器的技术缺陷,同时具有体积小、重量轻、绝缘性能好、抗电磁干扰能力强、动态测量范围宽、交、直可测、维护、使用成本低、安装形式灵

活、直接数字量输出等技术优势,是当今国际上最新的互感器技术,也是未来在高压、特高压电网中全面代替传统电磁式互感器的技术趋势^[1]。

随着现代科学技术的发展,电气及电子设备的数量和种类不断增加,使电磁环境日益复杂。在这种复杂的电磁环境中,如何减少相互间的电磁骚扰,使全光学电子式互感器正常运行,是一电子互感器工程应用中急需解决的问题。

1 全光纤电流互感器工作原理

文中设计的全光纤电流互感器光路采用反射串联式结构,见图 1。

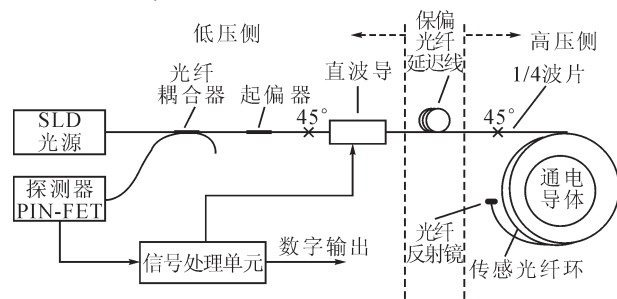


图 1 全光纤电流互感器反射串联式光路结构

Fig. 1 Reflective series optical path structure of fiber optical current transformer

其工作原理为:SLD 光源(激光器)发出的光波经光纤耦合器后,由起偏器起偏后变为线偏光,以 45° 注入保偏光纤中变为两束正交的线偏振光,并分别沿保偏光纤的 X 轴和 Y 轴向前传播,当这两

束正交模式的光波经过 1/4 波片后,分别变为左旋和右旋的圆偏振光进入传感光纤环,由于受到通电导体中电流产生的磁场作用,左右旋圆偏振光分别以不同的速度传播(偏振面发生旋转),从而产生非互易性相移 θ 。当光波经传感光纤的反射镜反射后,这两束圆偏振光的偏振模式互换,再次通过传感光纤环并受到磁场作用,使得非互易性相移 θ 加倍,即。

$$\Delta\phi_s=4\theta$$

这两束返回的光波再次通过 1/4 波片后恢复为两束线偏振光并在起偏器 45° 熔接点处发生 Sagnac 相干叠加,探测器端检测到的干涉光强为:

$$P=P_0(1+\cos\Delta\phi_s) \quad (1)$$

式(1)中, P_0 表示光源的光功率^[2-3]。

2 电子式电流互感器电磁兼容要求

电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC)是指电气和(或)电子设备(装置和系统),在共同的电磁环境中,相互之间互不干扰,各自完成正常功能的共存状态。电子式电流互感器工作在复杂的强电磁环境中,为了保证工作的稳定可靠性,需要认真分析主要干扰源及其特性,在此基础上,采取相应措施抑制干扰,提高系统的抗干扰性能。

下面介绍电子式电流互感器工作环境中的主要干扰源及其特性以及 GB/T 20840.8—2007 标准^[4]中规定的相应电磁兼容试验项目,见表 1。

表 1 主要干扰源、特性以及相应的实验项目

Table 1 Major sources of interference, features and corresponding experimental project

干扰源	产生原因	特性	试验项目
电网电压变动	电网、变电设备故障、负荷突变,或负荷相对比较平稳的连续变化。	随机性。	电压暂降、短时中断和电压慢变化抗扰度试验(1)。
射频电磁场辐射	无线电台、电视台、移动式无线电发信机、各种工业发射源以及杂散辐射源。	多数情况下表现为传导干扰,频率从 9 kHz 到 80 MHz。	射频电磁场辐射抗扰度试验(2)。
工频磁场	邻近电力线路、变压器等通过工频电流所产生的磁场干扰。	正常时,干扰磁场幅值相对较小;故障时,幅值相对较大,持续时间较短。	工频磁场抗扰度试验(3)。
脉冲磁场	雷击,电力系统中故障的起始暂态,断路器切合高压母线和高压线路。	磁场强度从几百 A/m(峰值)到几千 A/m(峰值)。	脉冲磁场抗扰度试验(4)。
阻尼振荡磁场	高压变电站中,隔离开关切合高压母线。	陡波前时间达到几十 ns,振荡频率从 100 kHz 到几 MHz。	阻尼振荡磁场抗扰度试验(5)。
震荡波	电源盒控制线开关切换、雷击、或是在电厂、高中压变电站及重工业设备中的开关操作出现重燃、或电网故障。	陡波特性脉冲,上升时间为 10 ns 到分之一 μ s 持续时间约为 10~100 μ s。	震荡波抗扰度试验(6)。
静电放电	操作者及对邻近物体的静电放电。	陡波特性脉冲,上升时间为几 ns,几十 ns 的阻尼波尾,幅值可达十几 kV。	静电放电抗扰度试验(7)。
浪涌冲击	开关操作或雷击等。	能量较大的暂态过电压或过电流。	浪涌抗扰度试验(8)。
电快瞬变脉冲群	感性负载断开时,开关触点间隙绝缘击穿或触点弹跳,在断开处产生暂态骚扰。	瞬变的短上升时间、较快的重重复率和低能量。	电快瞬变脉冲群抗扰度试验(9)。

对电子式电流互感器上述各项试验结果的评价准则可分为两类:

1) 满足准确度规范限值以内的正常性能(稳态下,在额定一次电流或较低值);

2) 允许与保护无关的测量性能暂时下降或能够自动恢复的自诊断运行,但不允许复位或重新启动,不允许输出过电压超过 500 V;对于保护用电子式电流互感器,不允许性能下降致使继电保护装置误动。若试验(1)~(3)达到 1), (4)~(9)达到 2),则电子式电流互感器可满足电磁兼容的性能要求^[4]。

3 抗电磁干扰措施

为达到上述电磁兼容试验要求,需要采取一系列抗干扰措施提高电子式电流互感器的抗干扰性能。屏蔽、滤波、接地是通常采用的基本方法。

3.1 屏蔽

屏蔽是切断干扰源的有力措施,一般常用于隔离和衰减辐射干扰。屏蔽可分为电场屏蔽和磁场屏蔽两种。

针对电子式互感器电路部分,完整的导电屏蔽体是最有效的电场屏蔽方法。设计屏蔽箱体时需要注意以下几点:

1) 屏蔽箱体采用良好的导电材料,且必须完整连续;

2) 屏蔽箱体如有缝隙,缝隙处需采取必要的电磁屏蔽措施;

3) 屏蔽箱体要良好接地,最好使屏蔽体直接接地,接地点需靠近被屏蔽的低电平电路的入地点;

4) 屏蔽材料选择。多选用良导体,如铜、铝等,高频情况下为了提高屏蔽效能,可采取铜屏蔽体表面镀银的办法。

磁场屏蔽通常是指对直流或低频磁场的屏蔽。磁屏蔽的机理主要是依赖于高磁导率材料低磁阻的磁分路作用,即由磁屏蔽体为磁场提供一条低磁阻通路,使屏蔽体内部空间的磁场大大减小。

磁屏蔽设计时应遵循以下几点:

1) 材料选择,选用导磁材料,多选用铁磁材料;

2) 屏蔽箱体体内如含有磁性元件,应使其与屏蔽箱体保持足够距离,避免发生磁短路;

3) 屏蔽箱体厚度增加屏蔽能力提高,考虑加工难易,一般设计厚度小于 2.5 mm。

全光纤电子式电流互感器的电子回路部分集中放置在屏蔽箱体内,屏蔽箱体采用导电性能好的铝制材料,箱体上设置安全接地点。

3.2 滤波

滤波是利用滤波器来抑制传导干扰。干扰一般以共模方式施加到电子式电流互感器的电源端口和其他输入输出端口上。如果各端口没有良好的滤波措施,则干扰信号就会进入设备的后续电路,通过传导和电容耦合进行传播;同时干扰信号也可进入电路板的信号地线,在公共地线上产生压降,对公用该地线的其他电路造成干扰。

3.2.1 电源端口滤波

全光纤电子式电流互感器低压区信号处理电路的工作电源由电网提供,电网噪声会通过电源线传入,干扰电路的正常工作。一般说来,系统故障有 1/3~1/2 来自于电源。电源干扰有两种来源:一为雷电冲击或切合大容量感性负载造成的电源瞬间欠压、过载或产生的尖峰、浪涌干扰等;二为电网中的谐波高频干扰。采取的相应抑制干扰措施是在电源入口设置电源滤波器、瞬变电压抑制器和隔离变压器。

交流电源滤波器应具有从低频到高频全频率范围的滤波功能和抗冲击及浪涌功能。安装时应注意:必须使电源滤波器壳体与电路外层屏蔽体接触良好;必须使电源滤波器输入端到屏蔽体面板连接器引线最短,以便减少通过引线产生的电磁辐射干扰。直流电源系统多采用浮地方式工作,即 ± 15 V 电源与机壳无任何连接,导致共模干扰电流没有泻放通道,只能通过电源线对机壳的杂散电容泻放掉。杂散电容值难于控制,容易在正负电源端口产生差模电压而影响电路正常工作。通常可在电源端口串入共模、差模扼流圈,并在电源端口与机壳间接入高频特性好、耐压高的三端电容,为共模骚扰电流提供泻放通道,可取得良好的电磁兼容性。

瞬变电压抑制器可采用压敏电阻或 TVS 管等,用来抑制浪涌电压和电快速瞬变脉冲群产生的差模和共模干扰,保护电子元器件免受损坏。

隔离变压器是 1:1 的电力变压器,其初级线圈和次级线圈之间加入了屏蔽层。屏蔽层减弱了初、次级绕组之间的分布电容的影响,对低频共模噪声具有良好的抑制作用。

如果分别在初、次级绕组上加设一层屏蔽,则对高频共模噪声具有良好的抑制作用;在使用时,需将初级绕组屏蔽接电路的外层屏蔽体上,初、次级绕组之间的屏蔽和次级绕组屏蔽接直流电源地上。

3.2.2 输入输出端口滤波

FOCT 电子式电流互感器的输入端口为交流电源输入,采取的滤波措施如上所述;输出端口为模

拟信号输出,采用共模、差模扼流圈和三端电容构成的无源滤波器滤除共模和差模信号,并在无源滤波器滤输出端接入 TVS 管抑制浪涌电压和电快速瞬变脉冲群。

3.3 接地

接地技术是系统抗电磁干扰的重要手段。FOCT 型电子式电流互感器的接地系统可分为屏蔽接地、安全接地和工作接地。屏蔽接地主要指信号线、直流电源线、PCB 线圈和电路的屏蔽层通过接地线连接到装置的外壳上,接地方法见 3.1、3.2 所述;安全接地是指将装置的外壳通过低阻抗的接地线接到变电站的主接地网上,避免发生人体触电事故;工作接地是指电路地线的接地方式,反射式全光纤电子式电流互感器采取的是浮地方式。

此外,PCB 电路板的合理设计可以提高系统的电磁兼容性,主要包括合理布局、合理布线、地线布置、去耦设计等方面。关于 PCB 电路板的抗干扰设计有文献专论述,这里不再讨论^[9]。

全光纤电子式电流互感器于 2014 年 3 月在许继集团进行了电磁兼容试验,首次试验中有两项内容未能满足试验要求,增加整改以上措施后,复测满足试验要求,达到了预期目标。

4 电磁兼容试验

4.1 试验说明

根据前文电磁兼容 A 级要求,在许继集团电子互感器公司中试部对全光纤电流互感器进行了电磁兼容试验,主要包括:射频传导抗扰度测试、静电放电抗扰度测试、浪涌冲击抗扰度测试、电快速瞬变脉冲群抗扰度测试、阻尼振荡波抗扰度测试。试验设备及现场测试图见图 2-6。



图 2 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验设备

Fig. 2 Electrical fast transient / burst test equipment



图 3 静电放电抗扰度试验设备

Fig. 3 Electrostatic discharge immunity test equipment



图 4 浪涌(冲击)抗扰度试验设备、振荡波抗扰度实验设备
Fig. 4 Surge immunity test equipment, oscillating wave immunity test equipment



图 5 磁场抗扰度试验设备

Fig. 5 Magnetic field immunity test equipment



图 6 现场测试环境

Fig. 6 Field testing environment

4.2 试验结果

4.2.1 射频传导抗扰度测试

测试要求:装置应能承受 GB/T 14598.17—2005 第 4 章规定的试验严酷等级的射频场感应的传导骚扰的抗扰度试验,试验电压电平为 140 dB(μ V)或 10 V(有效值),在 0.15 MHz 到 80.6 MHz 频率范围内对电源输入进行扫频试验,试验中及试验后装置工作应正常且无损坏。测试结果见表 2。

问题分析:

表2 射频传导抗扰度测试结果

Table 2 RF conducted immunity test results

严酷等级	测试情况
IV	交流电源所加传导干扰频率在 0.15~80.6 MHz 频率范围内测试无丢帧,有效值偏差 0.48%。

配置的电源线过长,实验中传导干扰衰减严重;推荐做一个 20~30 cm 长度电源线。

4.2.2 静电放电抗扰度测试

测试要求:按照 GB/T 17626.2—2006、等级 4 的测试要求,对全光纤电流互感器采集单元的正面金属面板进行等级为 IV 的静电放电抗扰度试验,试验中及试验后查看插件有无异常或损坏、装置工作情况,期间有无丢帧等异常情况。测试内容见表 3。

表3 静电放电抗扰度测试内容

Table 3 Electrostatic discharge immunity test content

严酷等级	测试情况
IV	+8 kV 接触放电测试丢帧 4 个,时标错误 56 个; -8 kV 接触放电测试丢帧 4 个,时标错误 121 个; +15 kV 空气放电测试丢帧 4 个,时标错误 72 个; -15 kV 空气放电测试无丢帧。

测试结果:IV 级静电放电抗扰度试验不合格。

4.2.3 浪涌冲击抗扰度测试

测试要求:按照 GB/T 17626.5—2008、等级 4 的测试要求,对全光纤电流互感器采集单元进行等级为 IV(线对线 2 kV,线对地 4 kV,正负各 5 次间隔 10 s)的浪涌抗扰度试验,试验中及试验后查看插件有无异常或损坏、装置工作情况,期间有无丢帧等异常情况。测试内容见表 4。

表4 浪涌冲击抗扰度测试内容

Table 4 Surge immunity test content

严酷等级	测试情况
IV	无异常

测试结果:合格。

4.2.4 电快速瞬变脉冲群抗扰度测试

测试要求:按照 GB/T 17626.4—2008、等级 IV 的测试要求,对全光纤电流互感器采集单元进行等级为 IV 的快速瞬变脉冲群抗扰度测试试验,试验中及试验后查看插件有无异常或损坏、装置工作情况,期间有无丢帧等异常情况。测试内容见表 5。

表5 电快速瞬变脉冲群抗扰度测试内容

Table 5 Electrical fast transient burst immunity test content

严酷等级	测试情况
IV	施加 IV 级 5 Hz 瞬变脉冲群干扰时,采集单元丢帧严重,大量品质异常报警,采样无效。

测试结果:采集单元的快速瞬变脉冲群抗扰度较差,测试试验不合格。

4.2.5 阻尼振荡波抗扰度测试

测试要求:按照 GB/T 17626.12—1998、等级 III 的测试要求,对全光纤电流互感器采集单元进行等级为 III 的阻尼振荡波抗扰度测试试验,试验中及试验后查看插件有无异常或损坏、装置工作情况、期间有无丢帧等异常情况^[6]。测试内容见表 6。

表6 阻尼振荡波抗扰度测试内容

Table 6 Damped oscillation immunity test content

严酷等级	测试情况
III	按要求施加 III 级电阻尼和磁阻尼振荡波干扰时,采集单元均无异常。

测试结果:合格。

5 整改

针对全光纤电流互感器在许继中试部进行的静电干扰、阻尼振荡波、电快速瞬变、浪涌冲击等电磁干扰项测试中,和出现的丢帧及出大数的情况,对互感器电源模块信号板的部分电路进行整改。

整改措施:

1)电源模块交流 220 V 输入端增加 2 个 20 kV 1 000 pF 的对地电源滤波陶瓷电容;

2)电源模块后级直流 ± 24 、 ± 5 、 ± 6 V 等低压侧新增 TVS 管,容值不等的耐高压陶瓷滤波电容;

3)信号板电源输入端新增小容值的耐高压陶瓷滤波电容;

4)互感器机箱内电源线和数据线重新布局走线;

5)互感器机箱 ± 5 、 ± 6 V 电源线增加磁环;

6)互感器机箱箱体接缝处增加导电弹簧片。

整改后,对反射式全光纤电流互感器进行电磁兼容试验复测,测试结果全部满足要求。

6 结语

反射式全光纤电流互感器采用光纤作为一次传感单元,只要设计时充分考虑四分之一波片和反射镜的闭合既能满足传感单元不受外界电磁场干扰。该设计中的全光纤互感器,在设计过程中,充分考虑电磁兼容能力设计,但在试验验证过程中仍然无法全部满足电磁兼容性能的要求,可以看出电磁兼容问题是理论与实践相结合的一个过程,最后对该样机进行了结构整改,通过了相关电磁兼容试验,满足要求。

参考文献:

[1] 孙振权,张文元. 电子式电流互感器研发现状与应用前

- 景[J]. 高压电器, 2004, 40(5):376-378.
- SUN Zhenquan, ZHANG Wenyuan. The current situation and the future of developing electronic current transducer[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(5):376-378.
- [2] 李淮海, 李 峰, 华小兵. 全光纤电子式电流互感器的原理及应用研究[J]. 华东电力, 2011, 39(5):776-777.
- LI Huaihai, LI Feng, HUA Xiaobing. The principles and application research on AH-optical electronic current transformers[J]. East China Electric Power, 2011, 39(5):776-777.
- [3] 郝金会. Sagnac 式光纤电流互感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- HAO Jinhui. Research on Sagnac type optical fiber current transformer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [4] GB/T 20840.8—2007 电子式电流互感器[S]. 2007.
- [5] 任 罡, 张贵新. 高压电子式互感器中电磁兼容问题的研究[C]//中国电机工程学会高电压专委会学术年会论文集. 北京: IEEE, 2007:1-6.
- REN Gang, ZHANG Guixin. Research on electromagnetic compatibility in high voltage electronic transformer [C]// Chinese High Voltage Electrical Engineering Society Committee Symposium. Beijing: IEEE, 2007:1-6.
- [6] 吕新良, 卢江平, 宋晓林. 电子式互感器电磁兼容试验研究[J]. 陕西电力, 2010, 38(12):80-83.
- LYU Xinliang, LU Jiangping, SONG Xiaolin. Experimental study on electromagnetic compatibility of electronic transformer[J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(12):80-83.
- 颜 语(1984—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事电子式互感器的研发和设计工作。
- 潘 丁(1976—), 男, 工程师, 主要从事智能变电站和电子互感器的研发和设计工作。
- 张旭乐(1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电子互感器的研发和设计工作。
- 朱明东(1989—), 男, 硕士, 主要从事电子式互感器的设计和测试工作。

(上接第 147 页)

- [5] 宋晓兵, 梅建伟. 非晶合金脉冲变压器的研制[J]. 变压器, 2010, 47(2):12-15.
- SONG Xiaobing, MEI Jianwei. Development of pulse transformer with amorphous core[J]. Transformer, 2010, 47(2):12-15.
- [6] KOURO S, BERNAL R, MIRANDA H, et al. High-performance torque and flux control for multilevel inverter fed induction motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6):2116-2123.
- [7] 官二勇, 宋平岗, 叶满园. 基于三次谐波注入法的三相四桥臂逆变电源[J]. 电工技术学报, 2005, 20(12):43-52.
- GUAN Eryong, SONG Pinggang, YE Manyuan. Three-phase inverter with four bridge legs based on three harmonic injection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(12):43-52.
- 孙广星(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事柔性交/直流输电配用电力电子设备的研究工作。
- 苟锐锋(1959—), 男, 教授级高工, 主要从事绝缘配合、高压直流/柔性直流输电系统研究工作。
- 孙 伟(1962—), 男, 教授级高工, 主要从事高压直流输电、柔性交流输电系统研究与相关设备研究工作。