

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.015

振动对压电陶瓷调制式全光纤电流互感器影响的试验研究

刘彬¹, 张民², 王庆², 邓小聘¹, 刘勇¹, 黄咏喜¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031)

摘要: 压电陶瓷(PZT)调制式全光纤电流互感器(FOCT)广泛应用在特高压直流工程中,对振动敏感是PZT调制式FOCT发生故障的主要原因之一。为研究振动对PZT调制式FOCT的影响,开展振动响应试验,分析不同振动激励对FOCT不同部件的影响。结果表明:振动对PZT调制式FOCT影响最大的部位为调制箱,其中的延时光纤是导致振动时FOCT输出异常的主要器件;当外界振动影响到延时光纤时,会产生非互易相位角,该相位角与Faraday相位角相互叠加,引入非互易相位误差;振动引起的误差与受振动干扰的光纤长度、干扰处距反射镜的时间延时、振动幅值、振动加速度均相关;提出的整体和局部振动响应试验方法可以有效考核PZT调制式FOCT的振动性能。文中的分析结果可为PZT调制式FOCT的振动试验方法、减振结构设计提供参考依据。

关键词: 压电陶瓷; 调制; 全光纤电流互感器; 振动响应; 非互易相位角; 振动幅值; 振动加速度

Experimental Study on the Effect of Vibration on PZT Modulated Fiber-optic Current Transformer

LIU Bin¹, ZHANG Min², WANG Qing², DENG Xiaopin¹, LIU Yong¹, HUANG Yongxi¹

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: PZT modulated FOCT is widely used in UHVDC projects. Sensitivity to vibration is one of the main reasons for the failure of PZT modulated FOCT. For studying the influence of vibration on PZT modulated FOCT, the vibration response test is performed to analyze the influence of different vibration excitations on different parts of FOCT. The results show that the part mostly affected by vibration in the PZT-modulated FOCT is the modulation box, of which the delay optical fiber is the main component that causes the abnormal output of FOCT during vibration. When the external vibration affects the delay optical fiber, a non-reciprocal phase angle is generated, which superimposes the Faraday phase angle and introduces the non-reciprocal phase error. The error caused by vibration is related to the length of the optical fiber interfered by vibration, the time delay between the interference and the mirror, the vibration amplitude and the vibration acceleration. The proposed overall and local vibration response test method can effectively evaluate the vibration performance of PZT modulated FOCT. The analysis results in this paper can provide reference for the vibration test method and vibration reduction structure design of PZT modulated FOCT.

Key words: PZT; modulation; FOCT; vibration response; nonreciprocal phase angle; vibration amplitude; vibration acceleration

0 引言

全光纤电流互感器(fiber-optic current transformer, FOCT)是特高压直流输电系统中重要的一次设

备,为直流系统的控制保护及运行状态监测提供可靠的测量信息,其测量准确度及运行可靠性直接影响特高压直流输电工程的安全稳定运行^[1-6]。

2012年苏州站首次在直流工程中使用FOCT,

收稿日期:2025-09-03; 修回日期:2025-12-06

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5500-202255141A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5500-202255141A-1-1-ZN).

近几年随着 FOCT 在新建工程中大量使用, 其配置量也逐年上升。截止 2021 年 12 月, 国网公司各换流站共配置 FOCT 超过 1 800 台, 在全部类型直流电流互感器中的占比接近 40%。目前在特高压直流换流站使用的 FOCT 主要有两类: ①采用压电陶瓷(PZT)的正弦波调制 FOCT; ②采用铌酸锂(LiNbO₃)电光调制器的方波调制 FOCT^[7-10]。其中 PZT 正弦波调制式 FOCT 在国网公司全部类型的 FOCT 中占比超过 70%。

PZT 调制式 FOCT 主要由光纤传感环、电子单元及调制单元构成, 对振动的敏感性是影响 PZT 调制式 FOCT 测量准确度的主要因素之一。在振动冲击等外界条件的影响下, 光纤器件及光纤尾纤等会因 Sagnac 效应、弹光效应引入非互易性的双折射偏振误差, 对光信号的传播损耗、分光比、偏振特性等产生影响, 最终影响传感系统的测量精度和稳定性^[11-14]。振动对 PZT 调制式 FOCT 的影响主要表现为: 输出数据产生跳变大数, 轻则影响测量数据的稳定性, 重则导致保护误动。2020 年 12 月, 受外界振动干扰的影响, PZT 调制式 FOCT 在德阳换流站出现测量电流突变, 导致极 1 直流滤波器差动保护动作后闭锁。

针对 FOCT 的振动影响试验, GB/T 26216.1—2019 中提出抗震试验来模拟地震等对 FOCT 结构方面的影响^[15], 标准中的试验方法参考 GB/T 2424.25—2024, 采用正弦振动试验方法来模拟地震产生的振动影响^[16]。但是抗震试验只考核关键元件的形变、部件偏移、电气连续性, 不考核抗震试验前后或过程中误差的变化影响。GB/T 20840.6—2017 中规定的振动试验, 主要包括二次部件振动(参照 GB/T 2423.10—2019 的正弦振动试验方法^[17])和一次部件振动(短时电流期间的一次部件振动试验、一次部件与断路器机械耦联的振动试验)^[18], 标准的试验方法无法充分考核振动对 PZT 调制式 FOCT 中振动敏感器件的影响, 对于外部的敲击振动也缺乏有效的考核要求^[19]。

为研究振动对 PZT 调制式 FOCT 的影响, 文中选取了德阳换流站发生振动故障的样机开展振动响应试验, 分析不同振动激励对 FOCT 不同部件的影响规律, 明确振动敏感器件和振动影响机理, 提出对应的减振措施, 提高 FOCT 振动性能, 促进其工程应用的可靠性。

1 试品和试验方法

1.1 试品

PZT 调制式 FOCT 主要由电子单元、调制箱、光

纤传感环三部分组成, 其中电子单元位于屏柜之内, 调制箱位于一次本体下端, 光纤传感环位于一次本体上端, 其结构框图见图 1。

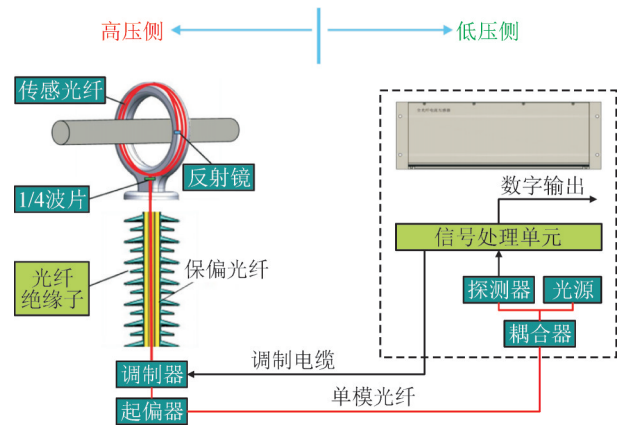


图 1 PZT 调制式 FOCT 结构框图

Fig. 1 Structure diagram of PZT Modulated FOCT

文中选取的试品为德阳换流站发生振动故障的 PZT 调制式 FOCT, 主要技术参数为: 额定一次直流电流 3 000 A, 设备最高电压 515 kV, 准确度等级 0.2 级, 通讯协议 IEC 60044-8:2002。

1.2 试验方法

1) 不同部位冲击振动试验。将试品横卧, 在施加电流 0 A 和直流电流 3 000 A 时, 采样弹簧冲击器分别对 FOCT 不同部位施加冲击振动, 试验动能为 2 J, 通过故障录波仪监测 FOCT 二次输出。冲击振动试验属于定性检查, 目的是定性分析 PZT 调制式 FOCT 不同部位受振动时对二次输出的影响。

2) 整体在振动台开展振动响应试验。按照 GB/T 20840.6—2017 的要求, 对试品整体在振动台开展振动响应试验, 振动响应试验的振动水平满足幅度 10 m/s², 频率 10 ~ 150 Hz。为了进一步验证高频振动对 FOCT 的影响, 增加振动幅度 5 m/s², 频率 150 ~ 2 000 Hz 的振动响应试验。

将试品垂直安装在振动台上, 分别施加电流 0 A 和负极性直流电流 3 000 A, 对 FOCT 整体开展垂直方向的振动响应试验, 通过故障录波仪监测 FOCT 二次输出。

3) 单独对调制箱在振动台开展振动响应试验。将试品一次本体与调制箱分离, 施加负极性直流电流 3 000 A, 利用振动台对调制箱单独开展垂直方向振动响应试验。振动响应试验的振动水平满足幅度 10 m/s², 频率 10 ~ 150 Hz; 幅度 5 m/s², 频率 150 ~ 2 000 Hz。通过故障录波仪监测 FOCT 二次输出。

4) 通过激振器对调制箱开展振动试验。为进一步定量分析振动对调制箱的影响, 采用激振器对

试品的调制箱开展局部振动试验,试验原理图见图2。

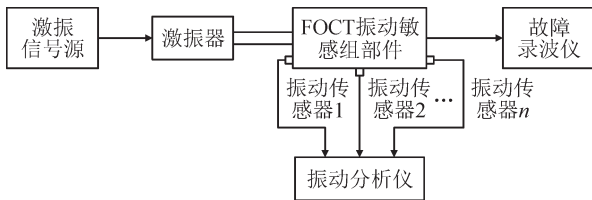


图2 激振器局部振动试验原理图

Fig. 2 Principle diagram of local vibration test of exciter

FOCT直立状态下,通过激振器对调制箱的正面施加振动。在调制箱的其余5个面分别布置5个振动传感器,监测各振动传感器采集到的振动值,同时通过故障录波仪监测FOCT的二次输出。试验分别在固定加速度、不同频率和固定频率、不同加速度下进行。

5)调制箱内部器件级振动试验。将试品一次本体与调制箱分离,调制箱单独固定于振动台上,进行调制箱整体振动试验,获取异常电流数据,振动频率150 Hz。随后分别将调制箱内的起偏光纤、消偏光纤、延时光纤、压电陶瓷等器件逐个移出并进行悬吊,使其不受振动台影响。采用与调制箱整体试验相同的振动频率进行试验,记录每个器件处于悬吊状态时调制箱受振动影响产生的异常电流值,用移出器件后异常电流的减小值与调制箱整体试验时异常电流值的百分比计算各个器件受振动影响的占比,从而确定受振动影响的关键器件。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

2.1.1 不同部位冲击振动试验

冲击振动试验结果见表1、2。表1为施加电流0 A的试验结果,表2为施加直流电流3 000 A的试验结果。

表1 冲击振动试验

Table 1 Impact vibration test

试品试验工况	冲击部位	试验结果
调制箱与一次本体连接	底座	异常电流最大值2 608 A
	底座	无异常输出
调制箱与一次本体分离	光纤传感环	异常电流最大值50 A
	调制箱	异常电流最大值3 276 A
	调制箱附近制造噪音	异常电流最大值20 A

表2 冲击振动试验

Table 2 Impact vibration test

试品试验工况	冲击部位	试验结果
调制箱与一次本体分离	调制箱正面和侧面	异常电流最大值19 708 A
	调制箱顶面	异常电流最大值6 453 A
	光纤传感环和绝缘子折叠处	异常电流最大值68 A
	调制箱附近制造噪音	无输出异常

试验结果表明:不通流或施加额定电流情况下,对FOCT各部位施加冲击振动,振动施加在调制箱或与调制箱连接的底座处产生的异常电流最大,施加在传感环或绝缘子折叠处产生的异常电流较小,空间的非接触式振动对输出无影响。冲击振动施加在调制箱正面和侧面,异常电流最大,约6倍额定电流大小;振动施加在调制箱顶面,异常电流较大,约2倍额定电流大小。

2.1.2 整体振动响应试验

整体振动响应试验结果见表3。试验结果表明:不通流或施加额定电流情况下,对FOCT整体在振动台施加频率10~150 Hz,幅度10 m/s²和频率150~2 000 Hz,幅度5 m/s²的振动,FOCT输出的最大误差电流均超过额定电流的20%,远超保护整定值要求。

表3 整体振动响应试验

Table 3 Integral vibration response test

振动频率/Hz	振动加速度/(m·s ⁻²)	一次电流/A	振动方向	最大异常输出电流/A	最大误差电流/A
10~150	10	-3 000	垂直	-11 082	-8 082
150~2 000	5	-3 000	垂直	-4 760	-1 760
10~150	10	0	垂直	1 174	1 174
150~2 000	5	0	垂直	797	797

2.1.3 调制箱振动响应试验

调制箱单独开展的振动响应试验结果见表4。试验结果表明:在振动台上单独对FOCT的调制箱施加频率10~150 Hz,幅度10 m/s²和频率150~2 000 Hz,幅度5 m/s²的振动,FOCT输出的最大误差电流均超过额定电流的20%,远超保护整定值要求。

表4 调制箱单独开展的振动响应试验

Table 4 Vibration response test of modulator cabinet

振动频率/Hz	振动加速度/(m·s ⁻²)	一次电流/A	振动方向	最大异常输出电流/A	最大误差电流/A
10~150	10	-3 000	垂直	-3 469	-469
150~2 000	5	-3 000	垂直	-3 755	-755

2.1.4 通过激振器对调制箱开展振动试验

采用激振器分别在固定加速度、不同频率和固定频率、不同加速度下对试品的调制箱开展局部振动试验, 试验结果如下所示。

1) 固定振动加速度, 改变振动频率。设置激振器

振动加速度为 10 m/s^2 , 改变振动频率, FOCT 输出与振动频率的关系曲线见图 3。图 3 中, 上半部分曲线为试品施加直流电流 3000 A 的试验结果, 下半部分曲线为试品施加电流为 0 A 的试验结果。在 1800 、 2700 Hz 附近, FOCT 的误差电流值较大, 最大值为 1353 A 。

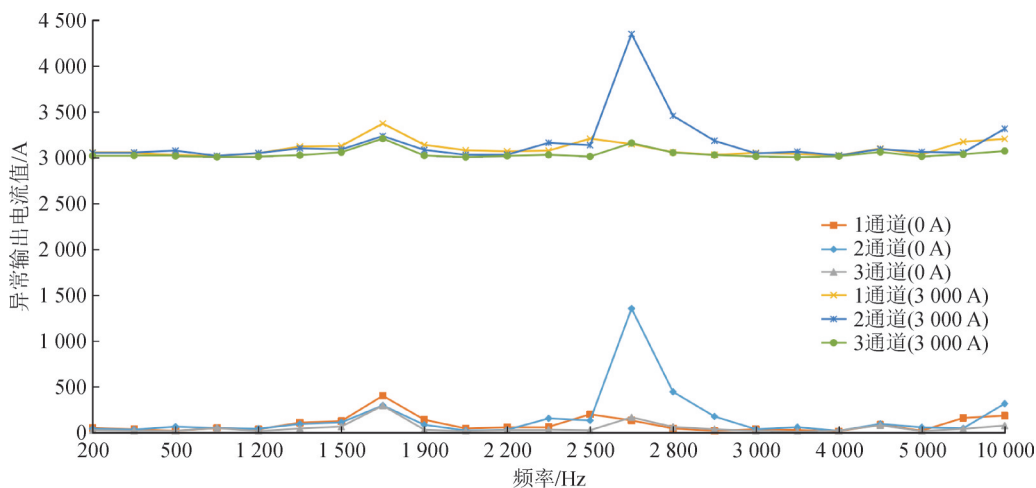


图 3 FOCT 输出与振动频率曲线图(加速度 10 m/s^2)

Fig. 3 Graph of FOCT output and vibration frequency(acceleration is 10 m/s^2)

设置激振器振动加速度为 20 m/s^2 , 改变振动频率, FOCT 输出与振动频率的关系曲线见图 4。图 4 中, 上半部分曲线为试品施加直流电流 3000 A 的试

验结果, 下半部分曲线为试品施加电流为 0 A 的试验结果。在 1800 、 2700 Hz 附近, FOCT 的误差电流值较大, 最大值为 2868 A 。

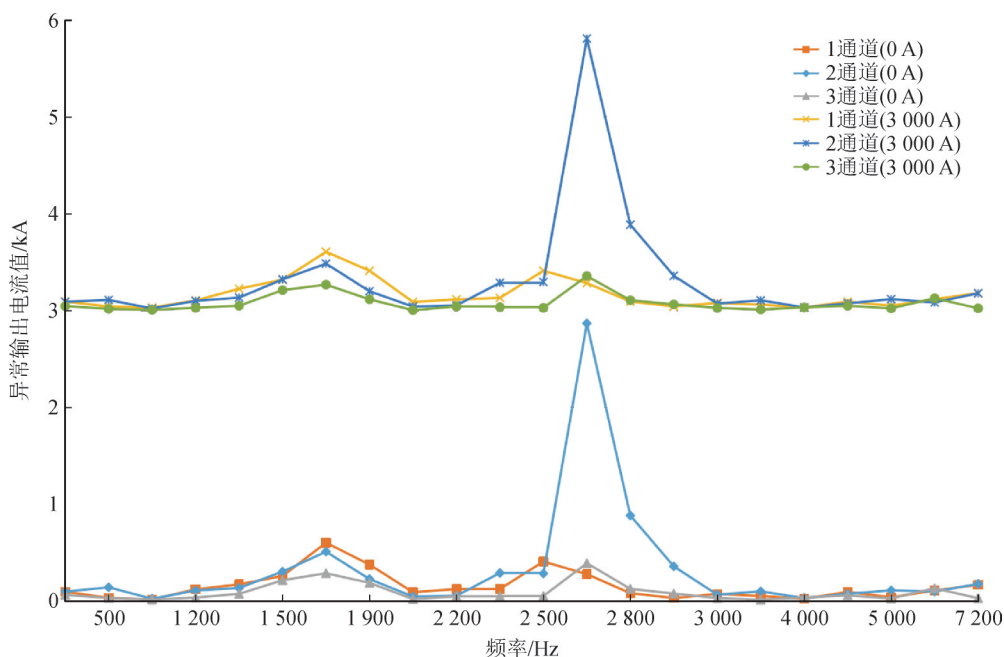


图 4 FOCT 输出与振动频率曲线图(加速度 20 m/s^2)

Fig. 4 Graph of FOCT output and vibration frequency(acceleration is 20 m/s^2)

2) 固定振动频率, 改变振动加速度。为进一步研究同一振动频率下, 不同的振动加速度对 FOCT 输出的影响, 进行了以下试验:

设置激振器振动频率为 1700 Hz , 振动加速度从 5 m/s^2 增加到 50 m/s^2 , 试品施加电流为 0 A , FOCT 输出与振动加速度的关系曲线见图 5。由图 5 可知, FOCT

异常输出电流幅值随着振动加速度的增加而增加。

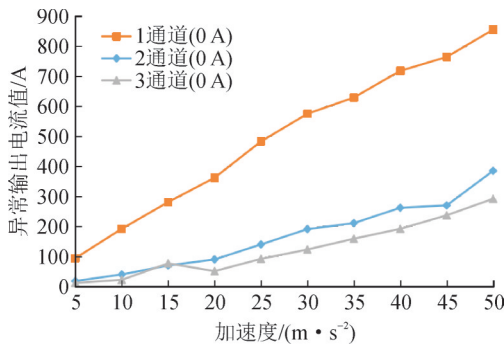


图5 FOCT输出与振动加速度曲线图(1 700 Hz)

Fig. 5 Graph of FOCT output and vibration acceleration (1 700 Hz)

设置激振器振动频率为2 900 Hz,振动加速度从5 m/s²增加到50 m/s²,试品施加电流为0 A,FOCT输出与振动加速度的关系曲线见图6。由图6可知,FOCT异常输出电流幅值随着振动加速度的增加而增加。

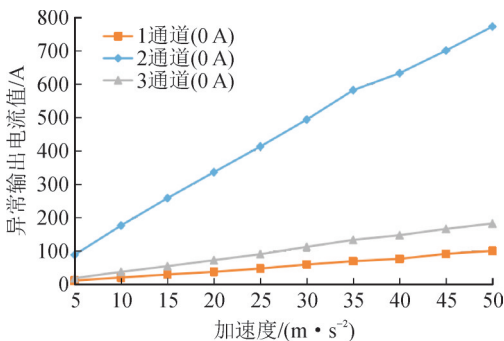


图6 FOCT输出与振动加速度曲线图(2 900 Hz)

Fig. 6 Graph of FOCT output and vibration acceleration (2 900 Hz)

2.1.5 调制箱内部器件级振动试验

将没有任何外部减振措施的调制箱直接固定于振动台上,整体进行振动试验,获取异常电流数据(见表5测试场景1);随后分别将调制箱内的器件消偏光纤(见表5测试场景2);起偏光纤(见表5测试场景3);延时光纤(见表5测试场景4);压电陶瓷(见表5测试场景5)逐个移出并进行悬吊,使其不受振动台影响。

表5 调制箱内部器件级振动试验

Table 5 Device vibration test inside modulation box

器件名称	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5
消偏光纤	√	×	√	√	√
起偏光纤	√	√	×	√	√
延时光纤	√	√	√	×	√
压电陶瓷	√	√	√	√	×
占比/%	100.0	3.5	6.5	82.8	7.2

注:“√”为放置于PZT模块内,“×”为悬吊状态;“占比”为移出某器件异常电流减小值与调制箱整体振动时异常电流值的百分比。

从表5所示的试验结果可以看出:消偏光纤进行悬吊时,异常电流减小约3.5%;起偏光纤进行悬吊时,异常电流减小约6.5%;延时光纤进行悬吊时,异常电流减小约82.8%;压电陶瓷进行悬吊时,异常电流减小约7.2%。其中延时光纤受振动影响最大,是导致试品振动条件下输出异常的关键器件。

2.2 试验结果分析

通过振动台整体振动响应试验、激振器局部振动响应试验和调制箱内部器件级振动试验3种方式,得出以下规律:

1)振动引起的FOCT故障部位为调制箱,其中的延时光纤是导致振动时FOCT输出异常的主要器件。

2)开展FOCT整体振动响应试验或激振器局部振动响应试验时,施加的振动频率与FOCT输出的异常电流频率基本一致,但低频振动时FOCT输出的异常电流中含有高频分量,其原因为低频振动会引起调制箱内部器件发生高频振动。

3)激振器局部振动响应试验,在激振器工作频率范围(0.2~10 kHz)内,不同的振动加速度均会导致FOCT产生不同大小的异常输出电流,异常输出电流幅值随着振动加速度的增加而增加。

4)激振器局部振动响应试验,在相同的振动频率和相同的振动加速度下,由振动引起的误差电流大小基本一致,不受FOCT一次施加直流电流大小的影响。

5)激振器局部振动响应试验,在同一振动加速度条件下,振动频率在激振器工作频率范围(0.2~10 kHz)内变化时,FOCT在1 800、2 700 Hz两个振动频率点附近异常输出电流值较大,最大值出现在2 700 Hz,判断产品结构的固有频率在上述两个频率点附近,当外施激励频率位于固有频率附近时,会引起高幅值共振效应,使得上述两频率点附近的异常输出电流最大。

2.3 故障原因分析

在理想光路情况下(忽略光路中传输光信号偏振态的非理想变化),PZT调制式FOCT光路输出的干涉光信号 P_D 为

$$P_D = \frac{\alpha P_0}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\varphi_F(t) + \varphi_{md} \cos \omega_m \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式(1)中: α 为光功率损耗系数; P_0 为光源输出功率; $\varphi_F(t)$ 为待测电流产生的Faraday磁滞相位角; ω_m 为调制器的调制频率; τ 为渡越时间。

调制深度 φ_{md} 为

$$\varphi_{md} = 2K_m A_{mp} \sin(\omega_m \tau / 2) \quad (2)$$

式(2)中, K_m 、 A_{mp} 、 ω_m 分别为调制器的调制系数、

调制电压幅值、调制频率。

对式(1)进行 Bessel 函数展开

$$\begin{aligned}
 P_D &= \frac{\alpha P_0}{2} [1 + J_0(\varphi_{md}) \cos \varphi_F(t)] + \\
 &\alpha P_0 \cos \varphi_F(t) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\varphi_{md}) \cos 2n\omega_m(t - \frac{T}{2}) - \\
 &\alpha P_0 \sin \varphi_F(t) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(\varphi_{md}) \cos(2n+1) \cdot \\
 \omega_m(t - \frac{T}{2}) &= \frac{\alpha P_0}{2} [1 + J_0(\varphi_{md}) \cos \varphi_F(t)] - \\
 S_1 \cos \omega_m(t - \frac{T}{2}) - S_2 \cos 2\omega_m(t - \frac{T}{2}) + S_3 \cos 3\omega_m \cdot \\
 (t - \frac{T}{2}) + S_4 \cos 4\omega_m(t - \frac{T}{2}) + \dots
 \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)中, J_n 为 n 阶第一类贝塞尔函数。

提取输出干涉光信号前4次谐波分量的幅值

$$\begin{cases} S_1 = \alpha P_0 J_1(\varphi_{md}) \sin \varphi_F(t) \\ S_2 = \alpha P_0 J_2(\varphi_{md}) \cos \varphi_F(t) \\ S_3 = \alpha P_0 J_3(\varphi_{md}) \sin \varphi_F(t) \\ S_4 = \alpha P_0 J_4(\varphi_{md}) \cos \varphi_F(t) \end{cases} \tag{4}$$

由此可得

$$\begin{cases} \varphi_F(t) = \arctan \left[\frac{S_1 \cdot J_2(\varphi_{md})}{S_2 \cdot J_1(\varphi_{md})} \right]_{\varphi_{md}} \\ \frac{S_2}{S_4} = \frac{J_2(\varphi_{md})}{J_4(\varphi_{md})} \end{cases} \tag{5}$$

由法拉第磁致旋光效应可知, Faraday 磁致相位角为

$$\varphi_F(t) = 4NV \cdot I(t) \tag{6}$$

式(6)中: $I(t)$ 为待测电流; N 为 FOCT 传感光纤环的匝数; V 为传感光纤的 Verdet 系数, 反映了光纤材料在外加磁场作用下所引起的磁致旋光效应, 受环境温度影响较大。

综上所述, 理想情况下 PZT 调制式 FOCT 的待测电流信号解调公式可表示为

$$\begin{cases} I(t) = \frac{1}{4NV} \arctan \left[\frac{S_1 \cdot J_2(\varphi_{md})}{S_2 \cdot J_1(\varphi_{md})} \right]_{\varphi_{md}} \\ \varphi_{md} = F \left[\frac{J_2(\varphi_{md})}{J_4(\varphi_{md})} \right] = F \left(\frac{S_2}{S_4} \right) \end{cases} \tag{7}$$

式(7)中, 函数 $F(x)$ 为 x 与其 2 阶和 4 阶第一类 Bessel 函数比值 $J_2(x)/J_4(x)$ 的映射关系函数。通过解调 2、4 次谐波分量幅值比可对调制深度 j_{md} 进行监测, 并能够通过实时调节调制器驱动电压实现反馈补偿, 提高调制深度的稳定性^[20-22]。

调制箱内部示意图见图 7。PZT 调制式 FOCT 调制箱中, 主要包括起偏光纤、压电陶瓷、延时光纤、消偏光纤 4 部分。通过将保偏光纤绕在压电陶

瓷上构成 PZT 相位调制器, 在压电陶瓷上施加频率为 83.3 kHz 的调制电压, 利用电场作用下压电陶瓷的体积变化引起光纤内部应变, 从而改变光纤的折射率, 实现相位调制。经过相位调制器的两束正交光通过延时光纤增加光程, 放大相位差, 再通过 1/4 λ 波片进入传感光纤。由于 PZT 调制的频率较低, 因此延时光纤的长度较长, 文中选取的试品采用的延迟光纤约为 550 m。

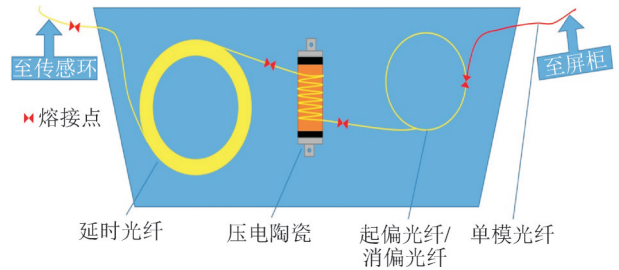


图 7 调制箱内部示意图

Fig. 7 Interior schematic diagram of modulation box

当外界振动影响到延时光纤和相位调制器上缠绕的保偏光纤时, 会产生非互易相位角 j_{bias} , 该相位角 j_{bias} 将与 Faraday 相位角 j_F 相互叠加, 引入非互易相位误差; 当外界振动影响到相位调制器的压电陶瓷时, 会影响调制系数, 从而影响调制深度 j_{md} , 调制深度 j_{md} 决定了互感器解调灵敏度, 当光路中调制深度 j_{md} 发生漂移时, $J_2(j_{md})/J_1(j_{md})$ 随之变化, 进而影响互感器准确度。非互易相位角 j_{bias} 与振动的关系为

$$\varphi_{bias} = \frac{2\pi l_p}{L_b^2} \cdot \frac{\partial L_b}{\partial V_b} \cdot \frac{\partial V_b}{\partial t} \cdot \tau_0 \tag{8}$$

式(7)中: L_b 、 l_p 为受振动干扰光纤的拍长、长度; τ_0 为干扰处距反射镜的时间延时; V_b 为振动幅值, $\partial L_b/\partial V_b$ 为拍长随振动的变化; $\partial V_b/\partial t$ 为振动随时间的变化。

因此振动引起的误差与受振动干扰的光纤长度、干扰处距反射镜的时间延时、振动幅值、振动加速度均相关^[23-25]。文中 FOCT 试品延迟光纤长度达到 550 m, 且调制箱与互感器底座之间、内部调制模块与调制箱之间均为螺栓紧固的刚性连接, 无任何减振措施, 因此外部振动直接传导至调制箱内部的敏感器件(延时光纤、相位调制器), 导致异常输出。

2.4 减振措施

为了减少外部振动对调制箱的影响, 使 FOCT 在振动条件下异常输出电流值小于保护整定值, 需对调制箱采取减振措施。对调制箱的减振措施分为两个方面: ①调制箱与互感器底座之间的外部减振; ②调制箱内各调制模块和器件之间的内部减振^[26-28]。

外部减振隔离 FOCT 本体安装底座和敲击振动

传导至调制箱的影响,主要措施包括:

- 1)结构上调制箱外挂固定在互感器底座上,在固定连接螺栓处增加减振垫圈,见图8。
- 2)通过安装减振条隔离调制箱与互感器底座,缓冲钢构振动对箱体的影响,见图9。
- 3)在调制箱外配备专用防护罩壳,减少敲击振动的影响,见图10。
- 4)生产总装过程中,使用水平尺进行测量,保证调制箱与设备底座装配时处于水平状态。

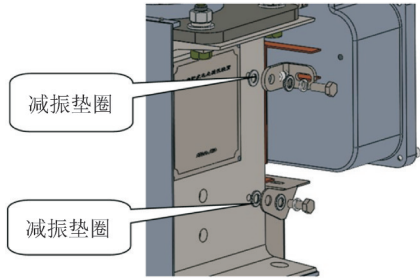


图8 连接螺栓处的减振垫圈

Fig. 8 Damping washers at connecting bolts

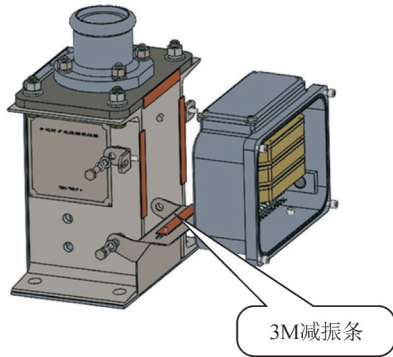


图9 调制箱与底座安装减振条

Fig. 9 Damping bar for modulation box and base

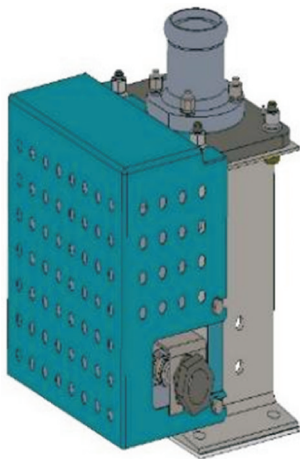


图10 调制箱外部的防护罩

Fig. 10 Protective cover of the modulation box

内部对调制箱内各调制模块进行减振升级,避免调制箱体的振动传递到调制模块内的延时光纤上,主要措施见图11。包括:

- 1)将调制模块安装在独立悬浮框架内,不与调制箱体有任何刚性连接。
- 2)悬浮框架与箱体之间通过凝胶减振底脚连接,减小外部振动对调制模块安装框架的影响。
- 3)在工艺控制上,调制箱内的悬浮框架禁止被硬物限位,悬浮框架组装后,进行模拟振动试验,确保悬浮框架可以自由运动。
- 4)调制模块内部固定延时线圈的凝胶采用定量方式,避免凝胶分布不均导致延时光纤局部受振动。

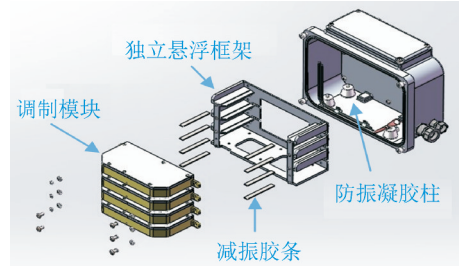


图11 调制箱内部减振设计

Fig. 11 Vibration reduction design inside the modulation box

2.5 减振后复测

2.5.1 整体振动响应试验

对采取减振措施的FOCT进行整体振动响应试验。将试品垂直安装在振动台上,施加正极性直流电流3 000 A,对试品整体开展垂直方向、水平横向、水平轴向的振动响应试验,振动水平满足幅度10 m/s²,频率10~150 Hz;幅度5 m/s²,频率150~2 000 Hz。试验结果见表6。试品输出的最大误差电流90 A。依据保护装置整定值为额定电流3.3%计算,试品在额定电流3 000 A时受振动影响输出的最大误差电流应不大于99 A。减振措施有效,可满足运行要求。

表6 整体振动响应试验

Table 6 Integral vibration response test

振动频率/Hz	振动加速度/(m·s ⁻²)	一次电流/A	最大异常输出电流/A	最大误差电流/A
10~150	5	3 000	3 030	30
	10	3 000	3 050	50
	20	3 000	3 080	80
	20	1 500	1 518	18
	20	800	825	25
	20	0	17	17
150~2 000	5	3 000	3 032	32

2.5.2 通过激振器对调制箱开展振动试验

将试品垂直安装,分别施加电流0 A和直流电流3 000 A。利用激振器对试品调制箱的正面施加

振动, 振动频率200~7 000 Hz, 加速度分别为10、20、30 m/s², 试验结果见表7, 试品输出的最大误差电流为69 A, 小于保护装置整定值99 A。减振措施有效, 可满足运行要求。

表7 激振器对调制箱开展的振动试验

Table 7 Vibration test of modulator box by exciter

振动频率/Hz	振动加速度/(m·s ⁻²)	一次电流/A	最大误差电流/A	最大异常输出电流出现频率/Hz
200~7 000	10	0	10	1 000
200~7 000	20	0	8	300
200~4 600	30	0	35	300
200~5 000	30	3 000	59	300

3 结论

1) 振动对压电陶瓷调制式全光纤电流互感器影响最大的部位为调制箱, 其中的延时光纤是导致振动时FOCT输出异常的主要器件。

2) 当外界振动影响到延时光纤时, 会产生非互易相位角, 该相位角将Faraday相位角相互叠加, 引入非互易相位误差。振动引起的误差与受振动干扰的光纤长度、干扰处距反射镜的时间延时、振动幅值、振动加速度均相关。

3) 开展FOCT整体振动响应试验或激振器局部振动响应试验时, FOCT输出的误差电流大小不受一次直流电流大小的影响, 输出的异常电流主频率和施加的振动频率基本一致, 但是当外施激励频率位于产品结构的固有频率附近时, 会引起高幅值共振效应, 使得固有频率点附近的异常输出电流较大, 影响试验结果的判定。

4) 通过减振结构设计, 增加减振条、凝胶柱、防护罩等方式可以有效降低振动时的异常电流, 但是所采用的减振材料的质量和寿命还有待进行长期考核。

参考文献:

[1] 王耀, 赵玉灿, 阎嫦玲, 等. 基于闭环算法的光学电流互感器的暂态电流误差特性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 148-154.
WANG Yao, ZHAO Yucan, YAN Changling, et al. Study on transient current error characteristics of optical current transformer based on closed-loop algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 148-154.

[2] 刘博闻, 邹国平, 魏兴昌, 等. 用于过电压检测的电流互感器高频等效电路建模方法[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 156-162.
LIU Bowen, ZOU Guoping, WEI Xingchang, et al. Modeling method of high-frequency equivalent circuit of current transformer

for overvoltage detection[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 156-162.

[3] 王中, 李振华, 成俊杰, 等. Rogowski线圈电流互感器故障的早期诊断研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 162-168.
WANG Zhong, LI Zhenhua, CHENG Junjie, et al. Research on early diagnosis of fault of current transformer with Rogowski coil[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 162-168.

[4] 李振华, 陈兴新, 蒋伟辉, 等. 基于弹性网络的空心线圈电流互感器误差预测[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 134-141.
LI Zhenhua, CHEN Xingxin, JIANG Weihui, et al. Error prediction of air-core-coil current transformer based on elastic network[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 134-141.

[5] 周浪, 刘水平, 杨茜, 等. 防爆型油浸式电流互感器研制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 89-97.
ZHOU Lang, LIU Shuiping, YANG Qian, et al. Development on explosion-proof oil-immersed current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 89-97.

[6] 孙帆, 王维庆, 金铭, 等. 油浸型倒立式电流互感器内绝缘缺陷特征及检测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 120-126.
SUN Fan, WANG Weiqing, JIN Ming, et al. Inner insulation defect characteristic and detection method of oil immersed inverted current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 120-126.

[7] 宋璇坤, 闫培丽, 肖智宏, 等. 全光纤电流互感器技术应用评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 149-154.
SONG Xuankun, YAN Peili, XIAO Zhihong, et al. Comment on the technology and application of fiber optic current transformer(FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 149-154.

[8] 袁亮, 韩笑, 郑拓夫, 等. 高速测量型全光纤电流互感器[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(7): 83-88.
YUAN Liang, HAN Xiao, ZHENG Tuofu, et al. High speed measurement type of fiber optical current transformer[J]. Metrology & Measurement Technique, 2021, 48(7): 83-88.

[9] HUANG Yuhao, XIA Li, PANG Fubin, et al. Self-compensative fiber optic current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(7): 2187-2193.

[10] HUANG Yuhao, HU Bei, PENG Shen, et al. Improving the computational efficiency of birefringent model based on equivalent matrix and modified permittivity[J]. Optics Communications, 2021(488): 126819.

[11] 阎嫦玲, 罗苏南, 文继锋, 等. 基于FARADAY旋光镜的光学电流互感器分析与试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 179-184.
YAN Changling, LUO Sunan, WEN Jifeng, et al. Study on analysis and test of optical current transformer based on FARADAY rotation mirror[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 179-184.

[12] 胡蓓, 肖浩, 李建光, 等. 光纤电流互感器的噪声分析与信噪比优化设计[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 654-660.
HU Bei, XIAO Hao, LI Jianguang, et al. Noise analysis and snr optimization design of fiber optical current transformers[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 654-660.

[13] 张敏杰. 开环Sagnac干涉仪的数字信号处理[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 12-16.

- ZHANG Minjie. Digital signal processing for open-loop Sagnac interferometer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 12-16.
- [14] 庞福滨,袁宇波,戴 锋,等. 全光纤电流互感器性能干扰因素分析及解决方案综述[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 64-72.
PANG Fubin, YUAN Yubo, DAI Feng, et al. Analysis of interference factors of all-fiber-current-transformer performance and summary of solutions[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 64-72.
- [15] 高压直流输电系统直流电流测量装置 第1部分:电子式直流电流测量装置:GB/T 26216. 1—2019[S].2019.
DC current measuring device for HVDC transmission system-Part 1:Electronic DC current measuring device: GB/T 26216. 1—2019 [S].2019.
- [16] 环境试验 第3部分:试验导则 地震试验方法:GB/T 2424. 25—2024[S].2024.
Environment testing Part 3: Test guidance-seismic test methods: GB/T 2424. 25—2024[S].2024.
- [17] 环境试验 第2部分:试验方法—试验Fc:振动(正弦):GB/T 2423. 10—2019[S].2020.
Environmental testing -Part2: Tests methods - Test Fc: Vibration (sinusoidal):GB/T 2423. 10—2019[S].2020.
- [18] 互感器 第6部分:低功率互感器的补充通用技术要求:GB/T 20840. 6—2017[S].2018.
Instrument transformers - Part 6: Additional general requirements for low-power instrument transformers: GB/T 20840. 6—2017[S]. 2018.
- [19] 互感器第4部分:直流电流互感器的补充技术要求 IEC 61869-14:2018[S].2018.
Instrument transformers - part 14: Additional requirements for current transformers for DC applications: IEC 61869-14: 2018[S]. 2018.
- [20] ZHANG Hao. High temperature and vibration robustness all-fiber current sensor with a fiber-loop architecture and reflection scheme [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-8.
- [21] 程 嵩. 线性双折射对全光纤电流互感器传感特性影响的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
CHENG Song. The effect of linear birefringence on sensing characteristics of fiber optic current transformer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [22] 王立辉,何 周,刘锡祥,等. 反射式光纤电流互感器光波偏振态相互转换过程中的误差特性[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 173-178.
WANG Lihui, HE Zhou, LIU Xixiang, et al. Error characteristics in mutual conversion process of reflective fiber optic current transducer's optical polarization state[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 173-178.
- [23] SHI Songjie, LIU Zhanyuan, HOU Jibiao, et al. Insensitivity of fiber-optic current transducer to vibration[C]//Proceedings of Purple Mountain Forum 2019 International Forum on Smart Grid Protection and Control. Singapore: Springer Singapore, 2020: 497-504.
- [24] 李绪友,郝金会,杨汉瑞,等. 消除萨尼亚克光纤电流传感器振动干扰的光纤补偿环研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 119-123.
LI Xuyou, HAO Jinhui, YANG Hanrui, et al. Research on the compensating fiber loop for eliminating vibration in sagnac optic current sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 119-123.
- [25] KANG Menghua, WANG Yingli, XU Jintao, et al. Vibration immunity fiber optic current sensor employing a spun or twisted highly linear birefringence fiber[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an: IEEE, 2013: 7468-7472.
- [26] 刘力卿,马小光,李 雪,等. 变压器绕组轴向振动模型及固有振动特性影响因素研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 149-155.
LIU Liqing, MA Xiaoguang, LI Xue, et al. Study on axial vibration model and influence factors of inherent vibration characteristics of transformer winding[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 149-155.
- [27] 林 婧,张佳灏,黎 旭,等. 基于振动信号的高压断路器螺栓松动故障诊断研究[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 28-33.
LIN Jing, ZHANG Jiahao, LI Xu, et al. Research on bolt looseness of high voltage circuit breaker based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 28-33.
- [28] 鲁 翔,陈向东,潘国洪,等. 变压器—套管体系的动力模型及抗震加固分析[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 149-156.
LU Xiang, CHEN Xiangdong, PAN Guohong, et al. Dynamic model and seismic reinforcement analysis of transformer-bushing system [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 149-156.

刘 彬(1983—),女,教高,研究方向为智能传感与量测技术(通信作者)(E-mail: liubin@epri.sgcc.com.cn)。