

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.05.026

# 正弦波调制 FOCT 调制回路故障对探测器输出特性影响

谷相宏<sup>1</sup>, 庞福滨<sup>2</sup>, 施纪栋<sup>1</sup>, 许璠<sup>1</sup>, 吕力<sup>1</sup>, 李天慧<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**为探究全光纤电流互感器(fiber optical current transformer, FOCT)调制回路故障对探测器输出信号影响,便于故障预测与故障诊断,文中首先建立包含光电回路相位延迟的正弦波调制 FOCT 输出信号数学模型,给出调制深度与驱动电压、二次谐波、四次谐波的数学关系式,分析定目标值调制器闭环调制、解调的基本方法。在此基础上通过建立数学模型分析调制深度对探测器输出光强峰值、平均光强、二次谐波、四次谐波的影响。据此提出发生调制回路故障时调制深度降低是导致探测器输出信号异常的关键因素,探测器输出平均光强增大、四次谐波降低、二次/四次谐波比值增加应作为调制回路故障的典型特征。最后开展实际 FOCT 模拟试验验证理论研究的有效性。

**关键词:**全光纤电流互感器(FOCT);正弦波调制;调制深度;平均光强;二次谐波;四次谐波

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)05-0232-08

## 0 引言

全光纤电流互感器(fiber optical current transformer, FOCT)由于其体积小、不与主回路连接、绝缘性能好、不易饱和、动态范围大等优点,在特高压换流站中得到了大量运用<sup>[1-4]</sup>。但 FOCT 运行受温度、振动、噪声等外界因素影响,其故障率远高于常规电磁型电流互感器<sup>[5-8]</sup>。

文献[9]研究认为,FOCT 故障分为渐变性和突发性故障,采用的故障诊断方法主要包括基于解析模型的诊断方法、基于信号处理的诊断方法、基于知识的诊断方法等。文献[10]指出,针对突发性故障和渐变性故障,在闭环调制解调方法的基础上,可人为引入调制误差量,通过干涉光强的解调反映出 FOCT 光路衰减、偏振态劣化、突然断裂等故障。文献[11]指出渐变性故障在故障早期表现为测量误差异常,提出了一种基于相位不变原理的 FOCT 早期故障诊断方法,通过分析实际相位差的变化是否有异常,实现早期测量故障诊断。文献[12]通过定量分析 FOCT 信号时频域特征参数的优劣程度,将低频均值特征参数作为反映渐变故障趋势的特征参数集,并将此用于构建 FOCT 渐变故障信号预测模型,从而准确获取 FOCT 的渐变性故障状态特征并进行故障预警。文献[13]通过建立 FOCT 渐变性故障诊断模型,利用特征向量集训练,构建基于支持向量机的 FOCT 渐变故障诊断模型,利用多网

格参数寻优法对模型参数进行优化,提升故障诊断准确性。

文献[14]指出,FOCT 故障次数约占电流互感器故障总次数的 91.64%,正弦波调制 FOCT 约占 FOCT 总数量的 32%。2020 年—2021 年,淮安换流站、德阳换流站、金华换流站相继因为调制器故障导致直流系统停运、交流滤波器跳闸。针对调制回路故障,现有研究尚未建立数学模型,探究调制回路参数变化对探测器输出信号的影响。鉴于此,文中结合正弦波调制 FOCT 工作原理,给出 FOCT 探测器输出数学模型;在此基础上,通过贝塞尔函数提取调制回路故障重要特征参数,并进一步分析调制深度对探测器输出信号中二次谐波、四次谐波以及平均光强的影响;据此提出平均光强增大、四次谐波降低、二次/四次谐波比值增大应作为调制回路故障的典型特征;最后运用现场故障案例验证了理论的正确性。文中得到的相关结论对于提高正弦波调制 FOCT 状态监测水平以及实现故障预警具有一定指导意义。

## 1 正弦波调制 FOCT 输出信号模型建立

### 1.1 压电陶瓷驱动调制器调制原理

为了增强 FOCT 测量小电流的准确级以及辨别其方向性,必须引入相位调制器。压电陶瓷驱动(piezoelectric, PZT)相位调制器基于逆压电效应和光弹效应,当在其内外施加驱动电压时,PZT 管的外径周长会发生变化,绕制在 PZT 管的光纤长度、折射率大小及其分布随之发生变化,从而使光纤内传输的光波相位发生改变。线性偏振光经 45°熔接点

收稿日期:2023-03-14;修回日期:2023-05-10

基金项目:国家电网有限公司科技项目“换流站光学直流电流互感器可靠性提升与故障预警技术研究”

后,分解为两束偏振光,沿  $X$  轴(慢轴)、 $Y$  轴(快轴)传输,两束相干光经调制器、传感环、反射镜,再次返回调制点时会产生时延,并产生调制相移。最后携带相位信息的两束偏振光在光纤起偏器处发生干涉并进入光电探测器。进入光电探测器中的两束相干光相位差中不仅包含调制器调制的相位,也包含传感环中的法拉第相移,探测器通过解调出法拉第相移达到测出实际一次电流的目的<sup>[15-16]</sup>。

图 1 为正弦波 FOCT 调制回路等效电路。图中  $C$  为线缆管理盒(cable manage box, CMB),其为并联电容; $C_d$ 、 $R_1$ 、 $L_1$ 、 $C_1$  分别为 PZT 中阻尼电容、等效电阻、等效电感和等效电容。可知,PZT 本身可等效为 RLC 元件,其共振频率为  $\omega_1$ 。为了能驱动 PZT 元件有效工作,实现相位调制,此时须从电子单元处引出驱动电压  $U(t)$ ,工作频率为  $\omega$ , $\omega \neq \omega_1$ <sup>[17]</sup>。

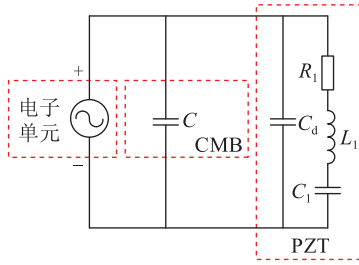


图 1 调制回路等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of modulation loop

由于调制回路为电回路结构,调制信号和被解调光信号之间存在相位延迟  $\theta_0$ ,若 PZT 调制器外施正弦波电压  $U(t) = U_\omega \sin(\omega t + \theta_0)$ ,其中  $U_\omega$  为外施电压幅值; $t$  为时间。则 PZT 产生的偏置相位  $\phi(t)$  可表示为<sup>[18]</sup>:

$$\phi(t) = \phi_\omega \sin(\omega t + \theta_0) \quad (1)$$

式中: $\phi_\omega$  为调制相位幅度。

假设调制点至反射镜的长度为  $l$ ,传播速度为  $v$  (取  $2 \times 10^8$  m/s),则两束光经过 PZT 产生的延时  $\tau$  可表示为:

$$\tau = \frac{2l}{v} \quad (2)$$

联立式(1)和式(2),可解得 PZT 实现的相位调制为:

$$\Delta\phi = \phi_\omega \sin(\omega t + \theta_0) - \phi_\omega \sin(\omega(t - \tau) + \theta_0) \quad (3)$$

对于调制器而言,调制频率  $\omega$ 、延时光纤长度  $l$  都是确定的,调制深度  $\phi_{md}$  与调制幅度  $\phi_\omega$  直接相关, $\phi_{md}$  表征调制器调制时产生相移的幅度,令  $\phi_{md}$  为:

$$\phi_{md} = 2\phi_\omega \sin\left(\omega \frac{\tau}{2}\right) \quad (4)$$

则调制器产生相移  $\Delta\phi$  为:

$$\Delta\phi = \phi_{md} \cos(\omega t' + \theta_0) \quad (5)$$

式中: $t' = t - (\tau/2)$ 。

## 1.2 计及光电相位延迟的正弦波调制 FOCT 探测器输出信号推导

在理想光路情况下,FOCT 两束相干光经过光电探测器中的相移包含法拉第相移以及调制器产生的相移。根据安培环路定理以及 FOCT 工作原理,传感环产生的法拉第相移  $\phi_F(t)$  可表示为:

$$\phi_F(t) = 4NVI(t) \quad (6)$$

式中: $\phi_F(t)$  为法拉第相移,表征因法拉第磁光效应在传感光纤内产生的光波位移量; $N$  为传感光纤绕制圈数; $V$  为光纤维尔德系数; $I(t)$  为待测一次电流。

FOCT 探测器输出信号  $P(t)$  可表示为:

$$P(t) = \frac{1}{2}KLP_0(1 + \cos(\phi_F(t) + \phi_{md} \cos(\omega t' + \theta_0))) \quad (7)$$

式中: $K$  为光电转换系数; $L$  为光路产生损耗; $P_0$  为电子单元光源产生光强。

对式(7)进行贝塞尔函数<sup>[19-20]</sup>展开,可以得到:

$$P(t) = \frac{1}{2}KLP_0 \left\{ 1 + [J_0(\phi_{md}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\phi_{md}) \cos(2n\omega t' + \theta_0)] \cos \phi_F(t) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\phi_{md}) \times \cos((2n-1)\omega t' + \theta_0) \sin \phi_F(t) \right\} \quad (8)$$

式中:贝塞尔函数为  $J_n(\phi_{md}) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (\phi_{md}/2)^{n+2k}}{k! (n+k)!}$ ,  
 $n=0,1,2,\dots; k \geq 0$ 。

根据式(8),探测器输出信号中包含与  $\phi_{md}$  相关的无穷次谐波分量、传感环法拉第相移、光电回路相位延迟、光源产生光强等。为了实现对  $I(t)$  以及  $\phi_{md}$  的解调,必须提取其谐波分量,对于正弦波调制 FOCT,基波、二次谐波以及四次谐波中不仅包含被测电流的法拉第相移  $\phi_F$ ,也包含调制器实际  $\phi_{md}$ 。为测算  $I(t)$  及  $\phi_{md}$  的大小,取基波分量  $P_1$ 、二次谐波分量  $P_2$ 、四次谐波分量  $P_4$  幅值分别为:

$$\begin{cases} P_1 = KLP_0 J_1(\phi_{md}) \sin \phi_F(t) \\ P_2 = KLP_0 J_2(\phi_{md}) \cos \phi_F(t) \\ P_4 = KLP_0 J_4(\phi_{md}) \cos \phi_F(t) \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9),可以解调出  $I(t)$  和  $\phi_{md}$  为:

$$\begin{cases} I(t) = \frac{1}{4VN} \operatorname{arccot} \left( \frac{P_2 J_1(\phi_{\text{md}})}{P_1 J_2(\phi_{\text{md}})} \right) \\ \phi_{\text{md}} = F \left( \frac{J_2(\phi_{\text{md}})}{J_4(\phi_{\text{md}})} \right) = F \left( \frac{P_2}{P_4} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $F$  为包含  $P_2$ 、 $P_4$ 、 $\phi_{\text{md}}$  的函数。

式(10)提供了正弦波调制 FOCT 电流解调方法,对于调制器,  $\phi_{\text{md}}$  与式(10)中  $J_2(\phi_{\text{md}})/J_4(\phi_{\text{md}})$  有关,一旦  $\phi_{\text{md}}$  解调出现误差,必然影响电流测量精度。对于正弦波调制 FOCT,其电子单元伺服系统须控制  $\phi_{\text{md}}$ ,而  $\phi_{\text{md}}$  不仅与  $P_2$ 、 $P_4$  有关,也与  $\phi_\omega$ 、 $\tau$  有关,可联立式(1)、式(4)、式(10),得:

$$\begin{cases} \phi(t) = \phi_\omega \sin(\omega t + \theta_0) \\ \phi_{\text{md}} = 2\phi_\omega \sin\left(\omega \frac{\tau}{2}\right) \\ \phi_{\text{md}} = F \left( \frac{J_2(\phi_{\text{md}})}{J_4(\phi_{\text{md}})} \right) = F \left( \frac{P_2}{P_4} \right) \end{cases} \quad (11)$$

对于 FOCT 电子单元伺服系统来讲,调制器闭环控制时须保证  $\phi_{\text{md}}$  为目标值,而不同 FOCT 调制器中调制点至反射镜的长度  $l$  不同,造成  $\tau$  不同,而调制器频率一定,所以当调制目标值一定时,不同 FOCT 调制器  $\phi_\omega$  不同。PZT 实际接收到的  $\phi_{\text{md}}$  是通过解调  $P_2$ 、 $P_4$  实现的。而在角速度  $\omega$ 、光纤长度  $l$  确定的情况下,可以通过实时调节调制器外施驱动电压  $U(t)$  实现对  $\phi_{\text{md}}$  的闭环控制。

## 2 调制回路故障引起探测器输出信号异常机理分析

### 2.1 正弦波调制 FOCT 被测电流数据无效检测机理

直流保护中使用的正弦波 FOCT 被测电流误差须严格保证在 0.2% 内,由式(10)、式(11)可知,电流解调精度主要受  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\phi_{\text{md}}$  等参数影响,  $\phi_{\text{md}}$  解调主要受  $P_2$ 、 $P_4$  影响,所以可以认为电流解调精度与  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_4$  均有关。结合式(9),基波  $P_1$  是法拉第相移  $\phi_F$  的正弦函数,  $P_2$ 、 $P_4$  是法拉第相移  $\phi_F$  的余弦函数,当法拉第相移  $\phi_F$  较小时,  $P_1$  远小于  $P_2$ 、 $P_4$ 。而探测器输出信号中,不仅包含电流解调、调制深度解调所需要的谐波分量,还包含噪声信号。  $P_2$ 、 $P_4$  正常运行时数值较大,受噪声信号影响较小。因此,为了确保解调精度,重要的谐波分量,比如  $P_2$ 、 $P_4$  等必须满足一定幅值要求,若重要谐波分量过低或者输出信号信噪比不足时,应发出告警信号提示测点可能存在异常<sup>[21]</sup>。

由式(9)可知,  $P_2$ 、 $P_4$  主要受  $\phi_F(t)$ 、 $\phi_{\text{md}}$  以及光强峰值  $KLP_0$  等影响。  $\phi_{\text{md}}$  和  $KLP_0$  作为谐波分量测

量的误差因素,当其出现偏差时,会影响被测电流的解调。因而,在判断 FOCT 工作状态时,引入表征光回路运行状态的量光强峰值  $KLP_0$ 、调制回路运行状态的监测量平均光强  $P_{\text{avg}}$ ,  $P_{\text{avg}}$  表征周期内光信号波动幅度。当两者不满足阈值要求时,同样发出告警信号提示测点存在异常。

结合上节所述,为了进一步探究调制参数与  $P_2$ 、 $P_4$ 、 $KLP_0$  等重要监测量之间的关系,需建立数学模型,取典型参数值  $KLP_0 = 1.7 \text{ V}$ 、 $\phi_{\text{md}} = 1.8 \text{ rad}$ 、 $\omega = 5.23 \times 10^5 \text{ rad/s}$ 、 $I(t) = 5000 \text{ A}$ 、 $N = 20$ 、 $\phi_F(t) = 0.48 \text{ rad}$ 。

### 2.2 调制回路参数对探测器输出信号影响

根据文献[22]可知,贝塞尔函数  $J_n$  在  $\phi_{\text{md}} = 1.8 \text{ rad}$  和  $\phi_{\text{md}} = 3.1 \text{ rad}$  时,  $P_1$ 、 $P_2$  取得最大值。取典型  $\phi_{\text{md}}$  为 1.8 rad、2.33 rad、3.1 rad,不同调制深度下探测器输出信号波形如图 2 所示。由图 2 可以看出,当  $\phi_{\text{md}}$  为 1.8 rad、2.33 rad、3.1 rad 时,由于  $KLP_0$  为定值,结合式(7),  $1 + \cos(\phi_F(t) + \phi_{\text{md}} \cos(\omega t' + \theta_0))$  在单位周期内均可取得极大值 2,所以不同  $\phi_{\text{md}}$  下光强峰值  $KLP_0$  均为 1.7 V。当  $\phi_{\text{md}}$  分别为 1.8 rad、2.33 rad、3.1 rad 时,单位周期内,探测器输出信号峰值后第一个谷值分别为 1.06 V、0.61 V、0.11 V。当  $\phi_{\text{md}}$  逐渐增加时,探测器输出信号会出现过零点,本质上是因为法拉第相移与调制器产生相移之和为  $(2n+1)\pi$  的整数倍。

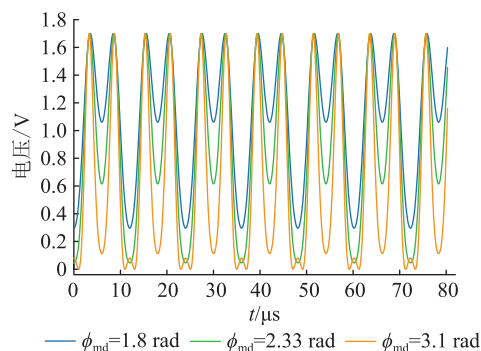


图2 探测器输出电压随调制深度变化  
Fig.2 Variation of detector output voltage with modulation depths

### 2.3 $\phi_{\text{md}}$ 对探测器输出平均光强 $P_{\text{avg}}$ 的影响

由于探测器输出信号是周期函数,假设其周期为  $T$ ,则在  $[(n-1)T, nT]$  区间内,  $P_{\text{avg}}(t)$  可表示为:

$$P_{\text{avg}}(t) = \frac{\int_{(n-1)T}^{nT} 0.5KLP_0(1 + \cos(\phi_F(t) + \phi_{\text{md}} \cos(\omega t' + \theta_0))) dt}{T} \quad (12)$$

不同  $\phi_{\text{md}}$  (即 0~5 rad) 下探测器输出平均光强

如图3所示。由图3可以看出,当 $\phi_{md}$ 在0~5 rad变化时, $P_{avg}$ 先减小后增加,当 $\phi_{md} = 4$  rad时, $P_{avg}$ 取得极小值0.5 V。而PZT调制器实际 $\phi_{md}$ 工作在0~4 rad之间,因而可认为在此区间内,探测器输出平均光强随着 $\phi_{md}$ 的增加而减小。结合图2, $\phi_{md}$ 分别为1.8 rad、2.33 rad、3.1 rad,探测器输出光强的峰值是一定的,而随着 $\phi_{md}$ 的减小,平均光强的升高是因为输出信号波谷抬升。因而,现有FOCT会通过检测平均光强的变化来反映调制信号的衰减情况,在平均光强差值大于阈值后,客观上反映调制信号出现了衰减,此时FOCT将发出告警信号提示测点存在异常。

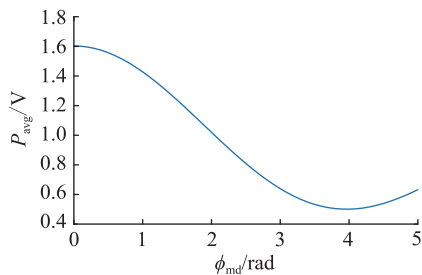


图3 不同调制深度下探测器输出平均光强

Fig.3 Output average light intensity of detector under different modulation depths

#### 2.4 $\phi_{md}$ 对探测器输出 $P_2$ 、 $P_4$ 的影响

由式(10)可知, $P_2$ 与 $I(t)$ 解调、 $\phi_{md}$ 解调均有关, $P_4$ 与 $\phi_{md}$ 解调有关,不同 $\phi_{md}$ 下探测器输出 $P_2$ 、 $P_4$ 幅值如图4所示。

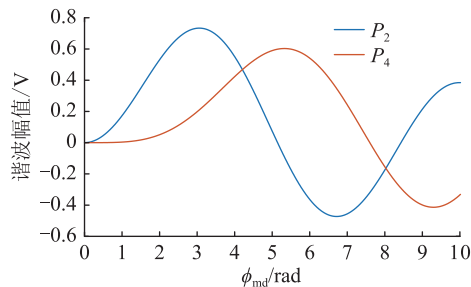


图4 不同调制深度下探测器输出二次、四次谐波

Fig.4 Second and fourth harmonic of detector output under different modulation depths

由图4可见,当 $\phi_{md}$ 为0时, $P_2$ 、 $P_4$ 均为0。当 $\phi_{md}$ 在0~4 rad变化时, $P_2$ 先增加后减小,当 $\phi_{md}$ 为3.06 rad时, $P_2$ 取得极大值0.73 V, $P_4$ 随着 $\phi_{md}$ 的增大而增加。因而,当调制回路出现断线时,探测器输出信号中 $P_2$ 、 $P_4$ 应为0。由于 $\phi_{md}$ 降低会导致 $P_2$ 降低,影响 $I(t)$ 的测算和 $\phi_{md}$ 的解调,所以当 $\phi_{md}$ 降低导致 $P_2$ 低于定值时,FOCT将发出告警信号提示测点存在异常<sup>[23]</sup>。

当 $\phi_{md}$ 为1~3.5 rad时, $P_2$ 在此范围内取得极大

值,因而 $P_2$ 降低不应作为 $\phi_{md}$ 降低的唯一参照,此时可以引入二次/四次谐波比 $k$ ,令:

$$k = \frac{J_2(\phi_{md})}{J_4(\phi_{md})} \quad (13)$$

如图5所示,当 $\phi_{md}$ 在1~3 rad变化时,探测器二次/四次谐波比值是单调递减的,正常运行状态下,定目标值调制器二次/四次谐波比值应是相对恒定的,当比值升高时,客观上反映调制器实际接收的 $\phi_{md}$ 降低。

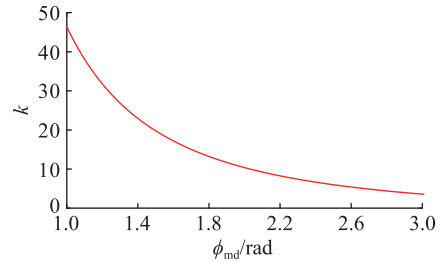


图5 不同调制深度下二次/四次谐波比值

Fig.5 Second/fourth harmonic ratio under different modulation depths

### 3 现场试验验证

现场试验采用GE公司生产的FOCT,该FOCT调制器采用正弦波调制,现场验证内容主要包含不同调制深度下FOCT探测器输出参数响应试验及调制深度为一定值时调制回路故障FOCT探测器输出参数响应试验。

#### 3.1 FOCT探测器输出信号随 $\phi_{md}$ 变化关系

现场通过修改FOCT电子单元处 $\phi_{md}$ 目标值来探究FOCT探测器输出信号随 $\phi_{md}$ 的变化关系。如图6所示,调制器两端驱动电压与 $\phi_{md}$ 呈正相关,当 $\phi_{md}$ 在1.1~2.6 rad变化时,调制器两端驱动电压从1.48 V增加至3.78 V。结合式(1)和式(4),当调制器频率 $\omega$ 、延时 $\tau$ 、光电回路相位延迟 $\theta_0$ 确定时,在同一时刻 $t$ ,因为 $\sin(\omega\tau/2)$ 、 $\sin(\omega t + \theta_0)$ 为定值,所以随着 $\phi_{md}$ 增加,调制相位幅度 $\phi_\omega$ 增加。为了达到更大的相位调制幅度,调制器两端驱动电压 $U(t)$ 应增加。

不同 $\phi_{md}$ 下探测器输出信号二次/四次谐波如图7所示。

由图7可以看出,当 $\phi_{md}$ 在0.80~2.54 rad变化时,随着 $\phi_{md}$ 增加,探测器输出 $P_2$ 、 $P_4$ 幅值(功率放大器输出值)同步增加,与上文所述 $\phi_{md}$ 低于3.06 rad时, $P_2$ 、 $P_4$ 随着 $\phi_{md}$ 同步变化的仿真结果一致。同时,在此 $\phi_{md}$ 范围内,随着 $\phi_{md}$ 的增加,二次/四次谐波比值减小。

探测器输出光强随调制深度变化关系如图8所

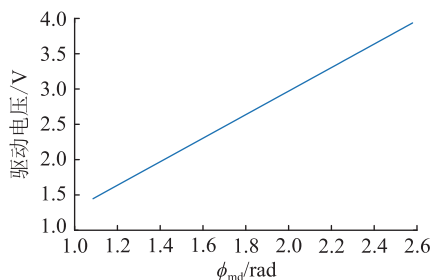
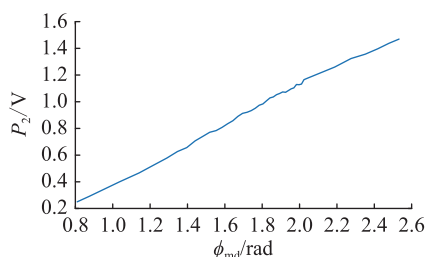
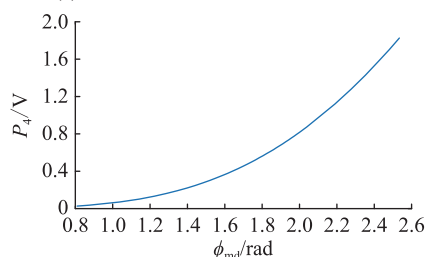


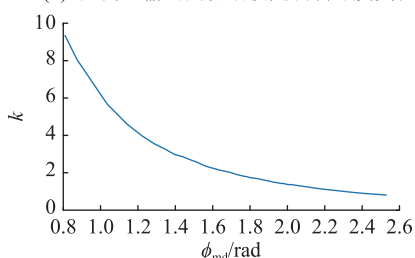
图6 不同调制深度下 FOCT 电子单元输出驱动电压  
Fig.6 Driving voltage of FOCT electronic unit output under different modulation depths



(a) 探测器输出二次谐波随调制深度变化



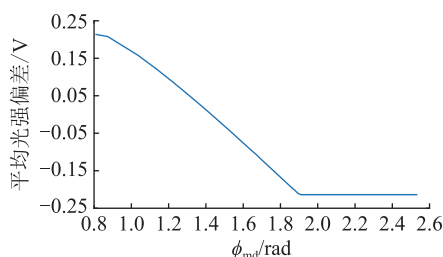
(b) 探测器输出四次谐波随调制深度变化



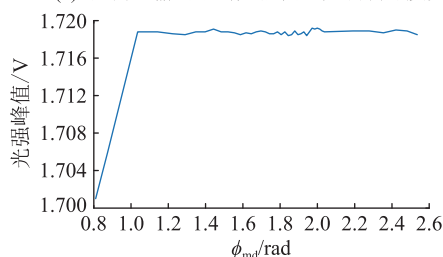
(c) 探测器输出二次/四次谐波比值随调制深度变化

图7 不同调制深度下探测器输出谐波变化  
Fig.7 Variation of detector output harmonic under different modulation depths

示。光强平均偏差表征的是单位周期内探测器接收实际光强平均值偏离基准值的幅度,正常情况下在 0 V 附近波动。由图 8 可以看出,当  $\phi_{md}$  为 0.80~2.54 rad 时,光强平均偏差由 0.213 8 V 降低至 -0.213 8 V,光强峰值在 1.701~1.719 V 之间变化。结合图 3 仿真波形,随着  $\phi_{md}$  的增加,平均光强实际值减小,而理想  $\phi_{md}$  下平均光强值为恒定值(0.213 8 V),进而造成平均光强偏差值降低。由于探测器平均光强偏差输出下限值为 -0.213 8 V,所以当  $\phi_{md}$  增加至 1.90 rad 时,平均光强偏差值输出达到下限值后不变。



(a) 探测器输出平均光强偏差随调制深度变化



(b) 探测器输出光强峰值随调制深度变化

图8 探测器输出光强随调制深度变化  
Fig.8 Light intensity of detector output under different modulation depths

### 3.2 FOCT 探测器输出信号随调制回路外回路变化关系

现场通过调制回路串联电阻来模拟调制回路搭接不良,电子单元  $\phi_{md}$  目标值不变。如图 9 所示,当外部串联 20  $\Omega$  电阻时,调制器驱动电压从 4.72 V 增加至 6.19 V。通过二次/四次谐波比值升高可以看出,由于外接电阻的分压,PZT 实际接收到的  $\phi_{md}$  是减小的,因而需要增加驱动电压来保证 PZT 接收  $\phi_{md}$  的恒定。同时,在调节过程中, $P_2$ 、 $P_4$  先减小再增加。一方面,由于外接电阻的分压,调制器实际接收的  $\phi_{md}$  较小,导致二次、四次谐波减小;另一方面,由于电子单元处设定调制器目标值是一定的,当检测到二次/四次谐波比值增加时,调制器通过增加驱动电压来保证  $\phi_{md}$  的恒定。因而,随着驱动电压的增加,探测器接收的二次、四次谐波值在增加,二次/四次谐波比值最终恢复到 2.70 附近,与故障前接近。随着 PZT 接收  $\phi_{md}$  的减小,平均光强偏差显著增加,从 -0.222 0 V 增加至 -0.013 9 V,并最终稳定在 -0.023 1 V。

由图 10 可知,当外部串联 40  $\Omega$  电阻时,调制器驱动电压从 4.72 V 增加至 8.21 V,此时  $P_2$ 、 $P_4$  分别为 0.617 7 V、0.163 1 V,仍未达到理想状态值。由于驱动电压调节具有限值功能,在驱动电压达到限值,PZT 接收到的  $\phi_{md}$  低于目标值后,电子单元将通过轮询方式,改变驱动电压值,以获得理想的  $\phi_{md}$ 。所以,驱动电压在达到限值后,在 3.0~8.5 V 间反复变化。在驱动电压调节过程中,平均光强偏差值大于限值后,电子单元立即报出故障,退出相应保护。

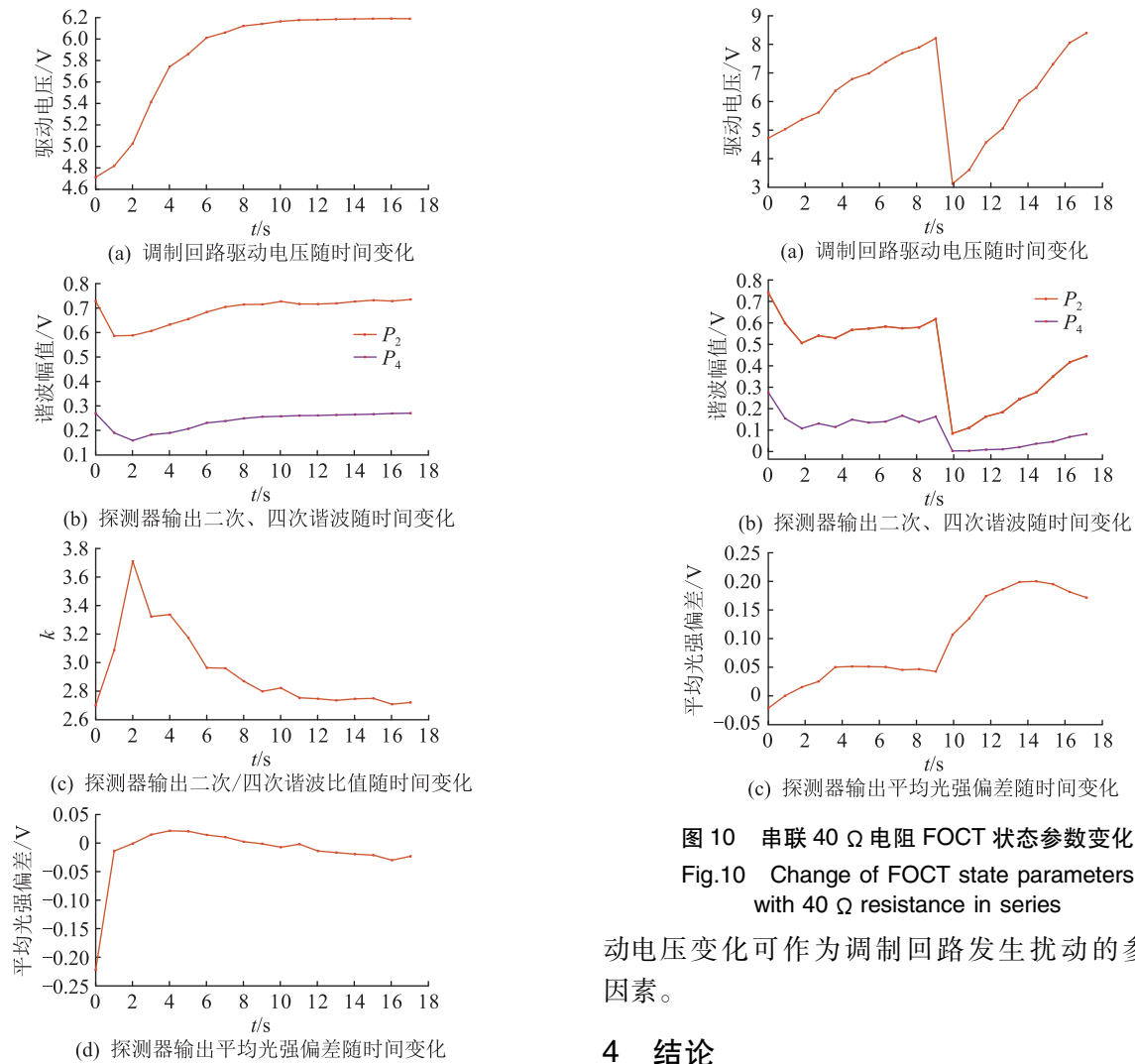


图9 串联 20  $\Omega$  电阻 FOCT 状态参数变化  
Fig.9 Change of FOCT state parameters with 20  $\Omega$  resistance in series

### 3.3 FOCT 调制回路故障判断建议

光回路故障和调制回路故障是 2 种重要的 FOCT 故障类型。光回路故障会导致光强峰值  $KLP_0$  减小、调制回路故障会导致  $J_2(\phi_{md})$ 、 $J_4(\phi_{md})$  减小,所以 2 种不同类型故障发生均会导致  $P_2$ 、 $P_4$  分量降低,因此判断谐波分量并不是判断不同故障类型的差异性因素<sup>[24-26]</sup>。

而由于  $\phi_{md}$  降低会导致平均光强  $P_{avg}$  升高,而光回路故障时, $KLP_0$  减小会导致  $P_{avg}$  降低,所以通过判断平均光强  $P_{avg}$  变化才是判断调制回路故障和光回路故障的差异性因素。

此外,由于  $\phi_{md}$  降低会导致二次/四次谐波比值发生变化,所以通过比较二次/四次谐波比值可以直观反映  $\phi_{md}$  是否发生变化。而当电子单元采用定目标值调制时,实际  $\phi_{md}$  降低时,必然通过提高调制电压增大调制幅值  $\phi_{\omega}$  实现  $\phi_{md}$  的闭环控制,因而驱

图 10 串联 40  $\Omega$  电阻 FOCT 状态参数变化  
Fig.10 Change of FOCT state parameters with 40  $\Omega$  resistance in series

动电压变化可作为调制回路发生扰动的参考性因素。

## 4 结论

文中通过建立正弦波 FOCT 探测器输出信号数学模型,分析调制回路故障衍生机理,在此基础上分析调制回路参数对探测输出信号的影响,得出结论如下:

(1) 调制回路故障中, $\phi_{md}$  改变是造成正弦波调制 FOCT 探测器输出信号异常的根本原因。 $\phi_{md}$  降低会造成  $P_{avg}$  增大, $P_4$  减小,二次/四次谐波比值增大。

(2)  $\phi_{md}$  与调制幅度等相关,而调制幅度的改变是通过改变驱动电压来实现。因而调制回路发生故障时,驱动电压变化应作为  $\phi_{md}$  发生变化的重要参照。

(3) 驱动电压和平均光强偏差客观反映  $\phi_{md}$  的变化,调制回路故障可通过驱动电压和平均光强偏差变化实现故障预警。

### 参考文献:

[1] 胡琛,张竹,杨爱超,等. 电子式电流互感器误差模型及误差状态预测方法[J]. 电力工程技术,2020,39(4):187-193.

HU Chen,ZHANG Zhu,YANG Aichao,et al. Error model and

- forecasting method for electronic current transformers [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4):187-193.
- [2] 刘鑫滢. 全光纤电流互感器误差特性分析与优化策略研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.
- LIU Xinying. Error characteristic analysis and optimization strategy research on fiber optic current transformers[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [3] SIMA W X, ZENG L, YANG M, et al. Improving the temperature and vibration robustness of fiber optic current transformer using fiber polarization rotator[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:1-12.
- [4] LENNER M, FRANK A, YANG L, et al. Long-term reliability of fiber-optic current sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(2):823-832.
- [5] 李岩松, 李霞, 刘君. 全光纤电流互感器传感机理建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23):6560-6569, 6624.
- LI Yansong, LI Xia, LIU Jun. Mechanism analysis and modeling on the sensing of fiber-optical current transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23):6560-6569, 6624.
- [6] BOHNERT K, HSU C P, YANG L, et al. Fiber-optic current sensor tolerant to imperfections of polarization-maintaining fiber connectors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(11):2161-2165.
- [7] GEORG M Müller, FRANK A, YANG L, et al. Temperature compensation of interferometric and polarimetric fiber-optic current sensors with spun highly birefringent fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18):4507-4513.
- [8] 李岩松, 王兵, 刘君, 等. 全光纤电流互感器测量性能的优化分析与实验研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17):4146-4153.
- LI Yansong, WANG Bing, LIU Jun, et al. Optimization analysis and experiment study on measurement performance of all-fiber optical current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17):4146-4153.
- [9] 钱文晓, 靳俊杰, 司磊, 等. 光纤电流互感器故障诊断方法研究综述[J]. 高压电器, 2020, 56(8):43-51.
- QIAN Wenxiao, JIN Junjie, SI Lei, et al. Review of fault diagnosis methods for fiber optical current transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):43-51.
- [10] 郭金刚, 司磊, 袁志军, 等. 光纤电流互感器光路故障自诊断告警算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21):172-177.
- GUO Jingang, SI Lei, YUAN Zhijun, et al. Self-diagnosing alarm algorithm for optical path fault of fiber optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21):172-177.
- [11] 刘占元, 牛晓晨, 苏红, 等. 一种全光纤电流互感器早期故障诊断方法研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(11):10-16.
- LIU Zhanyuan, NIU Xiaochen, SU Hong, et al. Research on early fault diagnosis method for all optical fiber current transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(11):10-16.
- [12] 王立辉, 罗拓, 宋亮亮, 等. 光纤电流互感器渐变故障时频特征辨识[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5):227-232.
- WANG Lihui, LUO Tuo, SONG Liangliang, et al. Identification of gradual failure time-frequency feature in fiber optical current transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):227-232.
- [13] 赵凯. 光纤电流互感器渐变故障特征及诊断算法研究[D]. 南京:东南大学, 2020.
- ZHAO Kai. Research on signal characteristics and fault diagnosis method of gradual failure for fiber optic current transformer[D]. Nanjing:Southeast University, 2020.
- [14] 阮思焯, 王德林, 徐凯, 等. 直流输电系统电子式电流互感器故障统计分析[J]. 电网技术, 2018, 42(10):3170-3175.
- RUAN Siye, WANG Delin, XU Kai, et al. ECT fault statistical analysis of DC transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(10):3170-3175.
- [15] 裘超. 光纤干涉式传感系统中PZT调制器的特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.
- XI Chao. Study on the PZT phase modulator of the interferometric fiber optic sensor system[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2012.
- [16] 程沁蕊. 基于PZT相位调制实时补偿的全光纤傅里叶变换光谱仪建模与设计[D]. 天津:天津大学, 2018.
- CHENG Qinrui. All-fiber Fourier transform spectrometer modeling and design with PZT phase modulation real-time compensation[D]. Tianjin:Tianjin University, 2018.
- [17] 周宏扬. 基于Michelson光纤干涉仪的局部放电超声检测技术研究[D]. 北京:华北电力大学, 2020.
- ZHOU Hongyang. Research on partial discharge ultrasonic detection technology based on Michelson optical fiber interferometer[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2020.
- [18] 顾生华, 孔小键, 李乃吉, 等. 正弦相位调制型光纤传感器的一种解调方案[J]. 北京理工大学学报, 1993, 13(1):49-54.
- GU Shenghua, KONG Xiaojian, LI Naiji, et al. Real time demodulation process applied to optical fiber displacement sensor for non-contact measurements[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1993, 13(1):49-54.
- [19] 张佩翰, 楼盈天, 严利平. 基于互补微分相乘的PGC-Arctan相位解调改进算法[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(1):51-59.
- ZHANG Peihan, LOU Yingtian, YAN Liping. Improved PGC-Arctan phase demodulation algorithm based on complementary differential multiplication[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2022, 47(1):51-59.
- [20] LI Y S, WANG B, LIU J. Modeling and analysis on the sensing characteristic of fiber optical current transformer[C]//IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China. IEEE, 2017:333-338.
- [21] 庞福滨, 李鹏, 魏旭, 等. 正弦波调制的全光纤电流互感器故障机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17):153-

160.  
PANG Fubin, LI Peng, WEI Xu, et al. Analysis on fault mechanism of fiber-optical current transformers with sine wave modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17):153-160.
- [22] 杨远洪, 张惟, 叙马静. 开环 FOG 中 PZT 调制器的在线研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(6):735-738.  
YANG Yuanhong, ZHANG Wei, XU Majing. In situ study on PZT modulator in open-loop FOG[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(6):735-738.
- [23] 王巍, 吴维宁, 王学锋. 调制器调制系数对光纤电流互感器测量精度的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24):64-68.  
WANG Wei, WU Weining, WANG Xuefeng. Effect of modulator modulation coefficient on measuring accuracy of fiber optic current sensor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24):64-68.
- [24] WANG L H, ZHANG W P, PANG F B. Error characteristic analysis of fiber optic current transformer with sine modulation[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65:102620.
- [25] PANG F B, LIU Y, YUAN Y B, et al. Influencing factors analysis on the detector output signal of fiber optic current transformer with sine modulation[J]. Measurement, 2020, 151:107151.
- [26] 谷相宏, 郭子哈, 张程, 等. 正弦波调制全光纤电流互感器光回路故障预警方法[J]. 广东电力, 2023, 36(7):50-59.  
GU Xianghong, GUO Zihan, ZHANG Cheng, et al. Fault early warning method for FOCT optical circuit of sine wave modulation[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7):50-59.

作者简介:



谷相宏

谷相宏(1992),男,硕士,工程师,从事直流控制保护技术研究工作(E-mail:2335012868@qq.com);

庞福滨(1987),男,博士,高级工程师,从事互感器测试技术、电力系统继电保护研究工作;

施纪栋(1991),男,硕士,高级工程师,从事直流控制保护技术研究工作。

## Influence of sine wave modulation FOCT modulation loop fault on detector output characteristics

GU Xianghong<sup>1</sup>, PANG Fubin<sup>2</sup>, SHI Jidong<sup>1</sup>, XU Jin<sup>1</sup>, LYU Li<sup>1</sup>, LI Tianhui<sup>1</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Extra-high Voltage Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of the modulation circuit fault of the fiber optical current transformer (FOCT) on the output signal of the detector, and facilitate fault prediction and fault diagnosis, the mathematical model of sine wave modulation FOCT output signal which includes the phase delay between the optical circuit and the electrical circuit is firstly established in this paper. The mathematical expressions of modulation depth, driving voltage, second and fourth harmonic are given, and the basic methods of closed-loop modulation and demodulation of the target value modulator are analyzed. On this basis, a mathematical model is established to analyze the influence of modulation depth on the peak of the detector output light intensity, average light intensity, second and fourth harmonic. Therefore, it is proposed that the modulation depth decrease is the key factor leading to the abnormal output signal of the detector when the modulation loop fault occurs, and the increase of the average light intensity of the detector output, the decrease of the fourth harmonic and the increase of the second/fourth harmonic ratio should be the typical characteristics of the modulation loop fault. Finally, the practical FOCT simulation test is carried out to prove the validity of the theory.

**Keywords:** fiber optical current transformer (FOCT); sine wave modulation; modulation depth; average light intensity; second harmonic; fourth harmonic

(编辑 吴昊)