

全光纤电流互感器系统光纤器件的双折射误差分析

陈礼昕¹, 彭光强¹, 何竞松¹, 王越杨¹, 陈辉², 王瑾²

(1. 超高压输电公司 检修试验中心, 广州 510000; 2. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210000)

摘要:为给反射式全光纤电流互感器(光CT)出现测量偏差问题提供理论依据,研究反射式光CT系统的主要光学器件对系统响应的影响机理,分析光CT各主要光学器件非理想性对电流测量准确性的影响。首先,采用琼斯矩阵描述了该系统各主要器件和数学模型,并给出系统输出光的表达式和解调检测后系统的注入电流测量值;然后,基于系统数学模型,分别分析了传感光纤的线性双折射、圆双折射的偏差和保偏光纤的线性双折射对光CT的注入电流测量值的影响。研究结果表明:传感光纤的线性双折射偏差对光CT注入电流测量准确度的影响最为突出;传感光纤的圆双折射的存在可以有效地抑制传感光纤线性双折射对光CT注入电流测量准确度的影响。

关键词:全光纤电流传感器;法拉第效应;琼斯矩阵;双折射

中图分类号:TM452 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)03-0033-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Birefringence error analysis of optical fiber devices in all fiber current transformer system

CHEN Lixin¹, PENG Guangqiang¹, HE Jingsong¹, WANG Yueyang¹, CHEN Hui², WANG Jin²

(1. EHV Power Transmission Company Overhaul and Test Center, Guangzhou 510000, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for the measurement deviation of reflective all fiber current transformer(optical CT), the influence mechanism of the main optical components of reflective optical CT system on the system response is studied, and the influence of the non ideality of the main optical components of optical CT on the accuracy of current measurement is analyzed. Firstly, the main devices and mathematical models of the system are described by Jones matrix, and the expression of the output light of the system and the measured value of the injection current of the system after demodulation and detection are given. Then, based on the system mathematical model, the effects of the linear birefringence and circular birefringence of the sensing fiber and the linear birefringence of the polarization maintaining fiber on the injection current measurement of optical CT are analyzed respectively. The results show that the linear birefringence deviation of sensing fiber has the most prominent influence on the measurement accuracy of optical CT injection current. The circular birefringence of sensing fiber can effectively suppress the influence of linear birefringence of sensing fiber on the measurement accuracy of optical CT injection current.

Key words: all-optical current transformer, faraday effect, Jones matrix, birefringence

收稿日期:2021-09-02。

基金项目:南方电网直流输电设备状态评估与故障诊断重点实验室开放基金课题资助。

作者简介:陈礼昕(1995—),男,广东佛山人,硕士,助理工程师,IEEE PES 直流电力系统技术委员会直流控制保护技术分委会秘书。主要研究方向为高压直流输电控制保护及仿真建模。



0 引言

由于高压直流输电具有远距离、大容量和低损耗等优点,因此通过输电线路实现过电压测量及保护一直是高压直流输电维护工作中重点关注的问题之一。随着电压等级及保护需求的不断升高,传统电磁式电流互感器表现出体积大、重量重,且绝缘性能及动态检测范围难以满足现今需求等问题。全光纤电流互感器(AFOCT,下文简称“光CT”)具有测量范围大、精度高、互易性优良和抗干扰性能好等优势,在高压直流

输电维护中具有广泛的应用前景^[1-5]。但是,光 CT 要求光在传播过程中保持稳定的偏振态,而光学器件的不完备性会引起偏振光之间的串扰,影响系统测量的准确度。文献[6]的研究结果表明:起偏器的消光比、对轴角度误差、1/4 波片的相位误差和传感光纤的双折射等问题都会对传输光信号中的偏振特性产生不同程度的影响,引起系统测量误差。

本文首先深入研究光 CT 系统的工作原理,采用琼斯矩阵描述该系统的各主要器件和数学模型;然后,基于系统数学模型分别分析保偏光纤的线性双折射、传感光纤的线性双折射和圆双折射的偏差对光 CT 系统的注入电流测量值的影响,并研究其影响系统响应的机制。

1 光 CT 系统工作原理及数学模型

1.1 系统工作原理

光 CT 系统是基于特定偏振态的光信号通过法拉第效应发生偏振干涉实现对传输电流的检测,其具体系统结构如图 1 所示^[7]。该系统主要包括超发光二极管(SLD)光源、探测器、耦合器、起偏器、直波导、1/4 波片、传感环和反射镜。具体的工作原理为:SLD 光源发出的平行光经耦合器进入起偏器,被起偏成 1 束消光比很高的线偏振光;经 45°熔接点后分为 2 束偏振方向相互垂直的线偏振光,经直波导被相位调制后,分别沿着保偏光纤的快轴和慢轴传输;这 2 束线偏振光在 1/4 波片处变为左旋和右旋圆偏振光,进入传感光纤后,在电流导线注入电流的法拉第效应的作用下,2 束圆偏振光的偏振面会发生角度大小相等、方向相反的旋转,其相位差为 2 倍的法拉第相移;被反射镜反射后,2 束圆偏振光的偏振模式互换(即左旋圆偏振光变为右旋圆偏振光,右旋圆偏振光变为左旋圆偏振光)后沿着原光路第二次通过传感光纤后再次受到磁场的作用,由于法拉第效应具有非互易性,2 束圆偏振光的法拉第相移加倍;2 束圆偏振光再通过 1/4 波片后,恢复为 2 束线偏振光,在起偏器处 2 束线偏振光

发生干涉,并由耦合器耦合后进入探测器^[8-9]。

1.2 系统数学模型

本文采用琼斯矩阵分别描述了光 CT 系统中各器件^[10-11]。其中,起偏器的琼斯矩阵为 L_p ,起偏器尾纤和直波导之间 45°熔接点前向或后向传输时的琼斯矩阵为 $L_{45^\circ, fw}$ 和 $L_{45^\circ, bw}$,直波导前向或后向传输时的琼斯矩阵为 $L_{PM, fw}$ 和 $L_{PM, bw}$,保偏光纤的琼斯矩阵为 L_{PMF} ,反射镜的琼斯矩阵为 L_{mirror} ,传感光纤前向或后向传输时的琼斯矩阵为 $L_{F, fw}$ 和 $L_{F, bw}$ 。由于本文主要研究的是传感光纤的线性双折射和保偏光纤的双折射,为此下面列出了传感光纤和保偏光纤的琼斯矩阵。

传感光纤的琼斯矩阵表达式为

$$\begin{cases} L_{F, fw} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} + j \sin \frac{\alpha}{2} \cos \chi & -\sin \frac{\alpha}{2} \sin \chi \\ \sin \frac{\alpha}{2} \sin \chi & \cos \frac{\alpha}{2} - j \sin \frac{\alpha}{2} \cos \chi \end{bmatrix} \\ L_{F, bw} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\beta}{2} + j \sin \frac{\beta}{2} \cos \xi & \sin \frac{\beta}{2} \sin \xi \\ -\sin \frac{\beta}{2} \sin \xi & \cos \frac{\beta}{2} - j \sin \frac{\beta}{2} \cos \xi \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

其中, α, β, χ, ξ 可由传感光纤的线性双折射 δ 和圆双折射 T 表示为

$$\begin{cases} \alpha = 2\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + (F+T)^2} \\ \beta = 2\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + (F-T)^2} \\ \chi = \arctan\left(\frac{2(F+T)}{\delta}\right) \\ \xi = \arctan\left(\frac{2(F-T)}{\delta}\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中,线性双折射 δ 和圆双折射 T 分别表示为不同偏振的光在传感光纤传输后相互之间的相位差(单位为 rad)。 F 为光经过传感环的偏转角度,可表示为

$$F = VNI_{CT} \quad (3)$$

其中, V 为传感环的维尔德常数(单位为 rad/A), N 为传感环的匝数, I_{CT} 为光 CT 的注流。理想情况下(δ, T 分别为 0)的传感光纤琼斯矩阵为

$$\begin{cases} L_{F, fw} = \begin{bmatrix} \cos F & -\sin F \\ \sin F & \cos F \end{bmatrix} \\ L_{F, bw} = \begin{bmatrix} \cos F & \sin F \\ -\sin F & \cos F \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

保偏光纤的琼斯矩阵表达式为

$$L_{PMF} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_{PMF}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, φ_{PMF} 为不同偏振的光在保偏光纤中传输后相互之间的相位差(单位为 rad)。

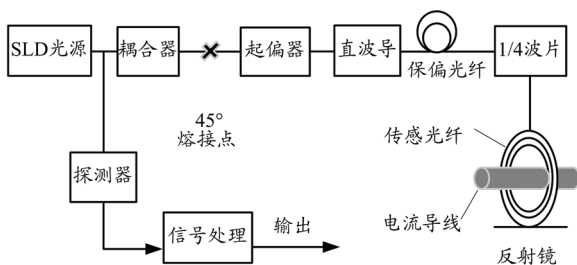


图 1 光 CT 系统结构

根据偏振光沿系统光路的传输顺序, 将各光路器件的琼斯矩阵依次左乘, 可计算得到整个系统的传输方程。将输入光表达式与系统的传输方程相乘即可得到输出光的表达式。设输入光的表达式为

$$E_{in} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, E_x 、 E_y 分别为输入光在 x 轴、 y 轴分量方向的幅度。输出光的表达式 E_0 为

$$E_0 = L_p L_{45^\circ, bw} L_{PM, bw} L_{PMF, 1/4} L_{F, bw} L_{mirror} L_{F, fw} L_{1/4} L_{PMF, 1/4} L_{PM, fw} L_{45^\circ, fw} L_p E_{in} \quad (7)$$

输出干涉光强 E 为

$$E = E_0^* E_0 \quad (8)$$

理想情况下 (双折射都为 0), 设此时经过起偏器后的光 CT 系统的测量输出光功率 P 为

$$P = \frac{1}{2} E_x^2 [1 - \sin(4F)] \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 光 CT 系统的输出光功率和相位差 $4F$ 的正弦函数成线性关系。

1.3 解调检测后光 CT 系统的注入电流测量值

光 CT 系统中探测器采集到经法拉第效应的光信号后, 对得到的光信号进行解调处理, 可以提取光信号所携带的相位信息^[12-13]。将经过起偏器后的传输损耗 (包含耦合器和光纤的传输损耗) 整体表示为 γ , 且光电探测器的响应为 R (单位为 A/W), 则经过光电探测器后的输出电流 I_p 为

$$I_p = \frac{1}{2} \gamma R E_x^2 [1 - \sin(4F)] \quad (10)$$

当传感环注流不改变、光纤存在双折射时, 经过起偏器后的光功率、经过光电探测器后的输出电流分别为 P' 、 I_p' 。假设 γ 和 R 不变, 则存在等式关系为

$$\frac{P'}{P} = \frac{I_p'}{I_p} = \frac{\frac{1}{2} \gamma R E_x^2 [1 - \sin(4F')]}{\frac{1}{2} \gamma R E_x^2 [1 - \sin(4F)]} = \frac{1 - \sin 4F'}{1 - \sin 4F} \quad (11)$$

根据式(11)可得光纤存在双折射时光经过传感环的偏转角度 F' 为

$$F' = \frac{\arcsin[1 - C(1 - \sin 4F)]}{4} \quad (12)$$

其中, 常数 $C = P'/P$ 。最后, 可求得光纤存在双折射时的光 CT 系统注流的测量值 I_{CT}' 为

$$I_{CT}' = \frac{F'}{VN} \quad (13)$$

相对于光 CT 系统注流 I_{CT} 的测量值的绝对误差 ΔI_{CT} 和相对误差 δI_{CT} 为

$$\begin{cases} \Delta I_{CT} = I_{CT}' - I_{CT} \\ \delta I_{CT} = \frac{\Delta I_{CT}}{I_{CT}} \times 100\% \end{cases} \quad (14)$$

2 影响光 CT 系统测量值的因素分析

2.1 传感光纤双折射性对光 CT 注入电流测量值的影响

图 2 为传感光纤不同的线性双折射和圆双折射下光 CT 注入电流测量值的相对误差图。本文参考文献[14]中的双折射取值, 线性双折射 δ 从 0 取到 0.01 rad, 圆双折射 T 从 0 取到 2 rad。此时, 保偏光纤线性双折射为 0, 光 CT 注流为 3000 A。

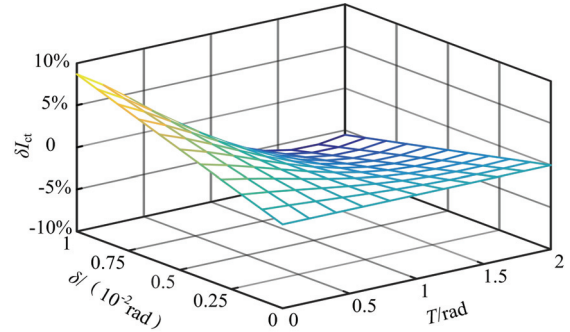


图 2 传感光纤不同的线性双折射和圆双折射下光 CT 注入电流的测量值相对误差图

从图 2 可以看出, 当圆双折射 T 很小时, 光 CT 注入电流测量值的相对误差随着线性双折射的增大而增大; 当线性双折射 δ 很小时, 圆双折射 T 对光 CT 的注入电流测量值基本不产生影响。

图 3 为传感光纤在不同的线性双折射下光 CT 注入电流测量值相对误差图。其中, 传感光纤的圆双折射 $T=0, 0.3, 0.5, 2$, 线性双折射从 0 取到 0.01 rad, 其它参数设置不变。可以看出, 当圆双折射 T 很小时, 随着传感光纤的线性双折射 δ 的增大, δI_{CT} 也随之线性增大; 随着圆双折射 T 的增大, 传感光纤的线性双折射对光

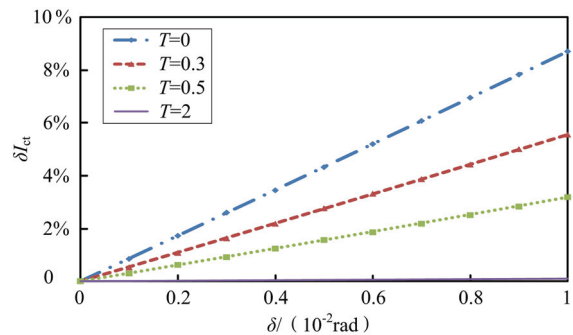


图 3 传感光纤在不同的线性双折射下光 CT 注入电流的测量值相对误差图

CT 注入电流测量值的影响逐渐变小, 即 δI_{CT} 逐渐变小。当圆双折射 T 相对很大时, 线性双折射基本对光 CT 注入电流测量值的不产生影响。这些现象可以通过传感光纤的琼斯矩阵来分析。

当圆双折射 T 为 0 时, 且 $\delta \ll F$ 时, 由式(2)给出的传感光纤琼斯矩阵的参数为

$$\begin{cases} \alpha = 2\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + F^2} \\ \beta = 2\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + F^2} \\ \chi = \arctan\left(\frac{2(F+T)}{\delta}\right) \approx \frac{\pi}{2} \\ \xi = \arctan\left(\frac{2(F-T)}{\delta}\right) \approx \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (15)$$

代入式(1)给出的传感光纤琼斯矩阵, 可得

$$\begin{cases} L_{F, fw} \approx \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} & -\sin \frac{\alpha}{2} \\ \sin \frac{\alpha}{2} & \cos \frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} \\ L_{F, bw} \approx \begin{bmatrix} \cos \frac{\beta}{2} & \sin \frac{\beta}{2} \\ -\sin \frac{\beta}{2} & \cos \frac{\beta}{2} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

比较式(16)和式(3)可得 $F' = \sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + F^2}$ 。因此, F' 、 δI_{CT} 随着 δ 的增大而增大。

当圆双折射 T 很大时, 即 $T \gg \delta$ 时, 则式(2)可表示为

$$\begin{cases} \alpha = 2\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + (F+T)^2} = 2(F+T) \\ \beta = 2\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + (F-T)^2} = 2(T-F) \\ \chi = \arctan\left(\frac{2(F+T)}{\delta}\right) = \frac{\pi}{2} \\ \xi = \arctan\left(\frac{2(F-T)}{\delta}\right) = -\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (17)$$

将 α 、 β 、 χ 和 ξ 代入式(1)可得

$$\begin{cases} L_{F, fw} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} + j \sin \frac{\alpha}{2} \cos \chi & -\sin \frac{\alpha}{2} \sin \chi \\ \sin \frac{\alpha}{2} \sin \chi & \cos \frac{\alpha}{2} - j \sin \frac{\alpha}{2} \cos \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(F+T) & -\sin(F+T) \\ \sin(F+T) & \cos(F+T) \end{bmatrix} \\ L_{F, bw} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\beta}{2} + j \sin \frac{\beta}{2} \cos \xi & \sin \frac{\beta}{2} \sin \xi \\ -\sin \frac{\beta}{2} \sin \xi & \cos \frac{\beta}{2} - j \sin \frac{\beta}{2} \cos \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(T-F) & -\sin(T-F) \\ \sin(T-F) & \cos(T-F) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $L_{F, fw}$ 表示前向传感光纤经过 2 束圆偏振光产生了 $2(F+T)$ 的相位差, $L_{F, bw}$ 表示后向传感光纤经过 2 束圆偏振光又产生了 $2(F-T)$ 的相位差, 总相位差仍为 $4F$ 。所以, 当圆双折射很大时, 线性双折射对光 CT 系统注入电流测量值基本不产生影响。

由图 3 可知, 当线性双折射 δ 很小时, 传感光纤的圆双折射 T 的变化对 δI_{CT} 的影响很小。即 δ 趋近于 0 时, 代入式(2)可得

$$\begin{cases} \alpha = 2\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + (F+T)^2} = 2(F+T) \\ \beta = 2\sqrt{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + (F-T)^2} = 2(T-F) \\ \chi = \arctan\left(\frac{2(F+T)}{\delta}\right) = \frac{\pi}{2} \\ \xi = \arctan\left(\frac{2(F-T)}{\delta}\right) = -\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (19)$$

将 α 、 β 、 χ 和 ξ 代入式(1)可得

$$\begin{cases} L_{F, fw} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} + j \sin \frac{\alpha}{2} \cos \chi & -\sin \frac{\alpha}{2} \sin \chi \\ \sin \frac{\alpha}{2} \sin \chi & \cos \frac{\alpha}{2} - j \sin \frac{\alpha}{2} \cos \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(F+T) & -\sin(F+T) \\ \sin(F+T) & \cos(F+T) \end{bmatrix} \\ L_{F, bw} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\beta}{2} + j \sin \frac{\beta}{2} \cos \xi & \sin \frac{\beta}{2} \sin \xi \\ -\sin \frac{\beta}{2} \sin \xi & \cos \frac{\beta}{2} - j \sin \frac{\beta}{2} \cos \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(T-F) & -\sin(T-F) \\ \sin(T-F) & \cos(T-F) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (20)$$

此时, 圆偏振光前向传输和后向传输经过传感光纤后产生的相位差依然为 $4F$ 。

2.2 保偏光纤双折射对光 CT 系统注入电流测量值的影响

保偏光纤线性双折射 δ_{PMF} 不同的情况下, 光 CT 系统注入电流的测量值绝对误差如图 4 所示。其中, 保偏光纤的线性双折射 δ_{PMF} 从 0 取到 0.01 rad, 可以

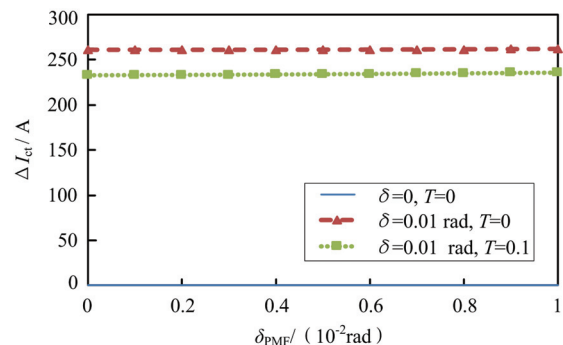


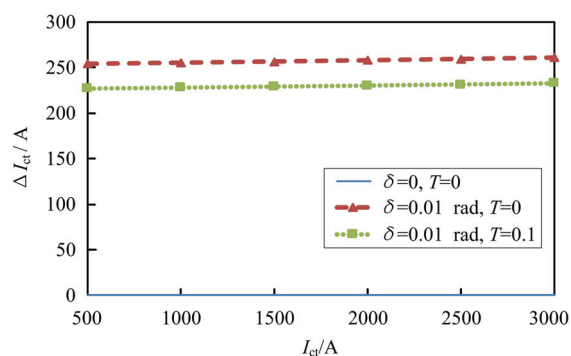
图 4 保偏光纤线性双折射 δ_{PMF} 不同的情况下, 光 CT 系统注入电流的测量值绝对误差, 其中 $I_{CT}=3000$ A

看出,当传感光纤的双折射参数不变时,保偏光纤的线性双折射 δ_{PMF} 的变化对光CT系统注入电流测量值基本不产生影响。此现象可以通过偏振光的传输理论来分析。

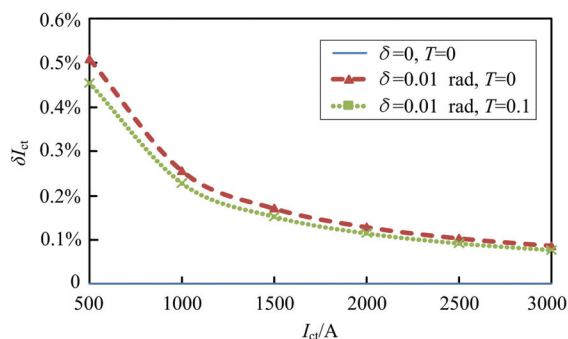
假设在沿保偏光纤快、慢轴传输的2束线偏振光,由于保偏光纤线性双折射的影响,产生了 $\Delta\varphi_1$ 的相位差(快轴-慢轴),经过1/4波片后变为2束旋向相反的圆偏振光进入传感光纤;由于磁光效应,2束圆偏振光会产生一个 $2F$ 的相位差(右旋-左旋),此时2束光的相位差为 $\Delta\varphi=2F+\Delta\varphi_1$;经过反射镜后,2束圆偏振光的旋向发生改变(左旋变右旋,右旋变左旋),相位差不变;后向传输再经过传感光纤后,会再产生一个 $2F$ 的相位差,此时相位差为 $\Delta\varphi=4F+\Delta\varphi_1$,经过1/4波片后还会再变为2束线偏振光;由于经过反射镜圆偏振光的旋向发生改变,导致前向传输时沿保偏光纤快轴的光此时沿保偏光纤慢轴传输,沿保偏光纤慢轴的光此时沿保偏光纤快轴传输,所以此时经过保偏光纤会产生一个 $-\Delta\varphi_1$ 的相位差(慢轴-快轴);最终2束光的相位差 $\Delta\varphi=4F$,即表示保偏光纤的线性双折射 δ_{PMF} 对光CT系统注入电流的测量值基本不产生影响。

2.3 光CT系统的注流变化对光CT测量值的影响

不同的工作注流下光CT系统注入电流测量值的绝对误差和相对误差如图5所示。可以看出,当传感



(a) 光CT注流测量值的绝对误差



(b) 光CT注流测量值的相对误差

图5 不同的工作注流下光CT注入电流流测量值

光纤的双折射参数不变时,光CT系统注流值的变化对光CT系统注入电流测量值绝对误差的基本不产生影响,但是光CT注入电流测量值的相对误差随光CT注入电流值的增大而变小。

3 结束语

本文基于琼斯矩阵建立了反射式光CT的系统数学模型,通过研究光CT系统内光的偏振态变化,分析了保偏光纤的线性双折射、传感光纤的线性双折射和圆双折射的偏差对系统输出响应的影响,并研究了其影响系统响应的机制。分析可得:传感光纤的线性双折射偏差对光CT系统注入电流测量准确度的影响最为突出;传感光纤的圆双折射的存在可以有效地抑制传感光纤线性双折射对光CT系统注入电流测量准确度的影响。

参考文献:

- [1] 王洪彬,唐昆明,徐瑞林,等. 数字化变电站电子式互感器渐变性故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 53-58.
- [2] 尹士玉,张世昌,吴甜. 全光纤电流互感器温度误差分析与温度误差补偿[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7): 16-21.
- [3] 邓凯,冯轩,何茂慧,等. 全光纤电流互感器在直流输电工程中的运行维护[J]. 浙江电力, 2021, 40(3): 16-20.
- [4] 徐长宝,高吉普,鲁彩江,等. 全光纤电流互感器可靠性诊断技术研究[J]. 电气应用, 2017(6): 56-59.
- [5] 张登伟,舒晓武. 干涉式光纤电流传感器[J]. 传感技术学报, 2007(2): 314-316.
- [6] 张朝阳,张春熹,王夏霄,等. 闭环光纤电流互感器误差分析与实验研究[J]. 高压电器, 2008(5): 417-419, 423.
- [7] SHORT X, ARRUDA J, TSELIKOV A, et al. Elimination of birefringence induced scale factor errors in the in-line sagnac interferometer current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 16(10): 1844-1850.
- [8] 李瑞春,赵静,李德昌. 起偏器对反射式光纤电流互感器的影响分析[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 216-219.
- [9] 肖浩,刘博阳,湾世伟,等. 全光纤电流互感器的温度误差补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 91-95.
- [10] 张晓光. 光纤偏振模色散原理、测量与自适应补偿技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2017.
- [11] TANTASWADI P, TANGTRONGBENCHASIL C, MAHESHWARI S. Study of current measurement error due to vibration in reciprocal fiber-optic polarimetric current sensor [C]//IEEE. International Conference on Power Electronics & Drive Systems, New York: IEEE, 2001: 25-25.
- [12] 罗云瀚,夏丽佳,余健辉,等. 全光纤电流互感器的调制相位扰动补偿[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(1): 1-6.
- [13] 黄瑞涛,段艳涛,石立华,等. 用于测量雷电流的全光纤电流传感器[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 47-53.
- [14] YING D, YI D, ZHU J, et al. Linear birefringence and imperfect quarter wave plate effects on optic-fiber current sensor [C]//IEEE. Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, New York: IEEE, 2011: 13-16.