

全光纤电流互感器温度误差研究

王红星, 关远鹏, 胡春潮, 冯善强

(广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 温度是影响全光纤电流互感器(FOCT)输出稳定性和长期稳定运行的主要因素之一。针对 FOCT 的温度误差问题, 根据光纤中的相位延迟, 结合 FOCT 的反射式 Sagnac 光路结构的互易性, 提出了 FOCT 的温度误差数学模型, 指出 FOCT 的温度误差不仅与温度偏移量相关, 还与温度在某温度下的变化率相关。通过试验和仿真对该 FOCT 温度误差数学模型进行验证: 在试验温度范围中, 温度的偏移量绝对值与比差绝对值近似线性相关, 并且温度变化率较大时, 比差绝对值也相对较大。最后, 通过温度拟合曲线补偿, 使 FOCT 温度误差满足 0.2 级准确度的要求。

关键词: 全光纤电流互感器; 温度误差; 反射式 Sagnac 光路结构; 互易性; 温度拟合曲线

中图分类号: TM 452+94

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.028

0 引言

随着电力系统的发展, 交、直流高压大电流传输已成为电力系统发展的趋势之一^[1-2]。然而, 在传统的电流测量领域中, 直流量是不易测量的^[3]。交流大电流给磁芯所带来的磁滞效应和磁饱和效应, 也严重影响了电流测量的精度以及电力系统的保护和控制^[4]。这些都使得传统的电流互感器 CT(Current Transformer)难以在未来的电力系统大电流测量领域中得到广泛应用。全光纤电流互感器 FOCT(Fiber Optical Current Transformer)具有绝缘简单、无磁饱和及磁滞现象、无二次回路开路风险、电磁兼容性好、动态范围宽、体积小、重量轻等优点, 在电力系统中得到了快速发展, 被广泛应用于智能变电站中, 成为了电流互感器的研究热门^[5-7]。

然而, 在工程应用中发现, 温度对 FOCT 输出性能的影响非常大^[8]。在一定程度上, 温度误差限制了 FOCT 的应用, 还造成了多起 FOCT 异常与故障事件, 严重影响了电力系统的安全稳定运行。因此, FOCT 的温度特性引起了广泛的关注^[9-11]。文献[12-13]分析了传感环和黏胶热膨胀对光纤线圈线性双折射的影响, 但并未对输出误差进行量化分析。文献[14]提出了 Verdet 常数将随温度变化而变化。文献[15]分析了温度对延迟光纤中黏胶与骨架的热膨胀对整体输出的影响, 并建立了相关数学模型, 但该模型并未考虑温度变化率对整体输出的影响。文献[16]建立了 FOCT 的温度闭环模型, 以温度作为变量对传统的 FOCT 模型进行修正。文献[17]指出 FOCT 的比差与温度呈近似线性关系, 并分析了温度对传感线圈的影响。上述文献主要分析了当实际温度偏

离稳定温度时, 对传感线圈以及 Verdet 常数的影响, 但是并没有考虑温度变化率这一因素对 FOCT 输出的影响。

针对 FOCT 整体温度的建模, 本文着重分析了温度场变化对 FOCT 输出的影响, 并建立和完善了相关的数学模型。首先, 分析 FOCT 的反射式 Sagnac 结构及其互易性和工作原理; 然后, 分析温度对 FOCT 中 Verdet 常数、传感光纤、延迟光纤的影响, 并提出和建立温度偏移程度和温度变化率对 FOCT 影响的数学模型; 最后, 通过仿真与实验对所建立模型的正确性进行验证, 并通过温度误差曲线拟合对 FOCT 的温度误差进行补偿和抑制。

1 FOCT 结构互易性分析

借鉴光纤陀螺的光路结构, FOCT 采用反射式 Sagnac 光路结构, 如图 1 所示。光源采用超辐射发光二极管(SLD), 发出波长稳定的光波。SLD 发出的光波经分光比为 1:1 的耦合器传入起偏器后, 变为线偏光。线偏光经过 45° 熔接点后, 正交分解为 2 束相互垂直的线偏光, 分别注入保偏光纤的快轴和慢轴中。经过相位调制器的调制和延迟光纤后, 这 2 束相互垂直的线偏振光注入 1/4 波片中, 形成 2 束反向旋转的圆偏振光, 即左旋光和右旋光, 并进入传感光纤中。在被测电流所产生的磁场的作用下, 左旋光和右旋

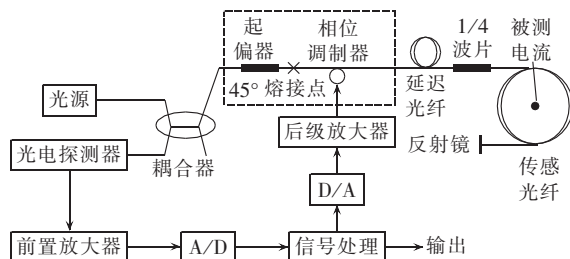


图 1 FOCT 原理图

Fig.1 Principle diagram of FOCT

收稿日期: 2016-10-22; 修回日期: 2017-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577074)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577074)

光产生 Faraday 效应,分别在相反的方向产生相移,即左旋光和右旋光的相位差为 $\theta = 2VNI$ (V 为实际温度下的 Verdet 常数, N 为光纤环的匝数, I 为被测电流)。左旋光和右旋光传播至反射镜后沿相反的路径反射,第 2 次经过传感光纤时再次发生 Faraday 效应,相位差变为 $\theta = 4VNI$ 。从传感光纤输出后,2 束圆偏振光第 2 次通过 1/4 波片转换为正交线偏振光,但这 2 束正交线偏振光发生模式互换,即原来沿保偏光纤快轴传输的线偏振光此时沿慢轴传输,原来沿保偏光纤慢轴传输的线偏振光此时沿快轴传输。正交线偏振光依次经过延迟光纤、相位调制器、偏振器、耦合器,并在偏振器处发生干涉,最后传入光电探测器中。

在 FOCT 中,起偏器、45° 熔接点、相位调制器、延迟光纤、1/4 波片、传感光纤和反射镜构成了一个闭合光路,形成了简易的 Sagnac 结构。在该闭合光路中,由于 Faraday 效应的惯性作用,光波绕行一周回到出发点时产生相位变化,并在出发点产生 Sagnac 干涉。

在反射式 Sagnac 结构的 FOCT 中,闭合光路使 2 束反向传播的光波具有相同的光程。且采用的单模光纤使光在传播过程中只有 1 个模式,有效地减小了基模态光和高阶模态光之间的耦合所引起的误差。另外,保偏光纤和起偏器保证了偏振光在传播过程中只有 1 个偏振态,避免了正交偏振耦合产生的偏振衰落。上述光路结构中的偏振互易性和单模互易性,保证了光路结构的互易性,使得 2 束反向传播的光波在返回输入端时,具有相同的相位延迟和功率衰减。

在非理想环境中,引入 FOCT 的大部分干扰通常对光路中 2 束反向传播的光具有相同的作用效果,即光波在传播中产生相同的相位延迟和功率衰减。反射式 Sagnac 光路结构的互易性则可以将这些误差进行抵消,保证 2 束光波的相位差为 0,进而保证了 FOCT 的输出准确度。

然而,对于非互易性误差,如不理想的光学器件制造工艺(光学器件的杂质过多、光纤截面椭圆、熔接有气泡等)和外界条件(温度、应力等)引入的误差,FOCT 则难以通过结构性的优势进行消除。并且,这些非互易性误差降低和制约了 FOCT 的测量精度和发展应用。

2 温度模型

光学电流互感器对温度非常敏感,主要表现在以下方面。

a. Verdet 常数与传感光纤或磁光玻璃的折射率及光源波长有关,而传感材料中的折射率受温度的

影响比较大,这就使得 Verdet 常数受温度影响较大。

b. 光纤的热应力。光纤是 FOCT 中较长的部分,通常由外层黏胶与骨架缠绕。在受热时,光纤、骨架和黏胶之间的膨胀程度都不一样,这就会影响光纤中的温致线性双折射,而且光纤的膨胀也会导致光纤轴向拉伸。

c. FOCT 难以凭借自身的结构消除非对称性的温度串扰,非对称性的温度串扰会随着温度场而积累,从而产生较大的光路相位延迟。

因此,由温度造成的光波相位偏移 θ_T 可以分为温度变化率造成的相位偏移 θ_{Td} 和由温度偏移造成的相位偏移 θ_s 2 个部分。

$$\theta_T = \theta_{Td} + \theta_s \quad (1)$$

a. 由温度变化率造成的相位偏移 θ_{Td} 主要体现在非对称的温度串扰对光纤延迟相角的影响。

b. 温度偏移造成的相位偏移 θ_s 主要包括温度偏移对 Verdet 常数的影响 θ_{sv} 和温度偏移对线性双折射的影响 θ_{sl} ,如式(2)所示。

$$\theta_s = \theta_{sv} + \theta_{sl} \quad (2)$$

2.1 温度偏移对 Verdet 常数的影响

Verdet 常数是 FOCT 最为重要的参数之一,但是温度对 Verdet 常数的影响很大。在实际温度偏离稳定温度时,Verdet 常数也将随之波动,其特性可归纳为:

$$\frac{dV}{dT} = 7 \times 10^{-5} (\text{rad}/(\text{A} \cdot ^\circ\text{C})) \quad (3)$$

因此,在实际温度下,Verdet 常数为:

$$V = V_0 [1 + 7 \times 10^{-5} (T - T_0)] \quad (4)$$

其中, T_0 为稳定温度; T 为实际温度; V_0 为温度 T_0 下的 Verdet 常数; V 为实际温度 T 下的 Verdet 常数,随温度呈线性变化。

2.2 温度偏移对线性双折射的影响

在 FOCT 的物理结构中,光纤通常缠绕在骨架上,并由黏胶进行固定。但是,骨架、黏胶和光纤的热膨胀系数是不一致的,这就导致在实际温度偏离黏胶固定温度时,三者的热膨胀对光纤产生轴向热应力,使光纤发生形变。光纤的轴向热应力为:

$$\Delta\sigma = \frac{E_1(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)}{2} \quad (5)$$

其中, E_1 为光纤纤芯的弹性模量; α_1 为光纤玻璃的热膨胀系数; α_2 为黏胶的热膨胀系数。

光纤的形变将使光纤固有的线性双折射发生改变,导致 FOCT 的输出误差增大。因此,由光纤轴向热应力产生的温致线性双折射延迟相位为:

$$\theta_{sl} = \frac{\pi n^3(1+v)(p_1 - p_2)(\alpha_1 - \alpha_2)}{6\lambda(1-2v)} (T - T_0) \quad (6)$$

其中, n 为纤芯的折射率; v 为泊松比; p_1 、 p_2 为光纤玻璃的光弹性张量; λ 为入射光波长。

2.3 温度变化率对光纤的影响

由 FOCT 的光路可知,在经过 45° 熔接点后,2 束线偏振光的路径是相同的,在对称的外部干扰下,对于 2 束光波所引入的相移是相同的。且 45° 熔接点使 2 束偏振光分别基于单模光纤的快轴和慢轴进行正交分解,这就使得 2 束光波具有互异性。根据光路结构的互异性,对称的干扰可通过 2 束光波抵消。而对于一些非互异性的串扰,FOCT 则比较灵敏,无法通过结构的互异性抵消。温度串扰引入的非互异性因素,是干扰 FOCT 输出准确度的重要因素之一。

在延迟光纤中,偏振光在传输过程中的相位延迟角为:

$$\varphi_d = \frac{2\pi}{\lambda} nL \quad (7)$$

其中, L 为延迟光纤长度。

由于折射率是与温度相关的函数,因此,延迟相位在变化的温度场下可以描述为:

$$\varphi_d = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L + \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \vartheta} + n_{\text{eff}} \alpha \right) \int_0^L \Delta V(z) dz \quad (8)$$

其中, n_{eff} 为有效折射率; $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \vartheta}$ 为折射率系数; α 为热膨胀系数; $\Delta V(z)$ 为温度沿延迟光纤分布的函数; 由于 $n_{\text{eff}} \alpha$ 较小,通常将其忽略。

假设在光纤中,某一点出现温度变化,该点的坐标为 z ,顺时针旋光至该点的时间为 $t - \frac{L-z}{c_m}$,其中 t 为光束在 FOCT 中的传输总时间, c_m 为光在光纤中的传播速度,则顺时针旋光的相位延迟角为:

$$\varphi_{\text{dcw}} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \vartheta} \int_0^L \Delta V \left(z, t - \frac{L-z}{c_m} \right) dz \quad (9)$$

可以推导出,逆时针旋光的相位延迟角为:

$$\varphi_{\text{dcw}} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \vartheta} \int_0^L \Delta V \left(z, t - \frac{z}{c_m} \right) dz \quad (10)$$

因此,逆时针旋光和顺时针旋光之间的相位差为:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{dcw}} - \varphi_{\text{dcw}} =$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \vartheta} \int_0^L \left[\Delta V \left(z, t - \frac{z}{c_m} \right) - \Delta V \left(z, t - \frac{L-z}{c_m} \right) \right] dz \quad (11)$$

由于 $t \rightarrow 0$,则有:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \Delta V \left(z, t - \frac{z}{c_m} \right) - \Delta V \left(z, t - \frac{L-z}{c_m} \right) = \dot{V}(z, t) (L-2z) \quad (12)$$

其中, $\dot{V}(z, t)$ 为热力场的变化率。

所以, $\Delta\varphi$ 可描述为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \vartheta} \int_0^L \dot{V}(z, t) (L-2z) dz \quad (13)$$

式(13)表明相位差与热力场的变化率相关。

图 2 将反射式 Sagnac 光路结构简化为环路式闭合光路结构。当 z 点发生温度变化时, $L-z$ 点处也对应地发生温度变化。在反射式 Sagnac 光路结构的

FOCT 中,光波经反射镜反射后,将再一次穿过温度变化点。由于光速远快于温度变化的速率,因此可认为光波穿过的 2 个温度变化点处于相同的温度性质。所以,FOCT 中顺时针与逆时针旋光的相位差为:

$$\theta_{\text{rl}} = 2\Delta\varphi =$$

$$\frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \vartheta} \int_0^L \dot{V}(z, t) (L-2z) dz \quad (14)$$

综上所述,FOCT 受温度影响的相位输出为:

$$\theta_{\text{T}} = \theta_{\text{sv}} + \theta_{\text{sl}} + \theta_{\text{rl}} = V_0 \times 7 \times 10^{-5} (T - T_0) NI +$$

$$\frac{\pi n^3 (1+v) (p_1 - p_2) (\alpha_1 - \alpha_2)}{6\lambda (1-2v)} (T - T_0) +$$

$$\frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \vartheta} \int_0^L \dot{V}(z, t) (L-2z) dz \quad (15)$$

假设在恒定温度 T_0 下,相位偏移为 θ_0 ,其主要是固有线性双折射引入的相位偏移。

FOCT 的比差可以定义为:

$$\varepsilon = \frac{k u_0 - I_0}{I_0} \quad (16)$$

其中, k 为变比; u_0 为 FOCT 的输出信号; I_0 为标准电流。在温度变化时,定义变比 k_{T} 为:

$$k_{\text{T}} = \frac{4NV_0 [1 + 7 \times 10^{-5} (T - T_0)] \sin(\theta_0 + \theta_{\text{rl}} + \theta_{\text{sl}})}{\theta_{\text{rl}} + \theta_{\text{sl}} + \theta_0} \quad (17)$$

因此,在恒定温度 T_0 下,变比为:

$$k_{\text{T0}} = k = \frac{4NV_0 \sin \theta_0}{\theta_0} \quad (18)$$

而在温度变化经过温度 T_0 时,变比为:

$$k_{\text{T}} = \frac{4NV_0 \sin(\theta_0 + \theta_{\text{rl}})}{\theta_0 + \theta_{\text{rl}}} \quad (19)$$

因此,温度变化时,FOCT 的比差为:

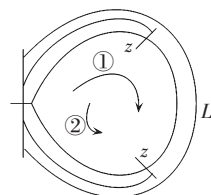
$$\varepsilon_{\text{T}} = \frac{k}{k_{\text{T}}} (1 + \varepsilon) - 1 \quad (20)$$

3 仿真与实验

在仿真中设定:初始温度 $T_0 = 25^\circ\text{C}$,波长 $\lambda = 1310\text{ nm}$,折射率 $n = 1.456$,初始比差 $\varepsilon = 0$ 。根据上文的推导,在不同温度变化率下,对 FOCT 的输出准确度进行检测,结果如图 3 所示,图中 $dT_2/dt > dT_1/dt$ 。

由图 3 可见,当实际温度与初始温度偏离量增大时,输出比差也随之增大。不仅如此,温度变化率较大时的比差相较于温度变化率较小时的比差也大些。

试验中,在 25°C 下对 FOCT 的准确度进行标定。通过温控箱进行温度控制,分别进行不同温度变化率下的温升试验,检测各温度点下 FOCT 的比差并绘制曲线,如图 4 所示。



① 顺时针旋光, ② 逆时针旋光

图 2 FOCT 的 Sagnac 反射结构等效模型

Fig.2 Equivalent model of FOCT's reflective Sagnac structure

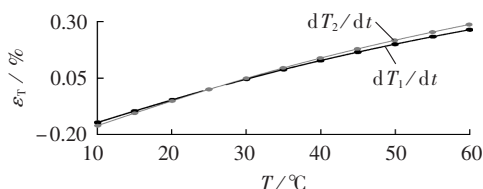


图 3 温度模型仿真结果

Fig.3 Simulative results of proposed temperature model

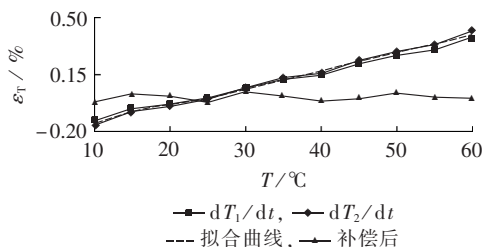


图 4 温度实验结果

Fig.4 Experimental results of proposed temperature model

由图 4 可见,FOCT 的比差与温度呈近似线性关系,同时,温度变化较快时,FOCT 的比差也较大,这与理论和仿真的结果一致;当温度增大至 45 °C 时, $\varepsilon_T > 0.2\%$,此时 FOCT 的准确度将不满足 0.2 级准确度的要求,因此,对温度进行补偿改善 FOCT 输出特性是非常有必要的。

在考虑温度干扰时,FOCT 的输出准确度可以表示为:

$$f=f(I,T) \quad (21)$$

然而,从上述分析可知,温度和被测电流是 2 个相对独立的变量。因此,FOCT 的输出准确度可以描述为:

$$f(I,T)=\phi(I)\varphi(T) \quad (22)$$

当 $T=T_0$ 时,可以确定 $\phi(I)$,而 $\phi(I)$ 在上文的分析中表现出误差恒定的性质,即:

$$f(I)=k=\frac{4NV_0\sin\theta_0}{\theta_0} \quad (23)$$

$\varphi(T)$ 可以通过保持被测电流额定值不变,将温度作为变化量,比差作为输出而获得,但这样通常得到的是离散的温度误差曲线。因此,需要对测量获得的温度误差曲线采用最小二乘法进行拟合。为了简化计算,通常采用多项式的数字模型,因此拟合得到的表达式一般不大于 3 阶的多项式。利用 FPGA 程序设计一段温补算法,基于拟合的数字模型,采用查表(LUT)或调用乘法器(Multiplier)的方式均可实现温度补偿。

本文中,对不同温度变化率下 FOCT 的比差进行统一拟合,进而获得二阶多项式的拟合函数,对温度误差进行补偿和抑制,补偿结果如图 4 所示。由图 4 可见,补偿后 FOCT 的比差为 $-0.1\% \sim 0.1\%$,相较于补偿前有了很大的改善,能够满足 0.2 级准确

度的要求。

4 结论

本文分析了反射式 Sagnac 结构的 FOCT,并指出了 Sagnac 结构的互易性能够抵消对称性的干扰。讨论了温度偏移量对 FOCT 的干扰(包括对 Verdet 常数和线性双折射的干扰)和温度变化率对 FOCT 的干扰,建立了完整的 FOCT 的温度误差数学模型。本文得到如下结论。

a. Verdet 常数、线性双折射和延迟光纤的串扰是影响 FOCT 温度漂移的主要因素;延迟光纤的温度误差主要是由温度变化率引起的非互易性温度串扰造成的。

b. 在温度仿真和试验中,FOCT 的比差与温度的关系近似呈线性,且温度变化率增加时,FOCT 的比差与温度的函数斜率也随之增大。

c. 温度误差拟合曲线能够有效地补偿和抑制 FOCT 的温度误差。

参考文献:

- [1] EROL-KANTARCI M,MOUFTAH H T. Energy-efficient information and communication infrastructures in the smart grid:a survey on interactions and open issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2015,17(1):179-197.
- [2] YAN Y,QIAN Y,SHARIF H,et al. A survey on smart grid communication infrastructures;motivations,requirements and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2013,15(1):5-20.
- [3] 瞿刚,罗海云. 混合光学直流测量系统的应用[J]. 电力自动化设备,2001,21(3):36-37.
QU Gang,LUO Haiyun. Application of hybrid optic DC measurement system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001,21(3):36-37.
- [4] 毕大强,冯存亮,葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):184-190,235.
BI Daqiang,FENG Cunliang,GE Baoming. Research on identification of partial transient saturation in current transformers [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):184-190,235.
- [5] 袁宇波,陆于平,许扬,等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(10):12-17.
YUAN Yubo,LU Yuping,XU Yang,et al. The influence and countermeasure to transformer differential protection of CT partial transient saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(10):12-17.
- [6] 黄乐,陈亦平,舒双焰. 电流互感器故障所致电网事故及其处置的分析[J]. 南方电网技术,2011,5(4):68-70.
HUANG Le,CHEN Yiping,SHU Shuangyan. Analysis on the power grid accident caused by current transformer failures and its handling[J]. Southern Power System Technology,2011,5(4): 68-70.
- [7] 李绪友,郝金会,杨汉瑞,等. Sagnac 环形电流互感器的原理与发展研究[J]. 光电工程,2011,38(7):1-6.

- LI Xuyou,HAO Jinhui,YANG Hanrui,et al. Research and development of Sagnac ring-like optic current sensor[J]. Opto-Electronic Engineering,2011,38(7):1-6.
- [8] 李传生,张春熹,王夏霄,等. Sagnac 型光纤电流互感器变比温度误差分析与补偿[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):102-106.
- LI Chuansheng,ZHANG Chunxi,WANG Xiaoxiao,et al. Analysis and compensation of ratio temperature error for Sagnac fiber-optic current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(11):102-106.
- [9] 王巍,张志鑫,杨仪松. 全光纤式光学电流互感器技术及工程应用[J]. 供用电,2009,26(1):45-48.
- WANG Wei,ZHANG Zhixin,YANG Yisong. The Fiber Optical Current Transformer(FOCT) technology and its engineering application[J]. Distribution & Utilization,2009,26(1):45-48.
- [10] 于海洋. 基于 RTDS 的全光纤电流互感器和电磁型电流互感器混合应用对继电保护影响研究[D]. 保定:华北电力大学,2014.
- YU Haiyang. Study on the effect of the fiber optical current transformer and electromagnetic current transformer mixed application of relay protection based on RTDS[D]. Baoding: North China Electric Power University,2014.
- [11] 许扬,陆于平,卜强生,等. 光纤电流互感器对保护精度和可靠性的影响分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):119-124.
- XU Yang,LU Yuping,BU Qiangsheng,et al. Analysis for effect of fiberoptic current transformer on protection accuracy and reliability[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(16):119-124.
- [12] 于强,张琛,何周,等. 固胶对光纤线圈热应力干扰双折射的影响[J]. 中国激光,2011,38(2):170-174.
- YU Qiang,ZHANG Chen,HE Zhou,et al. Influence of coating adhesive on thermal stress interference birefringence of optical fiber coil[J]. Chinese Journal of Lasers,2011,38(2):170-174.
- [13] 张琛. 光纤陀螺光路系统稳定性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- ZHANG Chen. Study on the stability of optical fiber gyro optical system[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2008.
- [14] 李传生,张春熹,王夏霄,等. 反射式 Sagnac 型光纤电流互感器的关键技术[J]. 电力系统自动化,2013,37(12):104-108.
- LI Chuansheng,ZHANG Chunxi,WANG Xiaoxiao,et al. Key techniques of reflective Sagnac interferometer-type fiber optic current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(12):104-108.
- [15] 李绪友,张琛,何周,等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环温度性能研究[J]. 中国激光,2010,37(4):1053-1057.
- LI Xuyou,ZHANG Chen,HE Zhou,et al. Temperature performance research of fiber coil in fiber optic gyroscope based on polarization coupling theory[J]. Chinese Journal of Lasers,2010,37(4):1053-1057.
- [16] 刘青,傅代印,马朋,等. 考虑温度特性的全光纤电流互感器实时动态仿真模型[J]. 电网技术,2015,39(6):1759-1764.
- LIU Qing,FU Daiyin,MA Peng,et al. Real-time dynamic simulation model of fiber optical current transformer considering temperature characteristics[J]. Power System Technology,2015,39(6):1759-1764.
- [17] 程嵩,郭志忠,张国庆,等. 全光纤电流互感器的温度特性[J]. 高电压技术,2015,41(11):3843-3848.
- CHENG Song,GUO Zhizhong,ZHANG Guoqing,et al. Temperature characteristic of fiber optic current sensor[J]. High Voltage Engineering,2015,41(11):3843-3848.

作者简介:



王红星

王红星(1977—),男,河北沧州人,高级工程师,博士,研究方向为智能变电站、光学互感器在智能电网中的应用(E-mail:13560398995@139.com);

关远鹏(1992—),男,海南昌江人,博士研究生,通信作者,研究方向为光学电流互感器在智能电网中的应用及分布式发电系统并网和电能质量治理(E-mail:guanyuanpeng@126.cm);

胡春潮(1984—),男,湖北黄冈人,工程师,硕士,研究方向为智能变电站先进技术(E-mail:Huchunchao@139.com);

冯善强(1984—),男,山东日照人,工程师,硕士,研究方向为智能变电站先进技术(E-mail:fengshanqiang@139.com)。

Temperature error of fiber optic current transformer

WANG Hongxing,GUAN Yuanpeng,HU Chunchao,FENG Shanshan

(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.,Guangzhou 510080,China)

Abstract: Temperature is one of the key factors that affect the output stability and long-time stable operation of FOCT(Fiber Optic Current Transformer). Aiming at the required accurate temperature of FOCT, a FOCT temperature error mathematical model is proposed according to the phase delay in fibers and combined with the reciprocity of FOCT's reflective Sagnac structure. Also,it is pointed out that the FOCT temperature error relates to not only the offset of temperature but also the variance ratio at a temperature point. The FOCT temperature error mathematical model is verified by simulations and tests,which shows that the relationship between the absolute value of the temperature off set and that of rate error is approximately linear. Furthermore,the absolute value of rate error will be relatively larger if the variance ratio is larger. Finally,through the compensation of the temperature fitting curve,the FOCT temperature error satisfies the requirement of 0.2 class accuracy.

Key words: fiber optic current transformer; temperature error; reflective Sagnac optic structure; reciprocity; temperature fitting curve