

基于最小二乘法的光纤互感器双路温补技术

丁浩¹ 李军¹ 商和龙¹ 李洪全¹ 张猛¹ 闫冠峰¹ 王新刚¹ 逯怀东² 尹晓敏²

(1. 山东电力设备有限公司 济南 250022; 2. 国网山东省电力公司济南供电公司 济南 250001)

摘要: 全温范围内精度超差是制约全光纤电流互感器工程化应用的主要问题之一,针对该问题分析了全光纤电流互感器的工作原理,研究了温度对测量结果的影响,结合目前全光纤电流互感器的现场应用环境,提出了一种基于最小二乘法拟合的双路温度补偿算法,并通过实验验证了补偿算法的可行性。理论分析和实验结果表明,该算法可以在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,将互感器的变比误差控制在 0.2% 以内,可以有效改善全光纤电流互感器在全温范围内的温度性能。

关键词: 全光纤电流互感器;法拉第磁光效应; $\lambda/4$ 光纤波片;最小二乘法拟合;双路温补

中图分类号: TM452 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Study on dual-way temperature compensation method based on least square method for fiber optical current transformer

Ding Hao¹ Li Jun¹ Shang Helong¹ Li Hongquan¹ Zhang Meng¹ Yan Guanfeng¹

Wang Xingang¹ Lu Huaidong² Yin Xiaomin²

(1. Shandong Power Equipment Co. Ltd., Jinan 250022, China;

2. Jinan Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Corporation, Jinan 250001, China)

Abstract: Accuracy decrease is one of problems that restricting engineering application of fiber optical current transformer (FOCT). The function of FOCT is introduced. The influence of temperature on the measurement results were studied and the dual-way temperature compensation algorithm based on least square method were discussed. And its feasibility was verified by experiment. Analysis and experimental results show that this method improves the performance of FOCT in the whole temperature range.

Keywords: fiber optical current transformer (FOCT), Faraday magneto-optical effect, $\lambda/4$ wave plate, least square method, dual-way temperature compensation

1 引言

随着光纤传感技术的发展和智能电网建设的推进,基于法拉第磁光效应的全光纤电流互感器日益受到国内外研究人员的重视^[1]。与传统电磁式互感器相比,全光纤电流互感器具有绝缘性能优良、抗电磁干扰能力强、频率响应范围宽、可测量直流电流、输出数字化等优点,被认为是传统互感器的理想升级换代产品,目前已在国内外电网中进行了一定程度的挂网应用^[2]。根据全光纤电流互感器的挂网运行情况以及在型式试验过程中出现的问题可知,产品在全温范围内的比差精度漂移是制约全光纤电流互感器工程化应用的因素之一^[3]。

为解决温度对全光纤电流互感器比差所带来的影响,

需要采取手段对互感器比差进行温度补偿^[4]。目前的温度补偿通常使用单路温补方案,即仅依靠传感头处的温度对输出进行补偿,使输出比差满足国家标准 0.2 级精度要求。该方案忽略了机箱温度变化所引起的误差,然而在变电站现场,光纤电流互感器机箱有就地安装、安装于智能控制控制柜中等不同的安装方式,其温度仍随环境温度在一定的范围内变化,并且机箱温度的变化也会导致互感器比差的精度下降。因此单路温补方案与现场实际情况不符,不能满足现场应用需求。

根据上述现状,从分析全光纤电流互感器的工作原理及温度对测量精度的影响入手,针对单路温补方案无法满足现场要求的问题,提出了双路温度补偿算法,并通过实验验证了该方案的可行性。

2 全光纤电流互感器基本工作原理

2.1 全光纤电流互感器工作原理

闭环反射式全光纤电流互感器基本原理^[5]如图1所示。SLD光源发出的光通过耦合器后经起偏器起偏,由圆偏振光变为线偏振光。起偏器尾纤与相位调制器之间以45°进行熔接,由起偏器来的偏振光会以45°注入保偏光纤,分别沿保偏光纤的X轴和Y轴传输。这2个正交模式的线偏振光在相位调制器处经过调制,通过λ/4波片后,将变为左旋和右旋的两束圆偏振光,进入传感光纤,在Faraday磁效应的作用下,这2束圆偏振光的相位会发生变化并以不同的速度传输,到达传感光纤尾部经反射镜反射后,这两束圆偏振光的偏振模式互换后再次穿过传感光纤,再次经历Faraday效应使两束光产生的相位加倍。这2束光再次通过λ/4波片后,恢复为线偏振光,并且原来沿保偏光纤X轴传播的光变为沿保偏光纤Y轴传播,原来沿保偏光纤Y轴传播的光变为沿保偏光纤X轴传播,然后在起偏器处发生干涉。最后,携带相位信息的光由单模耦合器耦合进探测器。由于发生干涉的2束光,在光路传输过程中,分别都经过了保偏光纤的X轴和Y轴和传感光纤的左旋和右旋模式,只在时间上略有差别,因此返回探测器的光只携带了由于Faraday效应产生的非互易相位差^[6]。其表达式为:

$$I_D = K_{\text{loss}} \cdot I_0 \cdot [1 + \cos(\theta_F)] \quad (1)$$

式中: θ_F 为法拉第相移, $\theta_F = 4NVI$; K_{loss} 为光路损耗系数; I_0 为光源输出光强。

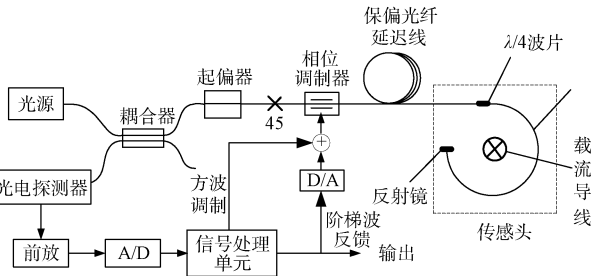


图1 闭环反射式全光纤电流互感器结构示意图

通过检测输出光强信号得到法拉第相移大小,即可获得待测的电流值。

2.2 全光纤电流互感器温度稳定性的影响因素

全光纤电流互感器机箱和传感头内部都存在温度敏感器件,会导致互感器温度稳定性降低,导致准确度下降。通过实验及理论分析得出,在传感头内主要影响FOCT温度稳定的因素有光纤线性双折射、λ/4光纤波片及Verdet常数^[7];在机箱内,主要影响FOCT温度稳定性的是因素是电路板模拟器件,如A/D、D/A等,具体分析阐述如下。

1) 传感光纤线性双折射

传感光纤的线性双折射是光纤的固有特性,与制造时

所采用的工艺方案有关,温度的变化的变化会使光纤内部应力产生变化而使折射率发生改变,最终导致准确度下降。在工程上,通常采用光纤环退火、采用低双折射光纤等措施降低线性双折射的影响。

2) λ/4波片

λ/4波片是由两段保偏光纤以45°对轴熔接后截取输出端光纤的1/4拍长制作而成,温度会引起保偏光纤拍长发生变化,引起相位延迟角改变,最终导致互感器精度变差。

温度引起的波片相位延迟角变化导致互感器的电流输出误差可以表示为:

$$E_R = \frac{\phi'_F - \phi_F}{\phi_F} = \frac{\sin\varphi_0}{\sin(\varphi_0 + \Delta\varphi)} - 1 \quad (2)$$

式中: φ_0 为25℃时λ/4波片的相位延迟角度, ϕ'_F 为温度变化时相位测量值。

波片的相位延迟角为:

$$\varphi = \Delta\beta_0 L_0 [1 + C(T - T_0)] \quad (3)$$

式中: $\Delta\beta_0$ 为保偏光纤两轴之间的传播常数差; C 为保偏光纤相位角随温度的变化系数, L_0 为波长, T 为外界温度。

$$\Delta\varphi = \Delta\beta_0 L_0 [C(T - T_0)] \quad (4)$$

代入式(2)可得:

$$E_R = \frac{\phi'_F - \phi_F}{\phi_F} = \frac{\sin\varphi_0}{\sin(\varphi_0 + \Delta\beta_0 L_0 [C(T - T_0)])} - 1 \quad (5)$$

由式(5)可知,当温度变化时,波片会影响测量结果。由波片造成的全光纤电流互感器的比差在全温范围内在2%以上。

3) 传感光纤 Verdet 常数

光纤的 Verdet 常数与温度有关^[6],而 Verdet 常数影响 Faraday 效应的大小,对于 SiO₂ 光纤来说,Verdet 常数与温度的关系可以表示为:

$$\frac{1}{V_0} \frac{\partial V}{\partial T} = 6.9 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (6)$$

式中: V_0 为室温 25℃下的 Verdet 常数。对于波长为 1310 nm 光纤,其 $V_0 \approx 1.1 \times 10^{-6} \text{ rad/A}$,故 Verdet 常速随温度的变化规律可以表示为:

$$\frac{\partial V}{\partial T} = 7.6 \times 10^{-11} \text{ rad/(A} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)} \quad (7)$$

则由 Verdet 常数引起测量误差可以表示为:

$$E(V, T) = \frac{4NI(V_0 + \Delta V)}{4NIV_0} - 1 = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (8)$$

全光纤电流互感器的全温范围内 Verdet 常数随温度变化导致的比例系数误差达 0.76%^[7]。

4) 机箱电路器件

全光纤电流互感器机箱内电路也存在一些温度敏感的元器件,例如 A/D、D/A 等模拟器件以及光源、探测器等光学器件,当温度发生改变时,会出现温漂的现象,温漂会

导致测量结果出现偏差,使测量精度下降,此外,机箱内部存在电路,在运行的过程中会产生热量,也会影响测量精度。

3 全光纤电流互感器温度补偿算法

3.1 温度补偿原理框图

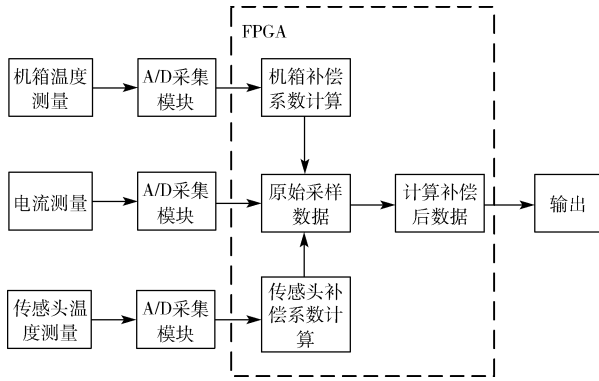


图 2 温度补偿原理

由于机箱和传感头的温度变化都会影响测量结果,因此需要通过温度传感器采集全光纤电流互感器传感头及机箱处的温度,通过 A/D 采集带有电流数据信息的光信号,经过信号处理后得到原始电流采样数据,FPGA 根据传感头及机箱处的温度数据,计算出互感器温度补偿系数,对原始电流采样数据进行补偿,计算出补偿后数据,输出给下游 MU 等设备。

3.2 温度补偿算法

若每一点处的温度补偿系数为 δ ,则补偿后的输出电流值 I_1 与电流实测值之间的关系可以用以下表达式^[9]表示:

$$I_1 = (1 + \delta) \times I \quad (9)$$

全光纤电流互感器传感头和机箱处于不同的环境中,两者都会对测量结果造成影响,且两者互不干扰,因此进一步可以得到:

$$I_1 = (1 + \delta) \times I = (1 + \delta_1)(1 + \delta_2) \times I \quad (10)$$

式中: δ_1 、 δ_2 分别为传感头和机箱的温补系数。

由上式可得:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_1\delta_2 \quad (11)$$

由于 δ_1 、 δ_2 都很小,因此 $\delta_1\delta_2$ 很小,因此可以近似认为:

$$\delta \approx \delta_1 + \delta_2 \quad (12)$$

互感器的温补系数可以近似成传感头和机箱的温补系数 δ_1 、 δ_2 之和^[9]。与温补的先后顺序无关。

应用控制变量法分别对互感器传感头和机箱进行研究,在研究传感头温度与比差变化规律时,将传感头放置在温度按照指定规律变化的温箱中,将机箱放置在 25℃ 恒温箱中,反之,研究机箱温度与比差变化规律时,将机箱放

置在温度按照指定规律变化的温箱中,将传感头放置在 25℃ 恒温箱中。

以补偿传感头为例,可以通过进行全光纤电流互感器高低温试验以确定补偿系数 δ_1 ,以 25℃ 时的电流值 $I_{25\text{℃}}$ 作为标准值,将其他时刻下的测量结果补偿至标准值,可以得到每一时刻的补偿系数为:

$$\delta_1 = \frac{I_{25}}{I} - 1 \quad (13)$$

温度补偿系数 δ_1 是温度 T 的函数,通过 MATLAB 对式(13)右侧表达式进行最小二乘法拟合^[9-12],得出 δ_1 与温度 T 的多次表达式。可以根据电流与温度之间的关系选择多项式的次数和是否需要分段。分段点的选择应使拟合误差尽量小^[10]。 $\delta(T)$ 的表达式如下:

$$\delta(T) = \begin{cases} a_2 T^2 + a_1 T + a_0 & (T > T_1) \\ b_2 T^2 + b_1 T + b_0 & ((T < T_1) \& \& T > T_2) \\ c_2 T^2 + c_1 T + c_0 & (T > T_2) \end{cases} \quad (14)$$

式中: a_n 、 b_n 、 c_n 为传感头补偿系数计算多项式的系数。

同理,可以求出机箱温补系数 δ_2 与温度之间的关系。代入式(8)即可求得最终的温度补偿系数 δ 。

4 温度补偿实例及结果分析

4.1 温度补偿实验方案

为了验证双温度补偿方案的有效性,根据国家标准 GB/T20840.8-2007 要求,搭建了测试环境,其结构示意图如图 3 所示。

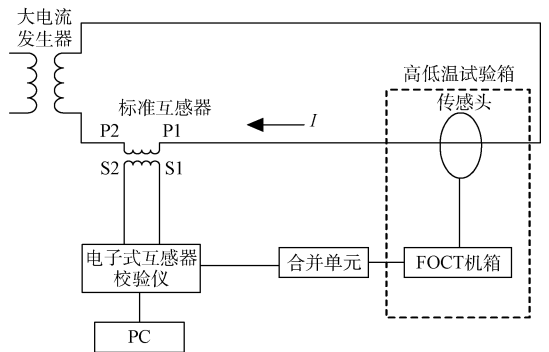


图 3 全光纤电流互感器温度误差测试系统结构示意图

大电流发生器用于产生测试电流,电流同时通过 0.02 级标准互感器和被测 FOCT,将机箱和传感头放在同一个高低温试验箱中,被测 FOCT 测量值通过合并单元连接至电子式互感器校验仪,标准互感器二次线直接接至电子式互感器校验仪模拟输入端,两路信号通过互感器校验仪进入上位机进行数据误差分析^[8]。

实验方案如下:首先单独对传感头进行温补并验证其温度性能,其次单独对机箱(传感头放置在室温环境中)和传感头(机箱放置在室温环境中)进行温度循环试验,分别

得到传感头处温度及机箱处温度和互感器精度的关系,并根据结果,对机箱进行温度补偿,并将验证最终的双温补方案效果。温箱的温度从 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化。温度变化速率为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,大电流发生器输出的一次侧电流为 600 A 。

4.2 单路温度补偿结果及分析

首先进行温度循环实验,将机箱和传感头放置在高低温试验箱中,采集传感头处的温度进行温度循环实验,得到温度与电流的变化曲线,并按照2.2节中的温度补偿算法对全光纤电流互感器进行温度补偿。采用单路温补算法仅对传感头进行温度补偿的结果如图4所示。可以看出,仅使用传感头处的温度进行温度补偿后,全光纤电流互感器在 600 A 电流下的全温比差仍会超出国家标准 0.2% 级的要求。

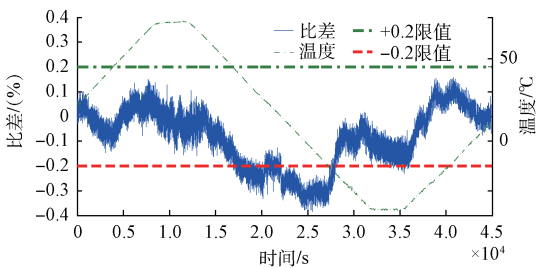


图4 传感头温度补偿实验结果

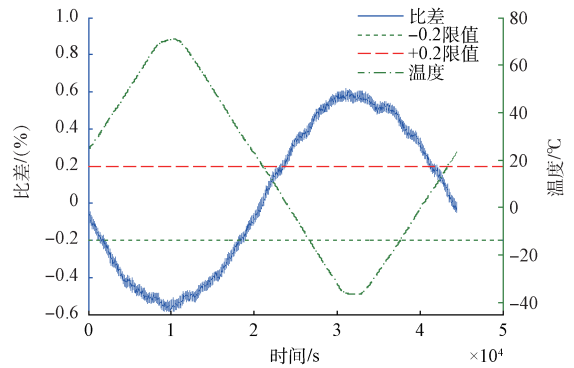
分析造成比差超差的原因,是源于虽然机箱和传感头同时放在同一个温箱中,但由于机箱中存在电路器件,工作时发热,从而在内部积聚热量,与传感头处的温度变化规律并不完全相同,仅使用传感头处的温度进行补偿未充分考虑互感器的整体性能随温度的变化规律,因此不能彻底解决全光纤电流互感器温度稳定性不理想的问题。因此,还需要针对机箱温度变化所引起的测量误差进行补偿,即采用双路补偿方案,以提高互感器输出精度。

4.3 输出比差随温度变化规律

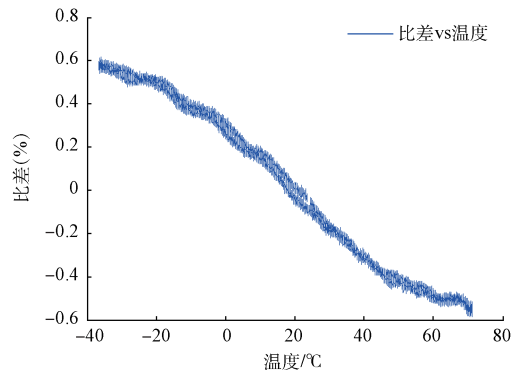
为了对互感器传感头和机箱进行双路温度补偿,需要对传感头和机箱分别进行温度循环实验,获得互感器输出精度在两种情况下随温度的变化规律。这里采用控制变量法,即对传感头进行温度循环实验时,机箱置于室温环境中,而对机箱进行温度循环实验时,传感头置于室温环境中,保证单一变量变化。

首先将传感头放置在温箱中,机箱置于室温环境中,进行温度实验。可以得到互感器比差的变化规律如图5(a)所示,由于温度的变化,导致互感器比差在 $\pm 0.6\%$ 内变化。图5(b)为比差与传感头温度的关系。从图中可以看出,在升温和降温的过程中,比差随温度的变化重复性比较好,因此在拟合时可以不分段。

再将机箱放置在温箱中,传感头置于室温环境中,可以得到互感器比差由于机箱温度变换的变化规律,如图6(a)所示,互感器的比差在 $\pm 0.4\%$ 内。图6(b)为比差和机

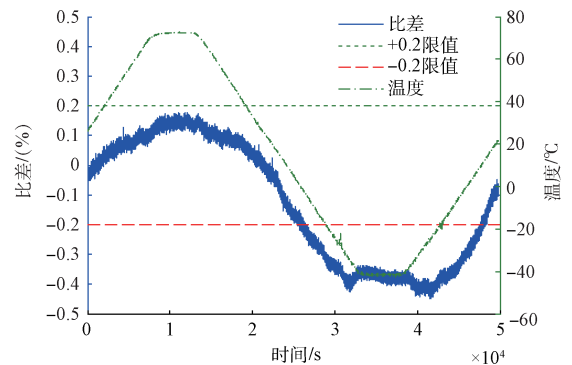


(a) 比差、温度随时间的变化规律

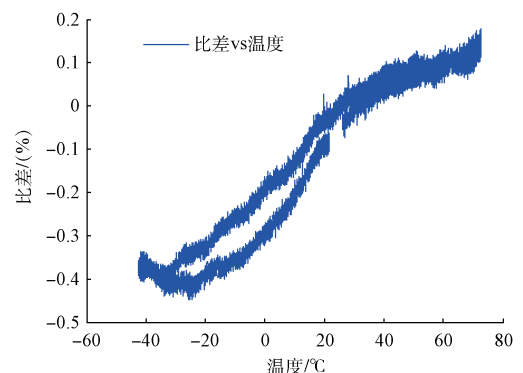


(b) 比差随温度的变化规律

图5 传感头温度循环实验结果



(a) 比差、温度随时间的变化规律



(b) 比差随温度的变化规律

图6 机箱温度循环实验结果

箱温度的关系,从图中可以看出,在低温时,升温过程和降温过程的重复性并不好。因此可以以 20℃ 为分段点,分成两段进行拟合^[13]。

4.4 温度补偿

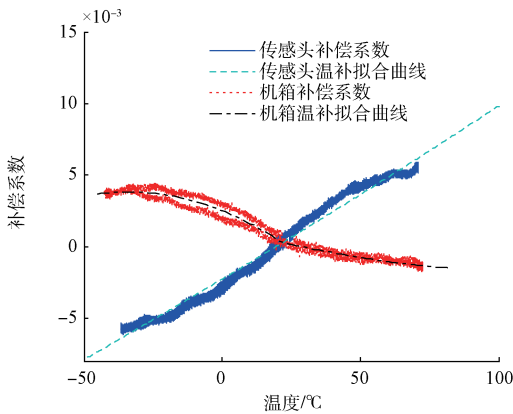
根据 2.2 节的内容,可以求出分别求出机箱与传感头的温度补偿系数,如图 7(a) 所示,采用了最小二乘法对补偿系数进行拟合,拟合结果为:

$$\delta_1(T) = (1.0067 \times 10^{-7})T^2 + (0.00015286)T - 0.002844 \quad (14)$$

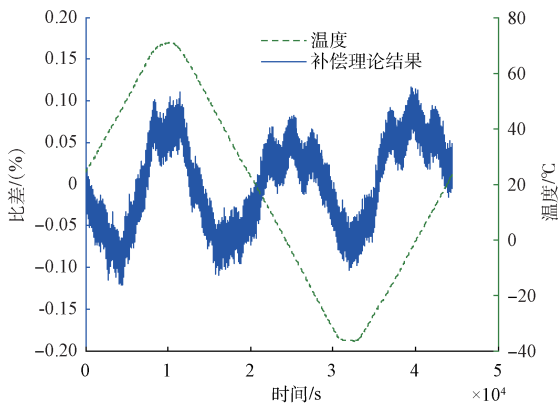
$$\delta_2(T) = \begin{cases} (-1.13 \times 10^{-7})T^2 + (-7.69 \times 10^{-5})T + 2.51 \times 10^{-3} & (T \leq 20) \\ (2.45 \times 10^{-7})T^2 + (-5.51 \times 10^{-5})T - 1.38 \times 10^{-3} & (T > 20) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\delta_1(T)$ 为传感头的温补系数表达式, $\delta_2(T)$ 为机箱的温补系数关系式。

图 7(b) 是根据上述拟合结果,通过 MATLAB 仿真得出理论温补结果,如图中蓝线所示。从图中可以看出经过温补后,比差控制在在 $\pm 0.2\%$ 以内,同时解决了传感头和机箱温度变化产生的温度误差。



(a) 温度补偿拟合曲线



(b) 温度补偿理论结果

图 7 机箱温度补偿理论分析结果

4.5 整体温度补偿实验结果

为验证双路温度补偿效果,将机箱和传感头温度同时

放置在温箱中进行温度循环实验^[14-15],并实时监测输出比差,结果如图 8 所示。可以看出,经过温度补偿后输出值满足国家标准 0.2 级的要求,从而验证了双路温度补偿方案的有效性。

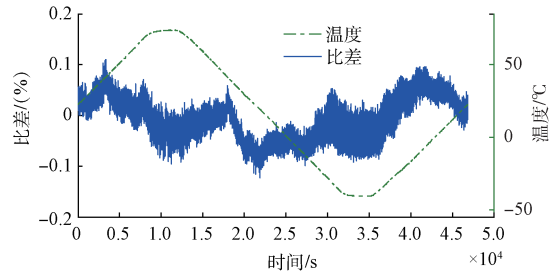


图 8 整体温度补偿实验结果

5 结 语

通过分析光纤电流互感器的比差与传感头及机箱温度之间的关系,提出了采用双路温度补偿方案对全光纤电流互感器输出比差进行温度补偿。根据理论分析及实验验证,得出该补偿算法具有效果好、计算方便、易于实现等优点,满足国家标准 0.2 级测量用电子式互感器的比差精度要求。

参考文献

- [1] 高鹏,马江泓,杨妮,等. 电子式互感器技术及其发展现状[J]. 南方电网技术,2009(3):39-42.
- [2] 何颖. 智能化变电站技术简析[J]. 企业科技与发展,2014(23):52-54.
- [3] 王志,初凤红,吴建平. 全光纤电流传感器温度补偿研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2014(12):52-61.
- [4] 熊显名,闵旺,秦祖军. 一种全光纤电流传感器温度补偿方法[J]. 激光技术,2014(6):759-763.
- [5] 王晓琪,汪本进,程虎. 全光纤电流互感器偏振误差分析[J]. 电测与仪表,2015(7):19-23.
- [6] 张朝阳,张春熹,王夏霄,等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. 中国电机工程学报,2009(30):42-46.
- [7] 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(21):91-95.
- [8] 袁玉厂,冯丽爽,王夏霄,等. 全光纤电流互感器检测系统的设计[J]. 光电工程,2006(5):95-98,112.
- [9] 张艳锋,严家明. 基于最小二乘法的压力传感器温度补偿算法[J]. 计算机测量与控制,2007(12):1870-1871.
- [10] 徐亦唐. 基于最小二乘法的曲线拟合及其在 MATLAB 中的应用[J]. 电子世界,2013(10):

- 102-103.
- [11] 刘霞,王运锋. 基于最小二乘法的自动分段多项式曲线拟合方法研究[J]. 科学技术与工程, 2014(3): 55-58.
- [12] 温祖强,钱峰. 微机械陀螺温度特性及其补偿算法研究[J]. 电子测量技术, 2011(1):51-54.
- [13] 朱杰,何凌霄,林凡强,等. 最小二乘法分段拟合红外测距系统[J]. 电子器件, 2014(3):524-528.
- [14] 郭小辉,黄英,袁海涛,等. 柔性复合传感器阵列信号采集及温度补偿系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(11):1254-1261.
- [15] 黄强,滕召胜,唐享,等. 电子分析天平温度漂移补偿算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1987-1995.

作者简介

丁浩, 硕士研究生, 工程师, 主要从事一次设备智能化研究工作。

罗德与施瓦茨认证针对 LTE 频段 14 公共安全网络的高功率终端射频一致性测试用例

罗德与施瓦茨(R&S)针对 LTE 高功率终端完成了 6 个射频一致性测试用例的认证,因此,LTE 高功率终端可以开始认证的工作了。R&S TS8980 测试系统是业内首次也是目前唯一支持 LTE 频段 14 公共安全网络相关测试用例的测试系统,为 LTE 扩展到关键通信应用铺平了道路。

2016 年 6 月 14 日,慕尼黑 — 美国已经在全国范围内为 LTE 公共安全网络分配了频段。第一响应管理局(FirstNet)计划采用 LTE 频段 14 为比如警察、火警及紧急医疗等第一响应业务提供服务。

PTCRB 增加了一个新的 RFT118,验证工作在 LTE FDD 频段 14 的高功率终端的发射机性能,这些高功率终端最大发射功率可高达 31 dBm,比普通的商用 LTE 终端最大发射功率 23 dBm 高,因此可以发射更远的距离。

最近在慕尼黑举行的 PVG # 73 会议上,R&S 认证通过了 RFT118 所要求的所有 6 个测试用例,成为业内首次能为高功率终端提供认证的测试系统提供商。

为了认证这些测试用例,R&S 的 TS8980 射频一致性测试系统模拟 LTE 频段 14 的网络,LTE 高功率终端可以进行注册。高功率终端在 31 dBm 发射功率的情况下,TS8980 运行所有的发射机测试用例,进而验证终端的性能。这些测试同样需要保证高功率终端不会干扰使用频段 14 相邻频段的商用 LTE 终端。

R&S 从 2014 年就已经开始支持公共安全网络的 LTE 高功率终端的测试了。在 2014 年的世界移动通信大会上,R&S 使用 CMW500 宽带无线通信测试仪首次展示了高功率终端发射机性能测试的能力。除了支持高功率终端的测试,CMW500 同样也支持公共安全领域其他方面的测试,如终端到终端(D2D)的直接通信测试。