

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.010

基于光强调制原理的电流互感器设计方法

王 伟¹, 徐丙垠¹, 王华广², 吕 攀³, 梁 栋¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 国网山东省电力公司, 济南 250000;
3. 国网山东省桓台县供电局, 山东 桓台 256400)

摘要: 针对数字传输方式的电子式电流互感器存在的不足,提出了一种光强调制式电流互感器的设计方法。分析了光强调制法应用于一次转换器的关键技术,介绍了系统的设计原理及主要电路的设计方法;通过对光信号传输过程中电—光转换、光纤传输及光—电转换过程进行分析,提出了一种计算一次侧交流信号的新方法,并对系统的传输特性进行了详细分析;通过分析LED在温度变化时的发光特性,提出了应对温度变化的电流补偿方法。实验结果表明,文中方法可使电流互感器中的信号传输部分满足0.2级互感器的比差要求,可以用于电子式电流互感器的设计。

关键词: 电流互感器; 光强调制; 线性传输; 温度; 电流补偿

Design Method of Current Transformer Based on Modulation of Light Intensity Principle

WANG Wei¹, XU Bingyin¹, WANG Huaguang², LYU Pan³, LIANG Dong¹

(1. Shandong University of Technology, College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong Zibo 255049, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China; 3. State Grid Shandong Hantai County Electric Power Company, Shandong Hantai 256400, China)

Abstract: Aiming at solving the problem existing in the electronic current transformer using digital transmission way, a design method of current transformer using modulation of light intensity principle is proposed. The key techniques of light intensity modulation applying to primary converter are analyzed, and the design principle of the system and the main circuit are introduced; based on the analysis of the transmission of optical signals which including electric optical conversion, optical fiber transmission and photoelectric conversion, a new method for calculating ac signal on the primary side is proposed, and the transfer characteristic is analyzed in detail; by means of analyzing the LED light-emitting characteristics when the temperature changes, a current compensation method response to the temperature changes is proposed. The experimental results show that, the signal transmission of the current transformer has reached the requirement of 0.2 level of current transformer, the method can be used in the design of electronic current transformer.

Key words: current transformer; modulation of light intensity; linear transmission; temperature; current compensation

0 引言

电子式电流互感器已逐渐成为传统电流互感器的理想替代产品。目前的电子式互感器在一次侧电路转换时多采用数字方式,即利用A/D或V/F变换,将传感线圈产生的模拟信号转换为数字信号后

驱动发光管发光,将光脉冲信号通过光纤传输至二次侧光/电转换后再处理^[1-6]。一次转换器使用数字方式具有抗干扰能力强、传输距离远的优点,但同时存在如下不足,如A/D方式功耗较高;V/F方式需在二次侧使用F/V转换或使用CPU进行测频处理;待传输信号的频带受限于A/D采样或V/F转换速率,不利于高次谐波及暂态信号传输,而提高A/D或V/

收稿日期:2016-01-25; 修回日期:2016-02-23

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA050202)。

Project Supported by National High-tech Research and Development Program(863 Program)(2015AA050202).

F频率又会导致功耗和成本增加;对信号的同步处理或使用复杂的时钟控制电路,或使用异步编码的方式,这些方式均比较复杂^[7-15]。

一次转换器也可使用模拟方式即调制发光管发光强度的方式^[16]。该方式是利用发光管及光电管的线性区,用传感线圈输出的模拟信号直接驱动发光管发光,从而将模拟光信号直接传输至二次侧电路,该方式具有功耗低、频带宽、同步简单及成本低的优点。但模拟信号传输的精度和稳定性较差,其原因之一是二次侧信号所含的噪声对信号计算精度的影响,通过提高一次侧信号的信噪比、对二次侧信号进行数字滤波等方式已能很好的排除该影响;此外,光信号在传输中会受到未知大小的衰减及温度、振动的影响^[17-20],在一次侧施加一个参考信号可实现以上因素对光信号影响的实施跟踪^[21-23],将光强调制时使用的直流偏置信号作为参考信号是一个简单直接的方法。尽管如此,由于发光管发光死区的存在,使参考信号与有用信号的衰减只能接近而无法相等,因此使得该方式在应用时的精度较低。

文中提出了一种光强调制式电流互感器的设计方法,通过对光信号的传输过程进行分析,给出了测量一次侧电流的方法,该方法可用于测量及保护用电流互感器的设计。

1 系统组成原理

如图1所示,传感线圈(LPCT或空心线圈)经信号调理电路后输出与母线电流成比例的模拟交流电压信号 U_{AC} , U_{AC} 表示包括工频、谐波及故障时的暂态信号。该信号与基准电压芯片产生的直流偏置信号 $U_{偏置}$ 通过模拟加法器相加得到 U_{IN} ,即 $U_{IN}=U_{偏置}+U_{AC}$ 。 U_{IN} 通过恒流型驱动使LED发光,将其发光强度记为 P , P 由直流分量和交流分量组成。光信号从一次侧传至二次侧时,会受到与光纤的耦合衰减、光纤传输衰减,使最终待进入光电探测器的光强变小,将该光强记为 P' 。光电检测电路将光信号转化为电压信号 U_{OUT} , $U_{OUT}=U'_{偏置}+U'_{AC}$ 。此后,在二次侧电路中可通过采样、滤波后算出代表母线电流的数字值,或经隔直、程控放大后得到反映母线电流波形的模拟输出。

信号从“电/光”到“光/电”转换经历了 $U_{IN} \rightarrow P \rightarrow P' \rightarrow U_{OUT}$ 的过程,由于 P' 是衰减后的值,因此 U_{OUT} 相对 U_{IN} 也是衰减的, U_{OUT} 的衰减表现为直流分量 $U'_{偏置}$ 和交流分量 U'_{AC} 的同时衰减,对工频测量可不考虑两者的幅频特性差异;对高次谐波来说,两者的幅频特性差异是由电路决定的固定值,可

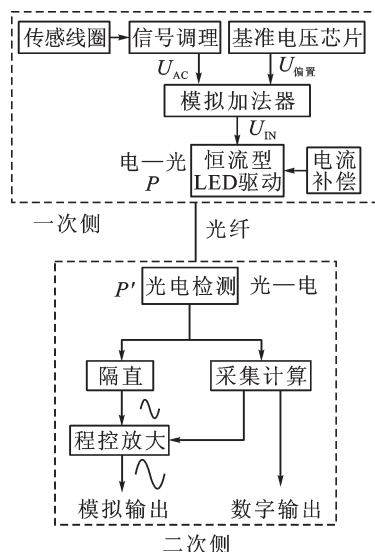


图1 系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of system

针对性地进行补偿。但LED发光死区的存在,使LED的“ $P-I$ ”关系并非标准线性关系,因此直流偏置的增益 $K_{偏置}=U'_{偏置}/U_{偏置}$ 与交流信号的增益 $K_{AC}=U'_{AC}/U_{AC}$ 不相等,因此使用 $K_{偏置}$ 代替 K_{AC} 计算 U_{AC} 的误差较大。

2 光传输过程分析

2.1 LED驱动电路

LED驱动主要有恒流和恒功率两种方式,由于该方法要用LED的发光强度反映其驱动电流的大小及变化,因此使用恒流型驱动,见图2。 U_{IN} 为该驱动的输入,发光功率 P 为输出, U_{IN} 通过电阻 R_1 转换为电流信号用以控制LED发光,三极管 Q_1 作为调整管使用,其集电极和发射集间等同于一个可变电阻,发光管使用通信级的SFH757V,该LED可产生波长650 nm的红色可见光。运放使用低偏置电流、低失调电压的AD795,其输入偏置电流及输入失调电压仅为1 pA及100 μ V,因此流经LED的电流 $I=U_{IN}/R_1$ 。

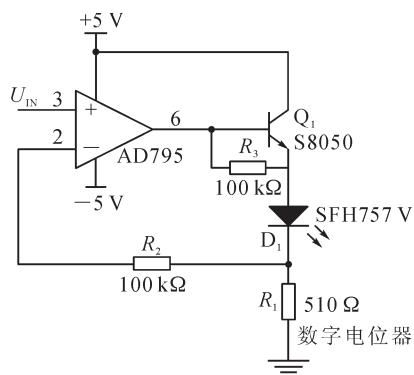


图2 LED驱动电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of LED drive circuit

LED的发光功率由流过它的电流决定, 由于LED发光死区的存在, 使其在电流较小时 P 与 I 并非线性关系, 随着流经电流 I 的增大, P 与 I 变为线性关系, 通信用LED通常具有较宽的线性区范围。由于 $U_{IN}=IR_1$, 且实际电路以电压作为驱动信号, 因此可直接分析 U_{IN} 与 P 的关系。

图3为针对图2电路实测的驱动电压 U_{IN} 与发光功率 P 的关系, LED发光死区的存在使得两者线性部分的等效直线不过原点。在两者关系的线性区内, 该 P - U 关系可表示为

$$P=a \cdot U_{IN}+b \quad b<0。 \quad (1)$$

式(1)中: a 表示直线斜率; b 表示截距。

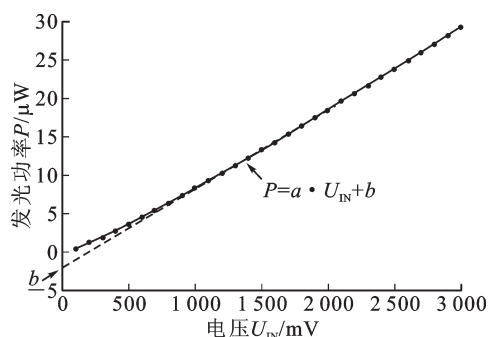


图3 LED驱动电压与发光功率关系

Fig. 3 Relation between drive voltage of LED and optical power

2.2 光在光纤中的传输

光从LED发出后, 要依次经过“耦合→传输→耦合”3个过程后进入二次侧的光电检测器, 即光要经光纤连接器耦合进入光纤、在光纤中传输、经光纤连接器耦合进入光电探测器3个过程, 每个过程均会使光功率受到衰减。对功率传输来说, 以上过程的衰减均为线性衰减, 实际通常使用dB为单位衡量衰减的大小, 为方便计算, 这里使用倍数关系衡量衰减大小。若LED所发出光的功率为 P , 耦合进入光电探测器的光功率为 P' , 则 P' 与 P 的关系表示为

$$P'=\alpha \cdot P \quad \alpha<1。 \quad (2)$$

2.3 光电检测电路

光电检测电路的实质是“I-V”转换电路, 用以将接收到的光信号转换为方便后续电路使用的电压信号, 见图4。光电探测器使用线性度高、噪声小的PIN光电二极管SFH250V将光信号转化为电流信号, 再用反馈电阻 R_4 将电流转化为电压信号。由于光电二极管引入的噪声会同有用信号一起经反馈电阻放大, 因此对信号计算之前可通过滤波电路滤除噪声, 使用一阶RC无源低通滤波即可满足要求, R_5 和 C_5 参数根据测量要求选取, 对于功率计

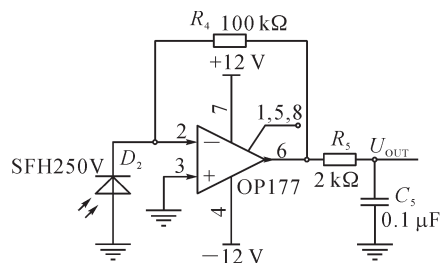


图4 光电检测电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of photoelectric detection circuit

量, 可直接将高于13次谐波以上的信号及噪声滤除, 将滤波后的信号记为 U_{OUT} 。该电路中的运放选用低噪声、低偏置电流及低失调电压的OP177A, 图中的光电二极管工作在光电压模式, 该模式具有无偏置电压、无暗电流且噪声小的特点, 适合线性应用。

若输入光电二极管的光功率为 P' , 那么由于光电二极管SFH250V的输入光功率与输出的光电流之间具有很高的线性度, 即 $I'=\mu \cdot P'$, μ 表示光电转换的转换因数; 同时, “I-V”转换电路使光电流 I' 与光电检测电路的输出 U_{OUT} 符合 $U_{OUT}=I' \cdot R_4 \cdot \lambda$ 的关系, R_4 表示反馈电阻的阻值, λ 表示滤波电路对交流信号的衰减。因此可以得出: $U_{OUT}=(\mu \cdot R_4 \cdot \lambda)P'$, 将 $\mu \cdot R_4 \cdot \lambda$ 记为 β , 电路确定后, R_4 、 λ 是常数, μ 仅在光电二极管温度变化或器件老化时改变, 且 μ 变化导致的 β 变化会直接反映在二次侧的 U_{OUT} 上。因此, 将 U_{OUT} 与 P' 的关系表示为

$$U_{OUT}=\beta \cdot P'。 \quad (3)$$

针对图4电路实测的输入光功率与输出电压的关系曲线见图5。

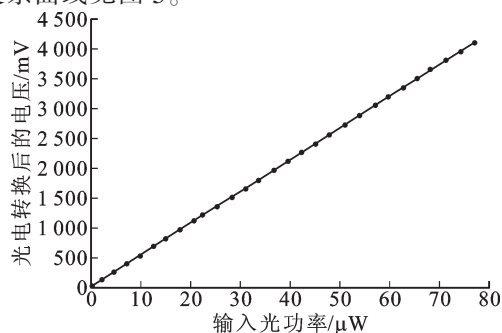


图5 输入光功率与输出电压关系

Fig. 5 Relation between input optical power and output voltage

3 系统传输特性分析

由式(1)-(3)可以得出

$$U_{OUT}=(\alpha \cdot \beta \cdot a) \cdot U_{IN}+\alpha \cdot \beta \cdot b。 \quad (4)$$

将 $\alpha \cdot \beta \cdot a$ 记作 A , 表示线性传输关系的斜率, 将 $\alpha \cdot \beta \cdot b$ 记作 B , 表示截距, 则 $U_{OUT}=A \cdot U_{IN}+B$ 。

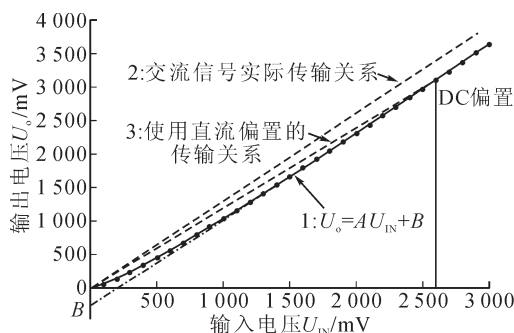


图6 实测传输关系

Fig. 6 Practical transmission relation

图6为实测的系统中 U_{IN} 与 U_{OUT} 的传输关系, 实线1为实际的传输关系, 其线性部分的关系即 $U_{OUT} = A \cdot U_{IN} + B$ 。实际信号 $U_{IN} = U_{偏置} + U_{AC}$, 相应的 $U_{OUT} = U_{偏置}' + U_{AC}'$ 。当 $U_{AC} = 0$ 时, $U_{IN} = U_{偏置}$, $U_{OUT} = U_{偏置}'$, ($U_{偏置}$, $U_{偏置}'$)点即为系统的静态工作点。作为叠加在直流偏置上的交流信号, U_{AC} 和 U_{AC}' 分别叠加在 $U_{偏置}$ 和 $U_{偏置}'$ 上完成传输。

对静态工作点($U_{偏置}$, $U_{偏置}'$)来说, 根据式(4), $U_{偏置}' = \alpha \cdot \beta (a \cdot U_{偏置}' + b)$, $U_{偏置}'$ 可测量计算得到, $U_{偏置}$ 为常数, a 、 b 可对具体 LED 测量得到, 因此

$$\alpha \cdot \beta = \frac{U_{偏置}'}{a \cdot U_{偏置} + b} \quad (5)$$

对待测的交流信号 U_{AC} 来说, 其实际增益即该线性传输关系的斜率 A , 即图中的虚线2, 因此 $U_{AC}' = A \cdot U_{AC} = (\alpha \cdot \beta) \cdot a \cdot U_{AC}$, 因此

$$U_{AC} = \frac{U_{AC}'}{(\alpha \cdot \beta) \cdot a} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)得到

$$U_{AC} = U_{AC}' \cdot \left(\frac{a \cdot U_{偏置} + b}{a \cdot U_{偏置}'} \right) \quad (7)$$

式(7)可以进一步简化为

$$U_{AC} = U_{AC}' \cdot \left(\frac{U_{偏置} + \frac{b}{a}}{U_{偏置}'} \right) \quad (8)$$

式(8)即为该方法计算一次侧 U_{AC} 的公式, $U_{偏置}'$ 和 U_{AC}' 可在二次侧测量计算得到, $U_{偏置}$ 为已知量。可见, 只要提前测量出所用 LED “P-U” 关系中系数 a 和 b 的比值 b/a , 即可计算出一次侧交流信号 U_{AC} 的大小, 进而计算母线电流大小。

系数 a 和 b 可在 LED 发光的线性区内, 通过对 LED 驱动电路施加若干个直流电压信号, 同时测量记录各直流信号对应的光功率 P , 对各 (U , P) 点拟合得到。光的测量环节存在衰减, 实际只能测得光功率的相对值, 拟合得到的 a 、 b 值也是衰减值, 由于本方法只需测出系数的比值 b/a , 且由于 b 和 a 具有相同的衰减倍数, 因此 b/a 的值是确定的。

式(8)变换形式, 得到 $\frac{U_{AC}'}{U_{AC}} = \frac{U_{偏置}'}{U_{偏置} + \frac{b}{a}}$,

$$\text{即} \quad K_{AC} = \frac{U_{偏置}'}{U_{偏置} + \frac{b}{a}} \quad (9)$$

K_{AC} 即图6中虚直线2的斜率, 而 $U_{偏置}'/U_{偏置}$ 即 $K_{偏置}$ 则表示图6中直流偏置在线1上对应的点与原点连线形成直线的斜率, 即虚直线3的斜率, 显然 $K_{偏置} < K_{AC}$, 此即使用 $K_{偏置}$ 代替 K_{AC} 误差较大的原因。由于 $b < 0$, 且 $a > 0$, 因此 $b/a < 0$, 由式(9)可知, b/a 的存在即 $K_{偏置} \neq K_{AC}$ 的原因, 而 b/a 实际为用 $K_{偏置}$ 计算 K_{AC} 的一个补偿修正。

同时, 由式(9)可知, $K_{偏置}$ 越大, b/a 对计算 K_{AC} 的影响越小, 即 $K_{偏置}$ 与 K_{AC} 越接近, 当 $U_{偏置}$ 足够大时, 使用 $K_{偏置}$ 代替 K_{AC} 足以实现高测量精度, 然而, $K_{偏置}$ 增大的实质是 LED 静态工作电流的增大, 即一次侧静态功耗的增大, 这不利于系统的低功耗设计。

4 温度变化时的处理

使用式(8)计算一次侧 U_{AC} 的前提是 LED 对应的补偿系数 b/a 是不变的, 实际中该值在互感器出厂前在室温下测量得到。

电流互感器在现场工作时其一次侧设备内部温度会随母线电流、环境温度而变化, 致使 LED 中 PN 结温度发生变化, LED 的发光功率会随温度的升高而降低。LED 温度变化时, 其发光特性的线性区是依然存在且良好的, 但发光功率的变化将导致补偿系数 b/a 大小发生变化, 使该方法在温度升高时精度下降。选用高温稳定性 LED 是一个解决方法, 由于 b/a 通常在室温下测得, 因此测量精度在室温时最高, 温度越高, 精度越低, 该方法在精度要求较低的应用如保护应用是适用的。此外, 增大 $U_{偏置}$ 以降低 b/a 对 K_{AC} 计算的影响也是解决该方法之一, 但会带来静态功耗的增大。实际中, 将两种方法相结合对一般应用是可以满足的。

文中通过研究温度对 LED 电气特性的影响提出了电流补偿方法, 该方法可不增加静态功耗, 同时对 LED 的温度稳定性也没有特殊要求。LED 随温度发生的最明显的性能改变是正向压降的变化, 当 LED 工作于恒流状态时, 正向压降将随着 LED 的变热而下降, 致使 LED 的输入功率下降, 从而导致光输出减少, 这是导致 LED 发光功率变化的主要原因。不同 LED 的正向压降温度系数 dU_f/dT 是不同的, 对选定的 LED, 该参数可在数据手册中查阅得到, 此处使用的 SFH757V 温度系数为 $-1.8 \text{ mV/}^\circ\text{C}$,

即温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其正向电压下降 1.8 mV 。因此, 为保证光输出不受 U_f 下降的影响, 可以使 LED 的发光功率在驱动电流一定时不受温度影响从而处于恒功率状态, 通过测量 LED 两端电压, 当电压下降时增加电流则可以达到维持 LED 功率不受温度影响的目的。

图 7 为对 SFH757V 在发光线性区测得的不同温度时的光功率特性, 可见, 发光功率随温度升高而下降, 但不同温度时其发光依然是线性的, 同时发现, 线性传输关系中的斜率 a 随温度升高而略微减小, 且截距 b 随温度升高的减小也是近似等比例的。

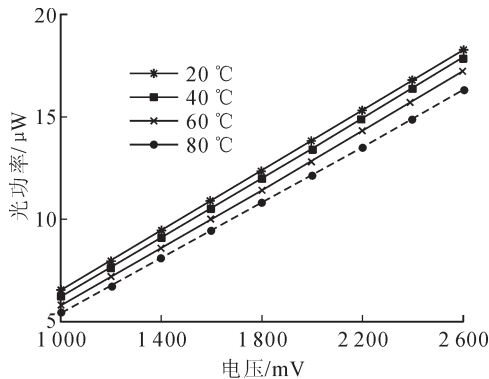


图 7 LED 发光功率与温度变化关系

Fig. 7 Relation between optical power of LED and temperature variation

表 1 示出了不同温度时各线性关系拟合得到的 a 、 b 及 b/a 值, 其中 a 、 b 的值放大 100 倍以便于观察。可以看出, 在电流补偿之前, $|b/a|$ 的值随温度的变化是一个近似的等比例变化, 因此, 可以通过补偿电流达到温度变化时保持 $|b/a|$ 近似不变的目的。

表 1 不同温度下 LED 对应的补偿系数

Table 1 Compensation factor of LED in different temperature

温度/ $^{\circ}\text{C}$	a	b	$ b/a $ (补偿前)	$ b/a $ (补偿后)
20	0.732	-82.76	113	113
40	0.729	-111.98	154	115
60	0.714	-143.32	201	119
80	0.690	-165.32	240	121

为实现电流补偿, 将图 2 中的 R_1 使用数字电位器实现, 同时, LED 的正向电压要定期为 CPU 采样监测, 此后, CPU 根据提前写入的室温时的 $|b/a|$ 值、正向压降 U_{f0} 算出补偿电流的大小, 从而控制 R_1 在室温时的初始值 R_0 的基础上进行相应调整。具体补偿过程见图 8。

表 1 示出了使用该方法进行电流补偿后的值, 可以看出, 温度升高时, 补偿后的值与室温时的该值非常接近, 各值间微小的差异对该方法使用已没

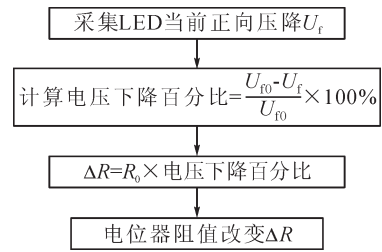


图 8 电流补偿方法流程图

Fig. 8 Flowchart of current compensation method

有影响。

5 实验结果

使用 SFH757V 和 SFH250V 对管对整个“电—光”及“光—电”系统进行测试。由于 LED 的发光直径及光的散射角较大, 使用内径 1 mm 的塑料光纤以提高耦合效率; 直流参考电压选用 4 V , 数字电位器的初始值设置为 $800\text{ }\Omega$, 从而将发光管的静态工作电流设定为 5 mA 。使用信号源产生工频信号代表传感头信号调理后的输出。

图 9 为实测的输入及输出波形, 通道 1 是信号源施加的工频信号 U_{IN} , 通道 2 为 U_{OUT} , 为方便观察, 图中只显示交流分量。 U_{OUT} 相对 U_{IN} 除波形幅度增益有改变, 其信号波形无畸变; 此外, U_{OUT} 相比 U_{IN} 有一定相移, 该相移由光电检测电路中的滤波电路及 LED 的结电容导致, 对固定频率的信号, 其相移也是固定的, 可通过在低压侧电路中使用相位补偿电路进行补偿。

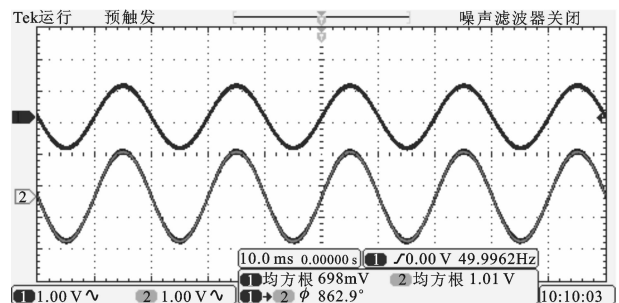


图 9 实测的输入及输出波形

Fig. 9 Measured waves of the input and output

数字电位器选用具有 256 阶电阻调节分辨率、总阻值为 $1\text{ k}\Omega$ 的 AD8400, 其电阻调节分辨率可控制在 $4\text{ }\Omega$ 以内。图 10、11 分别为不使用电流补偿和使用电流补偿时的测量比差, 其中横坐标表示 U_{IN} 中的工频成分 U_{AC} 的有效值, 该值即代表母线电流值, 图中的虚线为 0.2 级电流互感器的比差要求。可以看出, SFH757V 对温度较为敏感, 不进行电流补偿时, 其测量比差随温度升高下降明显, 电流补偿后, 在各个温度其测量比差均满足 0.2 级电流互感

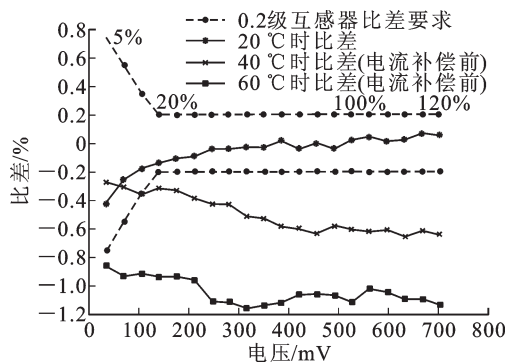


图10 不使用电流补偿时各温度的测量比差

Fig. 10 Ratio error in different temperature without current compensation

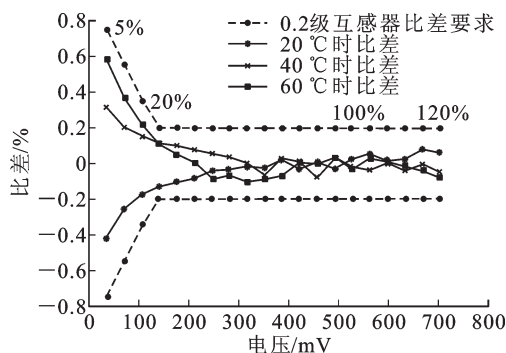


图11 电流补偿后各温度时的测量比差

Fig. 11 Ratio error in different temperature with current compensation

器的比差要求。该误差仅为信号传输部分的误差而未包含传感头误差,因此可在此基础上实现0.5级测量或5P级保护用电流互感器的设计。

该方法使一次侧电路的静态功耗大大降低。由于LED的静态工作电流设定为5 mA,一次侧电路使用3.3 V电压供电,因此LED的静态功耗仅为17 mW;同时,由于对LED正向压降可以使用极低的采样速率,因此通过选用超低功耗的CPU、电压基准芯片及运放,整个一次侧电路的静态功耗可控制在30 mW之内。因此,对有源电子式电流互感器来说,较低的静态功耗也降低了对电源电路的设计要求。

6 结语

通过对光强调制方式的信号传输部分进行分析,推导出了利用LED对应的补偿系数、一次侧偏置电压、二次侧偏置电压及交流信号计算一次侧母线电流的表达式,并通过分析系统的传输特性、LED的热特性给出了应对温度变化的方法,从而可在温度变化时保证该方法的有效性。该方法可在二次侧直接得到反映母线电流大小和变化的模拟波形信号,使系统的传输频带更宽,同时,使一次电路功耗更低、系统的同步更简单。实验结果验证了该方法

的有效性。

参考文献:

- [1] 李振华,胡蔚中,闫苏红,等. 电子式电流互感器中的高精度数字积分器技术[J]. 高压电器,2016,52(2):42-49.
LI Zhenhua, HU Weizhong, YAN Suhong, et al. High accuracy digital integrator technology for electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2):42-49.
- [2] 方志,邱毓昌,赵中原. 一种用于高压测量系统的V/F转换电路的设计[J]. 电测与仪表,2002,39(2):30-32.
FANG Zhi, QIU Yuchang, ZHAO Zhongyuan. Design of a kind of V/F converter circuit for high voltage measuring system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2002, 39(2):30-32.
- [3] 颜研,罗承沐. 一种新型光电电流互感器的研制[J]. 传感器技术,2002,21(1):23-27.
YAN Yan, LUO Chengmu. Development of a novel optical-electronic current transformer[J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21(1):23-27.
- [4] 方志,赵中原,邱毓昌,等. 用于混合式光电电流互感器的光电传输系统[J]. 电网技术,2003,27(4):43-45.
FANG Zhi, ZHAO Zhongyuan, QIU Yuchang, et al. An opto-electric transmission system for hybrid optical current transformer [J]. Power System Technology, 2003, 27(4):43-45.
- [5] 申焯,王士敏,罗承沐. 一种电子式电流互感器的研制[J]. 电力系统自动化,2002,26(18):41-44.
SHEN Zhu, WANG Shimin, LUO Chengmu. Development of an electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18):41-44.
- [6] 苏育均,任晓,方春恩,等. 10 kV 电子式电流互感器研究[J]. 变压器,2011,48(12):29-33.
SU Yujun, REN Xiao, FANG Chun'en, et al. Research on 10 kV electronic current transformer [J]. Transformer, 2011, 48(12):29-33.
- [7] 陈晓明,王晓琪,郭克勤,等. 互感器二次负荷调查统计与分析[J]. 高压电器,2014,50(5):63-68.
CHEN Xiaoming, WANG Xiaoqi, GUO Keqin, et al. Statistics and analysis of secondary load in instrument transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5):63-68.
- [8] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):94-98.
LI Jiuhu, ZHENG Yuping, GU Shidong, et al. Application of electronic instrument transformer in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7):94-98.
- [9] 贾春荣,邸志刚,张庆凌,等. 电子式电流互感器传感头的低功耗设计[J]. 高压电器,2009,45(2):84-86.
JIA Chunrong, DI Zhigang, ZHANG Qingling, et al. Low power consumption design of electronic current transformer sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2):84-86.

- [10] 王静丽, 武 可, 金光耀, 等. 智能电网监控装置取能方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 94-99.
WANG Jingli, WU Ke, JIN Guangyao, et al. Power supply methods research on the smart grid monitoring device[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 94-99.
- [11] 杨书杰, 张贤跃. 高压侧测量用电源设计[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(12): 113-115.
YANG Shujie, ZHANG Xianyue. Design of power source for measuring at high-voltage side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(12): 113-115.
- [12] 任晓东, 陈树勇, 姜 涛. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-71.
REN Xiaodong, CHEN Shuyong, JIANG Tao. Design of power supply of electrical current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 67-71.
- [13] 赵 勇, 孔圣立, 罗 强, 等. 电子式电流互感器暂态传变延时测试技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 125-130.
ZHAO Yong, KONG Shengli, LUO Qiang, et al. Research on testing technology of ECT transmission delay time in transient state[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 125-130.
- [14] 王 鹏, 罗承沐, 张贵新. 基于低功率电流互感器的电子式电流互感器[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 98-101.
WANG Peng, LUO Chengmu, ZHANG Guixin. Electronic current transformer based on low-power current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 98-101.
- [15] 王 玲, 汪本进, 吴士普, 等. 电子式电流互感器暂态特性检测系统研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 86-91.
WANG Ling, WANG Benjin, WU Shipu, et al. Study on transient characteristics test method of electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 86-91.
- [16] 李开成, 张健梅. 一种基于光强调制的电流测量方法[J]. 仪表技术与传感器, 1999(8): 35-36.
LI Kaicheng, ZHANG Jianmei. A measurement method of current based on modulation of light intensity[J]. Instrument Technique and Sensor, 1999(8): 35-36.
- [17] 王 鹏, 张贵新, 朱小梅, 等. 电子式电流互感器温度特性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 60-64.
WANG Peng, ZHANG Guixin, ZHU Xiaomei, et al. Temperature characteristic analysis on electronic current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 60-64.
- [18] 胡 蓓, 叶国雄, 黄 华, 等. 电子式电流互感器振动试验方法研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(8): 62-67.
HU Bei, YE Guoxiong, HUANG Hua, et al. Research on the ECT vibrating test methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(8): 62-67.
- [19] 黄 华, 胡 蓓, 冯翔翔, 等. 电子式电流互感器温度循环试验方法研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(24): 65-69.
HUANG Hua, HU Bei, FENG Xiangxiang, et al. Research on temperature cycle test of the electronic current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(24): 65-69.
- [20] 刘 彬, 叶国雄, 郭克勤, 等. 电子式互感器性能检测及问题分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2972-2980.
LIU Bin, YE Guoxiong, GUO Keqin, et al. Quality test and problem analysis of electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2972-2980.
- [21] 刘建华, 陈 庆, 张明明, 等. 有源电子式电流互感器的关键技术[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 116-118.
LIU Jianhua, CHEN Qing, ZHANG Mingming, et al. Key technologies of active electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 116-118.
- [22] 邸荣光, 刘仕兵. 光电式电流互感器技术的研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 98-100.
DI Rongguang, LIU Shibing. Research status quo and development of optical current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 98-100.
- [23] 王少奎. 电子式电流互感器的发展现状及研制难点[J]. 变压器, 2003, 40(5): 20-25.
WANG Shaokui. Development difficult points and present situation of electronic current transformer[J]. Transformer, 2003, 40(5): 20-25.
- 王 玮(1983—), 男, 讲师, 硕士, 从事电气测量、配电自动化及嵌入式系统设计方面的研究。
徐丙垠(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事配电自动化、电力故障检测方面的研究。
王华广(1963—), 男, 高工, 从事供用电技术工作。
吕 攀(1983—), 女, 工程师, 从事电网设计规划方面的研究。
梁 栋(1988—), 男, 硕士研究生, 从事配电自动化、电气测量方面的研究。

(上接第 60 页)

- Atomic and Molecular Physics, 1994, 11(2): 120-128.
- [19] ZHAO X, HENE-BARTOLIC V, KUNZE H J. Spatial distribution of electron density in micro-plasmas produced by laser ablation of solids[J]. Appl. Phys., 1992(B55): 327-330.
- [20] ANDREIC Z, HENE-BARTOLIC V, KUNZE H J. Dynamics of aluminum plasma produced by a nitrogen laser[J]. Phys. Scr., 1993, 47(47): 331-339.
- [21] GRIEM H R. Plasma spectroscopy[M]. New York: Academic Press, 1964: 139-240.
- 李学斌(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压绝缘与试验、电子设备故障诊断。