

模拟光电式电流互感器的频率特性分析

张鹏¹, 王玮¹, 徐丙垠¹, 贾明娜², 张圣鹏¹, 孙中玉¹, 王鹏玮¹

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087)

摘要:从模拟光电式电流互感器的组成和实现原理出发,研究了关键器件参数对其传输带宽的影响,并分别对其各组成单元进行了建模,得到了系统光路的传递函数,并对其幅频、相频特性进行了分析;通过稳态和暂态信号传输的仿真及实测结果验证了建模的正确性。试验表明,模拟光电式电流互感器的截止频带可达到500 kHz,即使对1 MHz的高频信号也具有小于1 μs的上升响应时间,该互感器对稳态及暂态信号的良好传变特性使其在电气测量领域具有广阔的应用前景。

关键词:电流互感器;模拟光电式电流互感器;频率特性;宽频带;行波测量

中图分类号:TM 452

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912019

0 引言

电流互感器是电力系统实现测量、计量及继电保护的重要设备。受传感原理的限制,传统电磁式电流互感器已不能满足现代电力系统的发展需要,电子式电流互感器(ECT)凭借其绝缘性能好、不饱和、频率响应范围宽等优势已成为互感器的未来发展方向^[1-3]。目前,对ECT的研究多集中在将高压侧信号就地数字化的数字方式ECT上,而针对将待测电流信号以模拟光方式传输的模拟光电式ECT的研究较少^[4-6]。通过对其信号传输通道的合理设计,模拟光电式ECT已解决其测量精度问题^[7-8]。与数字式ECT相比,模拟光电式ECT除具有前者所具备的优势外,还具有频带宽的明显优势^[9]。常规继电保护中所用谐波一般不超过5次,功率测量的建议频率上限为13次谐波,小电流故障选线的有效频率大约为20~2 000 Hz,行波测距所用故障信号频率在500 kHz~2 MHz之间,因此模拟光电式ECT的宽频特性使其应用范围更加广泛。本文针对模拟光电式ECT的频率特性进行研究,建立了模拟光电式ECT及各功能电路的模型并推导了其传递函数,分析了器件参数对系统频率特性的影响,对不同频率信号的传输特性进行仿真,并实测和分析了其传输精度。

1 模拟光电式ECT的实现原理

模拟光电式ECT主要包括罗氏线圈、预处理单元、电光转换单元、光纤和光电转换单元,其系统组成原理如图1所示。

收稿日期:2019-03-20;修回日期:2019-10-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900600);山东省重点研发计划(公益类)项目(2019GGX104025)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFB0900600) and the Key Research & Development Plan Program of Shandong Province(Public Welfare)(2019GGX104025)

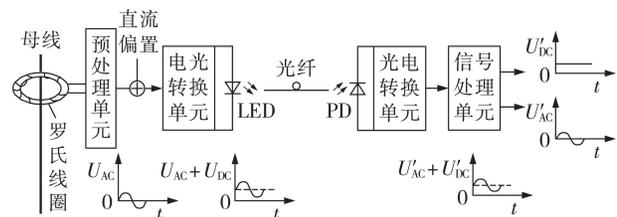


图1 系统组成原理图

Fig.1 Schematic diagram of system composition

根据法拉第电磁感应定理,当载流导体上的电流发生变化时,线圈产生感应电动势,该电动势的大小反映了导体电流的大小。预处理单元包含积分电路、放大电路和滤波电路,感应电流经预处理单元后变为模拟电压信号 U_{AC} , U_{AC} 中包含工频信号、高次谐波和暂态信号。直流电压模块选用高精度超低温漂基准电压芯片产生一固定大小的直流参考电压 U_{DC} ,该类芯片可在 $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内输出误差小于0.05%, U_{DC} 与 U_{AC} 合成新的信号 $U_{AC} + U_{DC}$ 作为LED发光的驱动电压。引入偏置电压 U_{DC} 有2个作用:①使LED工作在其发光的线性区;②利用 U_{DC} 的衰减大小作为待测信号 U_{AC} 在光路中传输衰减的校准信号,且偏置电压 U_{DC} 越大,对 U_{AC} 衰减校准的精度越高^[8]。电光转换单元实现对LED的恒流型驱动发光,LED的发光强度与输入信号 $U_{AC} + U_{DC}$ 的瞬时大小呈线性关系。光信号从一次侧经耦合衰减、传输衰减后传至二次侧,光电二极管感应出光生电流,经光电转换单元转换为电压信号 $U'_{AC} + U'_{DC}$,继而经信号处理单元分离出直流分量 U'_{DC} 和交流分量 U'_{AC} 。若整个系统的频率特性已知,则可以通过输出信号 U'_{AC} 还原母线电流的真实情况。

2 系统频率特性分析

模拟光电式ECT的频率特性由罗氏线圈及信号的光电传输通道共同决定,目前对于罗氏线圈频率

特性的研究已经很成熟^[10-13],不再赘述,本文仅对信号光电传输通道的频率特性进行分析。

2.1 电光转换单元

电光转换单元包含一恒流型驱动电路和1个LED,恒流型驱动电路使LED的辐射光通量与通过它的电流呈正比关系,图2为该电路的一种实现形式。图中, $R_1=R_2=100\text{ k}\Omega$; $R_3=100\ \Omega$ 。对于该电路而言,运放的带宽、三极管频带和LED的频率响应都会成为限制频带的因素。

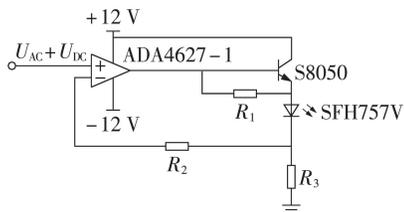


图2 电光转换电路

Fig.2 Electro-optic conversion circuit

电光转换单元将电压驱动信号 $U_{AC} + U_{DC}$ 转换为驱动LED发光的电流信号,图2中流过LED的电流为 $(U_{AC} + U_{DC})/R_3$ 。由于LED发光时并非全段为线性区,为使其工作在线性区,需用直流偏置 U_{DC} 将 U_{AC} 抬升至LED发光的线性区。

通过选用极低偏置电流的运放设计恒流型驱动电路,可保证 $U_{AC} + U_{DC}$ 与LED的驱动电流保持高线性度。

2.1.1 运放对频带的限制

图2所示的电路采用了输入偏置电流为1 pA的ADA4627-1作为恒流型驱动的运放,其增益带宽积为19 MHz、压摆率 $r_s = 82\text{ V}/\mu\text{s}$ 。当输入峰峰值 $V_{P-P} = 100\text{ mV}$ 的小信号时,作为电压跟随器的运放的增益为1,带宽 W_B 可达19 MHz;当输入 $V_{P-P} = 2\text{ V}$ 的大信号时,根据计算公式 $r_s = 2\pi V_{P-P} W_B$ 可得,此时的 $W_B = 6.5\text{ MHz}$ 。

运放作为电压跟随器为限流电阻 R_3 提供电位,由于通过 R_2 的电流基本为0,且可以忽略运放的输入电容和寄生电容对流经 R_2 电流的分流作用,因此保证了流经LED的电流与运放的输入电压呈高线性度关系。

三极管S8050的特征频率可达150 MHz,其结电容对频率特性影响相较于二极管微乎其微,分析时可忽略。

2.1.2 LED频率响应

除运放的带宽和三极管频带外,LED的频率特性也是限制带宽的主要因素。系统所用SFH757V为通信级LED,其频带达到20 MHz,开关时间为15 ns,发射中心波长为650 nm的红色可见光,光功率约为总输入电功率的19.5%。图3为该LED的等效电路

模型。

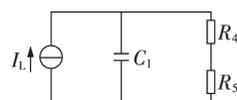


图3 LED等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of LED

图中,流经LED的电流等效为电流源 I_L ,即 $(U_{AC} + U_{DC})/R_3$;由于LED的电功率一部分作为光功率发射出去,另一部分作为热功率传递到外界环境,LED的光功率和热功率分别等效为 R_4 、 R_5 消耗的功率;由于LED中还存在结电容 C_1 ,所以高频信号的发光功率相较于低频信号要低,原因是结电容分流了产生光功率的电流。为计算 R_4 、 R_5 的值,在图3中添加2 V直流电压,则 $I_L = 2/100 = 0.02\text{ (A)}$ 。使用光功率计测得光信号功率 $P = 2.62\text{ mW}$,根据 $P = I_L^2 R_4$ 可得 $R_4 \approx 6.65\ \Omega$ 。由于光功率约为LED总输入电功率的19.5%,则有 $R_4 + R_5 = 6.65/19.5\% \approx 33.64\ (\Omega)$,可知 $R_5 = 27.08\ \Omega$ 。

以需要传输最高频率为2 MHz的信号为例,由于运放的限制带宽大于信号的最高频率,因此仅考虑LED结电容对频率响应的影响。电光转换电路输出光强度 I_0 与输入电压信号 $U_{AC} + U_{DC}$ 的传递函数如式(1)所示。

$$H_1 = \frac{I_0(s)}{(U_{AC} + U_{DC})(s)} = \frac{1}{R_3} \frac{\eta_1}{1 + sC_1(R_4 + R_5)} \quad (1)$$

其中, $C_1 = 15\text{ pF}$; η_1 为发光效率。

根据式(1),电光转换单元的波特图如图4所示。

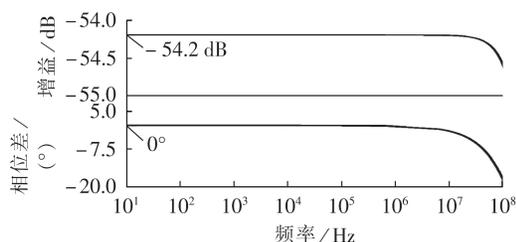


图4 电光转换单元波特图

Fig.4 Bode plot of electro-optic conversion unit

由图4的幅频特性曲线可知,工频信号至2 MHz的信号基本保持-54.2 dB的增益,频率大于2 MHz后增益开始下降,这与输入高频信号其发光强度变弱的现象吻合;当频率低于100 kHz时,相位响应很好,基本没有相位失真;当频率大于1 MHz时,相差的绝对值迅速增大。

2.2 光纤传输

选用PMMA多模塑料光纤,光纤直径为2.2 mm,纤芯直径为1 mm,光纤尺寸及传播机理如图5所示。

选用此类PMMA光纤的原因为:①纤芯较粗,容



图5 光纤尺寸及光纤传播机理

Fig.5 Fiber size and light propagation mechanism

易耦合进更多的光线,非常适用于LED光源;②该种光纤的传输频带宽、质地柔软且价格低廉。

光信号在光纤中传输产生衰减,原因是存在吸收损耗和色散损耗^[14-15]。

2.2.1 吸收损耗

吸收损耗是光信号衰减的主要因素,其功率随距离增加以指数率衰减,光信号 $P(0)$ 在光纤中传播距离 L 后,其功率 $P(L)$ 为:

$$P(L) = P(0)e^{-\alpha L - \beta Lk} \quad (2)$$

因此传递函数 H_{2-1} 为:

$$H_{2-1} = \frac{P(L)}{P(0)} = e^{-\alpha L - \beta Lk} \quad (3)$$

其中, L 为光纤长度; f 为光信号的频率; $k = 10^{10}$; α 为吸收损耗系数,当波长为650 nm时, $\alpha = 0.046 \text{ m}^{-1}$ 。

2.2.2 色散损耗

色散损耗的传递函数为:

$$H_{2-2} = \cos \frac{\omega^2 \lambda^2 DL}{4\pi c} \quad (4)$$

其中, ω 为光信号角频率; λ 为光信号的中心波长; D 为光纤的色散系数; c 为光速。

2.2.3 光纤整体损耗

光纤的整体衰减为吸收损耗和色散损耗的总和,此外,除光纤材料特性造成的衰减,光纤接头处也存在耦合衰减,即存在一耦合系数。耦合系数与光纤、光源之间的距离及接头松紧度有关,本实验装置的耦合系数经测定为20.8%。信号在光纤中的传递函数为:

$$H_2 = (H_{2-1} + H_{2-2} - 1)\eta_2 \quad (5)$$

其中, η_2 为耦合系数。不考虑接头的光纤幅频特性如图6所示。

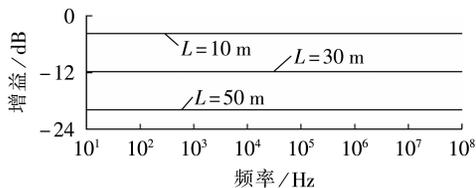


图6 不考虑接头的光纤幅频特性

Fig.6 Amplitude-frequency characteristics of optical fibers without considering connectors

从图6中可以看出,特定波长的光信号在光纤中传输时,影响其衰减的主要因素为光纤长度,光信号频率只有达到GHz数量级时才会对衰减产生影响。

2.2.4 相位延迟

考虑到LED光谱有25 nm的谱宽,PMMA光纤为多模光纤,所以群延时是造成相位延迟的主要因素。相位延迟的函数表达式为:

$$\Delta\theta = 2\pi\sigma_\lambda DLf \quad (6)$$

其中, $\Delta\theta$ 为相位差; σ_λ 为谱宽。

以长度为10 m的光纤为例,其相频特性如图7所示。由图可见,当光信号频率低于100 kHz时,相位差小于 1° ;当频率大于100 kHz后相位差绝对值增大,频率为1 MHz时相位滞后 1.8° 。

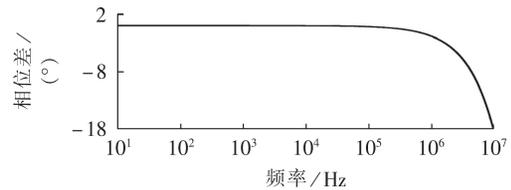


图7 光纤的相频特性

Fig.7 Phase-frequency characteristics of optical fiber

2.3 光电转换

光信号从光纤输出耦合到光电二极管,产生的光电流经电阻 R_0 变为电压信号输出。光电二极管SFH250V工作在光电压模式,该模式下噪声小,无暗电流和偏置电压,符合模拟光电式ECT的线性应用要求。图8为光电转换的一种形式,其中光电二极管的频率特性、运放的带宽、寄生电容以及相位补偿是影响频带的因素。

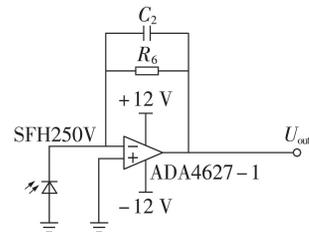


图8 光电转换电路

Fig.8 Photoelectric conversion circuit

2.3.1 光电二极管频率响应

图9为光电二极管的等效模型。图中, $I_p = r_\phi \phi_0$ 为光生电流,在光通量 ϕ_0 波长分布不变的情况下二极管通量响应率 r_ϕ 为常数;二极管D表示正向偏置状态下的电压条件;暗电阻 R_7 为零偏置时的结电阻,该阻值通常很大,其分流效果有限,可以忽略;串联电阻 R_8 为半导体材料的电阻,通常情况下其阻值很小,故分析时也可忽略。对于光电管而言,对其频

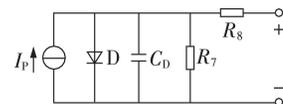


图9 光电二极管等效电路

Fig.9 Equivalent circuit of photodiode

率特性影响最大的是结电容 C_D , 二极管 D 上的任何电压信号都会和结电容相互作用, 从而分流二极管的光电流, 限制带宽。

2.3.2 运放的带宽限制

光电转换单元同样采用 ADA4627-1 作为运放, 下面单独分析运放的带宽限制, 光电二极管等效负载电路模型如图 10 所示。

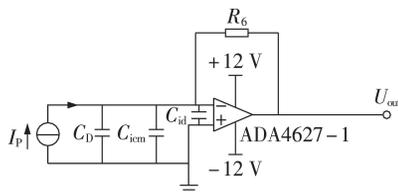


图 10 光电二极管等效负载

Fig.10 Equivalent load of photodiode

图中, 运放的共模输入电容和差分输入电容分别等效为 C_{icm} 和 C_{id} ; 运放与电阻 R_6 组成“电流-电压”转换器, 光电管等效负载 R' 和电容的拐点频率决定了该转换器的带宽。运放两输入端电压为 U_{out}/A_{OL} , A_{OL} 为运放的开环增益, 电流流过 R_6 产生的电压为 $I_6 R_6$, 负载 R' 的端电压为 $U_{out}/A_{OL} = I_6 R_6/A_{OL}$, 可得 $R' = R_6/A_{OL}$ 。该电路的截止频率为:

$$f_p = \frac{A_{OL}}{2\pi R_6 C_i} \quad (7)$$

其中, $C_i = C_D + C_{icm} + C_{id}$ 。

由于该“电流-电压”转换器和基本的光电二极管将光电二极管和信号电压隔离开, 其截止频率是非隔离电路的截止频率 $1/(2\pi R_6 C_i)$ 的 A_{OL} 倍。

2.3.3 寄生电容的频率限制

较大的寄生电容也能成为限制带宽的决定因素, 并且反馈电阻越大其旁路作用越明显。以图 11 为例, 寄生电容 C_f 和反馈电阻 R_6 的共同作用使得其截止频率为 $1/(2\pi R_6 C_f)$, 且反馈电阻 R_6 不宜过大, 否则寄生电容会引起增益滚降。

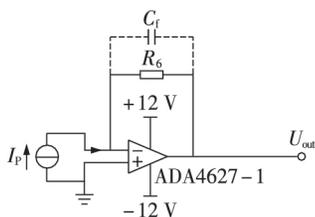


图 11 寄生电容对反馈电阻的旁路作用

Fig.11 Bypassing of parasitic capacitance on feedback resistor

2.3.4 相位补偿的频率限制

对于负载 $R' = R_6/A_{OL}$, 开环增益 A_{OL} 随频率增大而减小, 容易造成电路 L-C 谐振, 为此需要通过反馈电容 C_2 进行相位补偿, 如图 12 所示。

在光电转换电路中, 寄生电容作为自补偿的一

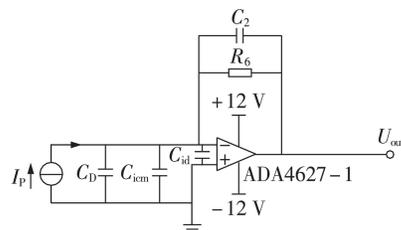


图 12 带相位补偿的等效电路

Fig.12 Equivalent circuit with phase compensation

部分, 可以和补偿电容合并分析, 由于运放的频带足够宽, 因此光电管的结电容和补偿电容成为限制频带的决定性因素。因为运放的固有特性, 其存在的增益误差 U_{out}/A_{OL} 也被放大输出, 计算时从理想输出中减去。

根据图 12 得到输出信号 U_{out} 与输入信号 I_p 的传递函数为:

$$H_3 = \frac{U_{out}(s)}{I_p(s)} = \frac{\eta_3 k_1 R_6}{s [R_6 (C_i + C_2)/A_{OL} + R_6 C_2] + 1 + 1/A_{OL}} \quad (8)$$

其中, $C_i \approx 45$ pF; $C_2 = 35$ pF; $R_6 = 10$ k Ω ; η_3, k_1 分别为光电管耦合效率和光电转换效率, 两者的乘积为 0.09。

图 13 为光电转换单元的波特图。由图可知, 光电转换电路的带宽可以达到 500 kHz, 并且频率大于 1 MHz 后, 增益呈 -19 dB/dec (dec 表示 10 倍频) 的趋势下降; 当频率为 500 kHz 时, 相位滞后 45°。

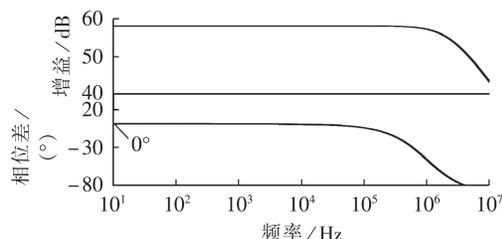


图 13 光电转换单元波特图

Fig.13 Bode plot of photoelectric conversion unit

3 系统的整体传变特性测试

根据上文中系统各部分的传递函数可得 ECT 光路系统的整体传递函数 H 为:

$$H = H_1 H_2 H_3 \quad (9)$$

测试时使用长度为 10 m 的塑料光纤, 利用信号发生器产生不同频率的信号作为光电转换单元的输入, 频率特性测试平台见附录图 A1。

3.1 稳态信号传变测试

以传变工频信号、5 次谐波信号、2 kHz 正弦信号和 500 kHz 正弦信号为例, 测量正常工作状态下的稳态信号, 仿真和实测结果如图 14—17 所示。

观察图 14—17 可知, 系统对工频信号的传变几乎没有延时, 随着信号频率的增大, 信号的滞后现象

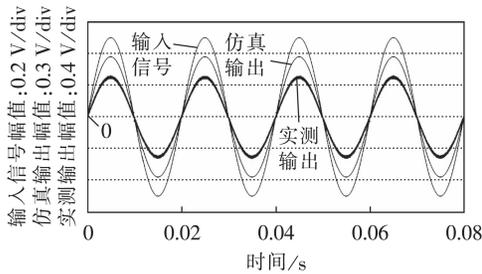


图14 工频信号的响应波形

Fig.14 Response waveforms of power frequency signal

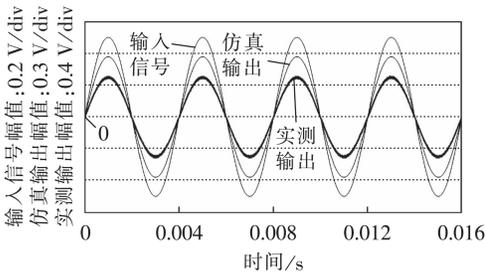


图15 5次谐波信号的响应波形

Fig.15 Response waveforms of 5th harmonic signal

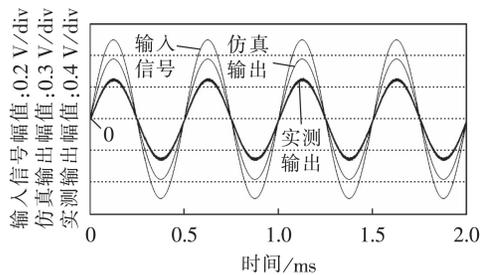


图16 2 kHz正弦信号的响应波形

Fig.16 Response waveforms of 2 kHz sinusoidal signal

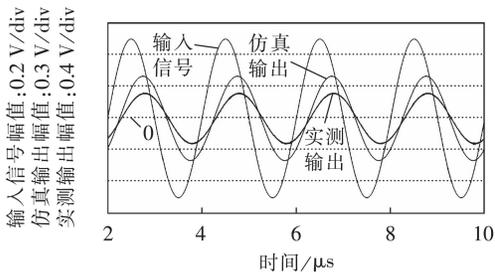


图17 500 kHz正弦信号的响应波形

Fig.17 Response waveforms of 500 kHz sinusoidal signal

开始显现,在传变500 kHz正弦信号时相位有了明显的滞后。仿真结果和实测结果相吻合,且都能准确反映出输入信号波形。

3.2 暂态信号传变测试

电力系统中的暂态信号种类繁多,如局部放电波、振荡波、行波以及各类谐波叠加的波形,相比稳态信号,暂态信号波形复杂、频带范围宽且具有破坏性,因此对暂态信号的传变性能更能够体现模拟光电式ECT的优势。输入包含工频电压信号、5次谐波和7次谐波的混合信号对模拟光电式ECT的暂态

波形传变性能进行测试,结果如图18所示。

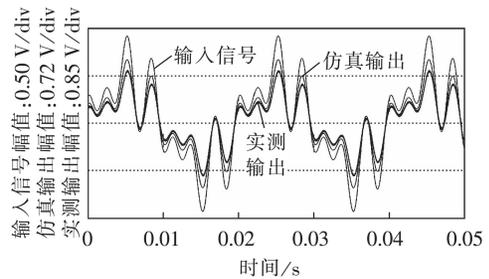


图18 多种谐波叠加信号的响应波形

Fig.18 Response waveforms of multiple harmonic superimposed signals

由图18可知,在输入信号包含多次谐波的情况下,仿真结果与实测结果相符,且能准确反映出输入信号波形。

另外,行波信号作为暂态信号的一种,包含了许多高频成分,其最重要的波头频率成分大约为500 kHz~2 MHz。对于行波应用而言,信号的上升时间是衡量该类互感器性能的最重要的考量内容^[16-17]。由于频率为1.4 MHz的方波其主要频率成分为1 MHz,因此使用该方波信号代替行波信号进行测试。

对方波信号的响应情况如图19所示,由图可见,系统对该方波信号的上升时间小于1 μs。

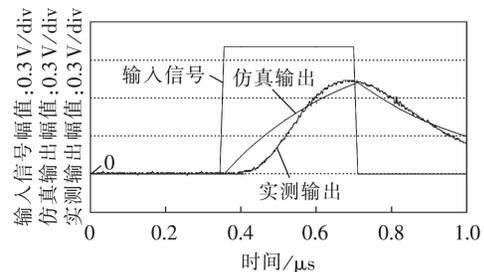


图19 方波信号的响应波形

Fig.19 Response waveforms of square wave signal

3.3 光路系统的整体传变特性分析

使用信号发生器产生频率为50~500 kHz、 $V_{p-p}=1$ V的信号,同时为各信号添加2.5 V的直流偏置作为光路系统的输入,对整个光路系统的传变特性进行测试。

图20为各频率信号通过光路系统时仿真与实测的频率特性图。由图可见,当信号频率小于100 kHz时,仿真结果与实测结果高度吻合;频率在100~500 kHz范围内时,仿真结果与实测结果略有偏差。

模拟光电式ECT最终要根据输出信号进行傅里叶变换提取出其中的直流分量和交流分量,表1统计了不同频率下交流分量的幅值、相位及误差。幅值误差和相位误差均为信号送入传递函数的理论输出值和实测值之间的误差。不同应用场景下国家标准对电子式互感器的精度要求见附录中的表A1。

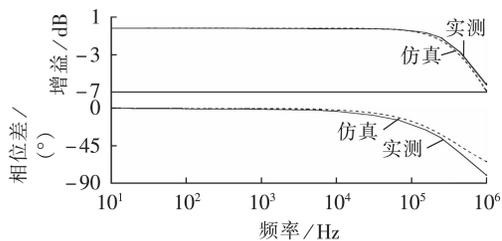


图 20 仿真及实测结果波特图

Fig.20 Bode plot of simulative and measured results

表 1 实测数据及误差

Table 1 Measured data and error

频率/Hz	幅值/mV	幅值误差/%	相位/(°)	相位误差/(°)
50	384	±0.27	-0.18	±0.14
250	384	±0.27	-0.25	±0.17
650	384	±0.27	-0.85	±0.74
1600	385	±0.54	-1.10	±0.76
2000	382	±0.24	-1.21	±0.77
10 ⁵	378	±0.75	-13.87	±2.27
2×10 ⁵	361	±1.85	-28.44	±6.24
5×10 ⁵	274	±3.28	-54.47	±8.77

由表 1 可知,该光电系统对工频信号可满足测量应用;对 0.5 级功率测量所用谐波的测量误差满足幅值误差小于 20%、相位误差小于 20°的要求;对品质测量、常规继电保护和宽频带保护所用谐波的测量误差也都满足国标要求。

3.4 挂网运行

目前模拟光电式电流互感器已试用于小电流接地故障选线,制作的悬挂式样机及 10 kV 线路挂网运行现场见附录中的图 A2。图 21 为线路发生单相金属性接地故障前后信号采集终端采集到的波形,其中 U_A 、 U_B 、 U_C 和 U_0 分别为传统电磁式电压互感器测得的三相电压及零序电压波形; I_{01} 、 I_{02} 为故障两端根据样机测得的三相电流而合成的零序电流波形,依据该零序电流进行小电流接地故障选线具有较高的成功率,验证了该类互感器的工程应用价值。

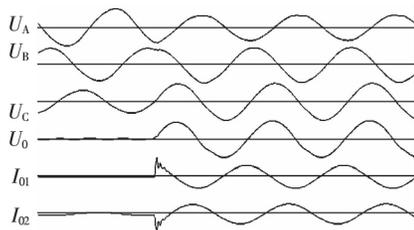


图 21 挂网现场实测信号

Fig.21 Signals of hanging network operation

4 结论

本文对模拟光电式 ECT 光路的各组成单元分别进行了建模,分析影响频带的各项因素,且推导了各部分的传递函数,通过对光路系统的实际频率特性测试验证了模型的正确性。试验结果表明:模拟光

电式 ECT 具有较宽的传输频带,对稳态信号、暂态信号均能有效传变。既能实现工频信号的高精度传变,对高频信号也有着较强的传变能力,也可实现行波信号的测量,表明了模拟光电式 ECT 未来在电力系统测量领域将具有广阔的应用前景。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱梦梦,罗强,曹敏,等. 电子式电流互感器传变特性测试与分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):143-156.
ZHU Mengmeng, LUO Qiang, CAO Min, et al. Test and analysis of transfer characteristics of electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 143-156.
- [2] 戴魏,郑玉平,白亮亮,等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(19):46-54.
DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis of protective current transformer transient response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [3] 胡伟曦,谭建成. 电子式互感器原理及关键技术综述[J]. 电气开关,2018,56(3):7-12.
HU Weixi, TAN Jiancheng. Review on the principle and key technology of electronic transformers[J]. Electric Switchgear, 2018, 56(3): 7-12.
- [4] 徐波,张志. 电子式互感器数字输出校验技术[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):147-150.
XU Bo, ZHANG Zhi. Calibration technology for electronic transformers with digital output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 147-150.
- [5] 张杰恺,李辉,邓吉利,等. 基于数字积分算法的电子式电流互感器传变特性[J]. 电测与仪表,2017,54(2):61-67.
ZHANG Jiekai, LI Hui, DENG Jili, et al. Transfer characteristics of electronic current transducer based on integration algorithms[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(2): 61-67.
- [6] 姚东晓,吕利娟,倪传坤,等. 应用于空心线圈电子式互感器的双环数字积分器设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(6):96-100.
YAO Dongxiao, LÜ Lijuan, NI Chuankun, et al. Dual loop digital integrator design for Rogowski coil electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 96-100.
- [7] CROTTI G, GALLO D, GIORDANO D, et al. Medium voltage divider coupled with an analog optical transmission system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(10): 2349-2357.
- [8] 王玮,徐丙垠,王华广,等. 基于光强调制原理的电流互感器设计方法[J]. 高压电器,2016,52(7):61-67.
WANG Wei, XU Bingyin, WANG Huaguang, et al. Design method of current transformer based on modulation of light intensity principle[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 61-67.
- [9] 王玮,徐丙垠,吕攀,等. 一种用于电子式电流互感器的信号处理方法[J]. 科学技术与工程,2016,16(25):105-110.
WANG Wei, XU Bingyin, LÜ Pan, et al. A signal processing method for electronic current transformer[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(25): 105-110.
- [10] 张弛,康小宁,郑永康,等. 罗氏线圈电流互感器的暂态传变特性[J]. 高电压技术,2018,44(12):4105-4112.
ZHANG Chi, KANG Xiaoning, ZHENG Yongkang, et al. Transient characteristics of Rogowski coil based current transfor-

- mers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 4105-4112.
- [11] 刘志恒, 段雄英, 廖敏夫, 等. 罗氏线圈电子式电流互感器积分特性研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 191-196.
LIU Zhiheng, DUAN Xiongying, LIAO Minfu, et al. Research on integral characteristic of ECT with Rogowski coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 191-196.
- [12] 金涌涛, 刘会金, 熊玲玲. Rogowski线圈频率特性分析及拓宽频带方法[J]. 电测与仪表, 2003, 40(9): 12-15, 38.
JIN Yongtao, LIU Huijin, XIONG Lingling. Analysis is on the frequency characteristics of Rogowski coil and also means to broaden the bandwidth of frequency response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, 40(9): 12-15, 38.
- [13] 李伟, 尹项根, 陈德树, 等. 基于Rogowski线圈的电子式电流互感器暂态特性研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 34-37.
LI Wei, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Transient characteristics of Rogowski coil-based current sensor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 34-37.
- [14] LEE J H, OTANI T. Small signal transfer function of periodically dispersion-compensated optical link for intensity modulated signals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(10): 1369-1378.
- [15] MRABET H, DAYOUB I, ATTIA R. Influence of wavelength and launching condition on frequency response of optical silica fibers[C]//2008 2nd ICTON Mediterranean Winter. Marrakech, Morocco: IEEE, 2008: 1-6.
- [16] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.
XU Bingyin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern fault location techniques based on fault generated travelling waves and their applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [17] 冯腾, 董新洲. 双端行波故障测距装置性能测试方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 114-120, 128.
FENG Teng, DONG Xinzhou. Performance test method of two-terminal traveling wave fault locator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 114-120, 128.

作者简介:



张鹏

张鹏(1994—),男,山东滕州人,硕士研究生,主要研究方向为配电自动化、电气测量(E-mail: zpsdut@163.com);

王伟(1983—),男,山东淄博人,副教授,通信作者,主要研究方向为电气测量、配电自动化及嵌入式系统设计(E-mail: wwsdut@163.com);

徐丙垠(1961—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统故障检测、配电网自动化、智能电网(E-mail: xuby@vip.163.com);

贾明娜(1968—),女,山东牟平人,高级工程师,主要从事电力系统传感及监控、配电自动化工作(E-mail: jiamn@kehui.cn);

张圣鹏(1993—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为配电网自动化、电气测量(E-mail: zsploveslife@163.com);

孙中玉(1996—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为配电网故障测距(E-mail: sun_zy2019@163.com);

王鹏玮(1996—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为电力线路故障监测(E-mail: wpwsdut@163.com)。

(编辑 任思思)

Analysis of frequency characteristics of analog photoelectric current transformer

ZHANG Peng¹, WANG Wei¹, XU Bingyin¹, JIA Mingna², ZHANG Shengpeng¹,
SUN Zhongyu¹, WANG Pengwei¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

Abstract: Based on the composition and implementation principle of the analog photoelectric current transformer, the influence of key device parameters on transmission bandwidth of analog photoelectric current transformer is studied, and the components of the system are respectively modeled, by which the transfer function of the system optical path are obtained, and its amplitude-frequency and phase-frequency characteristics are analyzed. The simulative results of steady state and transient signal transmission and the measured results verify the correctness of the modeling. Experiments show that the cut-off frequency band of the analog photoelectric current transformer can reach 500 kHz. Even for high frequency signal of 1 MHz, it has a rising response time of less than 1 μ s. The transformer's good transfer characteristics to steady state and transient signals make it have broad application prospects in the field of electrical measurement.

Key words: electric current transformer; analog photoelectric current transformer; frequency characteristics; wide frequency band; traveling wave measurement

附录

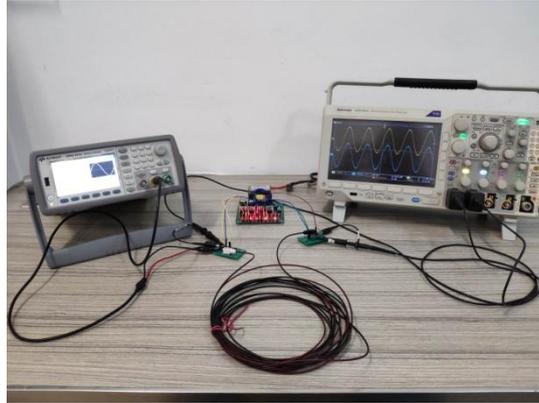


图 A1 数据实测图

Fig. A1 Picture of actual measurement of data



图 A2 实物样机及挂网运行现场

Fig. A2 Prototype and hanging network operation site

表 A1 不同应用场景下的误差要求

Table A1 Error requirements in different application scenarios

应用场景	谐波测量频率上限/Hz	±幅值误差上限/%	相位误差上限/(°)
常规继电保护	250	10	10
0.5级功率计量	650	20	20
品质测量	2500	5	5
宽频带保护	50000	10	