

全光纤电流互感器 PID 控制算法研究

张猛¹ 李军¹ 王新刚¹ 魏建巍² 张敬涛² 王仕韬³

(1. 山东电力设备有限公司 济南 250022; 2. 平高集团有限公司 平顶山 467001; 3. 国网技术学院 济南 250002)

摘要: 全光纤电流互感器(FOCT)克服了传统电磁式电流互感器在暂态响应方面的弱点,优化动态特性有助于提高全光纤电流互感器保护动作的快速性。全光纤电流互感器的检测电路的带宽限制了系统的闭环带宽。对于采用数字闭环方案的全光纤电流互感器,其带宽限制主要由闭环数字控制算法决定。通过理论分析、仿真及实验验证,表明在闭环控制算法中引入PID控制算法,有效提高了闭环带宽,为全光纤电流互感器在智能电网保护中的推广应用具有重要的意义。

关键词: 全光纤电流互感器;闭环控制;动态特性;PID控制

中图分类号: TM452; TN256 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Theory on PID controller of fiber optic current transformer

Zhang Meng¹ Li Jun¹ Wang Xingang¹ Wei Jianwei² Zhang Jingtao² Wang Shitao³

(1. Shandong Power Equipment Co. Ltd., Jinan 250022, China; 2. PingGao Group Co. Ltd., Pingdingshan 467001, China; 3. State Grid of China Technology College, Jinan 250002, China)

Abstract: Fiber-optic current transformer (FOCT) can overcome the disadvantage of traditional electromagnetic current transformer in transient current response, sensitivity and reliability of protective action can be remarkably improved by optimization of dynamic characteristics. The closed-loop control algorithm is a main limitation to the detection bandwidth of the FOCT based on the closed-loop signal-detecting scheme. The theory analysis and experiment show that the bandwidth of closed-loop FOCT is greatly improved by introducing the PID control algorithm. It is of great significance for the promotion and application of fiber current transformer in smart grid protection.

Keywords: fiber optic current transformer; closed-loop; dynamic performance; PID controller arithmetic

0 引言

全光纤电流互感器相对传统的电磁式互感器具有绝缘性好、抗电磁干扰能力强、动态范围大、频带宽等优点^[1-2],克服了电磁式电流互感器在暂态响应方面的弱点,满足了现代电力系统对电流值实时精确测量的需求^[3-4]。提高全光纤电流互感器的闭环带宽可以有效的改善全光纤电流互感器的动态性能,满足电力系统对互感器的快速性要求。全光纤电流互感器光路带宽理论上可以达到几百 kHz,远大于检测电路的带宽。在全数字闭环光纤电流互感器中,闭环算法的数字控制器直接影响着动态性能指标。

1 PID 控制算法

PID 控制算法的传递函数:

$$D(z) = \frac{U(z)}{X(z)} = K_p + K_i \frac{1}{(1-z^{-1})} + K_d(1-z^{-1}) \quad (1)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分和微分环节的控制系数。

根据 PID 的控制原理^[5]如图 1 所示。

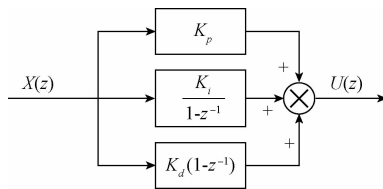


图 1 PID 控制算法的原理

数字控制器的输出与输入由 3 部分组成^[6],其中包括比例环节、积分环节和微分环节。其中,比例环节可及时反映系统的计算结果与实际的偏差,控制器可根据偏差大小对偏差立即产生调节作用,以减少偏差。积分环节主要作用是消除偏差,保证测量结果的准确性。微分环节能够在偏差变大之前根据变化趋势提前引入修正值,提高系统的

快速性。所以微分控制可有效的提高系统的动态性能。

2 动态特性分析和优化

2.1 工作原理

全光纤电流互感器的传感机制是基于光纤的法拉第磁光效应^[7],其原理结构如图 2 所示。

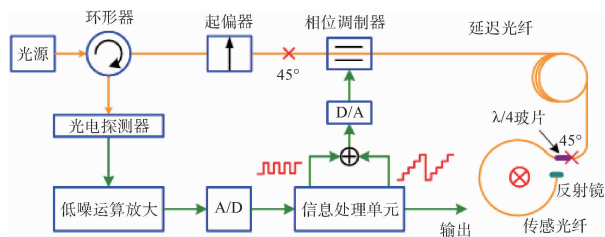


图 2 全光纤电流互感器的结构

SLD 发出的光经过环形器耦合后由起偏器变为线偏振光,沿着起偏器的尾纤就以 45° 注入保偏光纤后,变为分别沿光纤的 X 轴和 Y 轴传输的两束光^[8]。两束线偏振光经过相位调制器后通过 λ/4 波片转化为圆偏振光,最终进入传感光纤。光传输到传感光纤的末端时,末端的反射镜将两束光进行全反射,反射后的光沿着环形器进入光电探测器。其中,光在相位调制器出通过方波调制的阶梯波反馈收到相位调制。

光电探测器探测到的光强表达式为^[9]:

$$P = \frac{1}{2} \alpha P_0 (1 + \cos 4VNI) \quad (2)$$

式中: P_0 是 SLD 发出光的功率, α 是光损耗, N 是传感光纤的圈数, V 是传感光纤的 Verdet 常数, I 是被测电流的大小。

从式(2)中可看出,干涉光强与被测电流的函数为余弦关系,通过相位调制器的方波调制后干涉光强信号变为正弦函数^[10]:

$$P = \frac{1}{2} \alpha P_0 [1 + \cos(\Phi_B + 4F)] =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \alpha P_0 (1 + \sin 4VNI) \\ \frac{1}{2} \alpha P_0 (1 - \sin 4VNI) \end{cases} \quad (3)$$

通过解调方波信号的幅值得到电流大小,前半周期减去后半周期的解调信号可得^[10]:

$$\Delta P = \alpha P_0 \sin 4VNI \quad (4)$$

数字阶梯波通过 D/A 转换后施加到直波导相位调制器上,实现闭环反馈技术,阶梯波的高度 Φ_F 正比于数字解调结果,与 Faraday 磁光效应的相位大小相等、方向相反。当 $\Delta P = \alpha P_0 \sin((\Phi_F + 4VNI)) = 0$ 时,可得

$$\Phi_F = -4VNI \quad (5)$$

采用微弱信号处理的锁相放大技术解调被测电流的大小,最后输出解调的结果。数字闭环反馈技术将余弦函数转换为线性函数,线性度得到显著提升^[11]。

2.2 动态模型和仿真

采用积分控制算法时,数字闭环光纤电流互感器的干涉输出为法拉第磁光效应的相移减去闭环反馈的相移。干涉输出的正弦信号,经过方波调制后变为频率相同的方波信号,通过方波的正负半周期取差值得到数字解调结果,解调的结果在数据寄存器中进行累加积分,积分的结果在输出的同时,经过 D/A 转换后把积分的结果施加到相位调制器,实现了系统的闭环反馈,通过阶梯波信号的闭环反馈将误差信号再反馈到光路系统中,如此循环反馈使得偏差保持在极小的范围内变动(近似为 0)。全光纤电流互感器原理如图 3 所示。

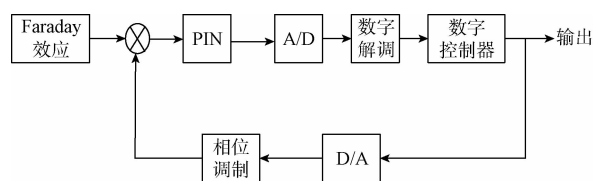


图 3 全光纤电流互感器原理

积分控制可以消除互感器的稳态误差。但在渡越时间内的解调过程等将导致动态特性变差^[12]。故在系统采用积分算法的同时,加入微分算法和比例算法,使得数字控制器由积分控制变为比例-积分-微分(PID)控制,理论上可优化光纤电流互感器的快速反应能力。

从原理上分析,全数字闭环全光纤电流互感器为线性离散系统^[13],建立全光纤电流互感器的数学模型如图 4 所示。

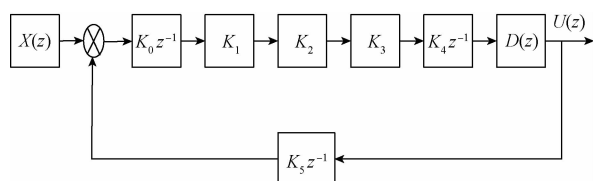


图 4 全光纤电流互感器动态模型

则闭环系统数字模型为:

$$G(Z) = \frac{U(z)}{X(z)} = \frac{K_0 K_1 K_2 K_3 K_4 z \cdot D(z)}{z^3 + K_0 K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 D(z)} \quad (6)$$

在实际系统中,光源功率为 1 200 μ W,光路损耗 20 dB,PIN 的量子转换效率为 0.9,跨阻抗为 200 k Ω 。数字模型中的各个系数为:

$$K_0 = 1\ 200 \times 10^{-6} \times 10^{-2}$$

$$K_1 = 0.9 \times 200 \times 10^3$$

$$K_2 = 5$$

$$K_3 = 2^{12}/5$$

$$K_4 = 5$$

$$K_5 = 2\pi/2^{16}$$

当数字控制器只有积分环节时:

$$D(z) = \frac{0.0323}{1 - z^{-1}} \quad (7)$$

全光纤电流互感器数字控制器为 PID 环节时:

$$D(z) = 0.125 + \frac{0.058}{1 - z^{-1}} + 0.135(1 - z^{-1}) \quad (8)$$

全光纤电流互感器的数字模型进行仿真,结果如图 5 所示。

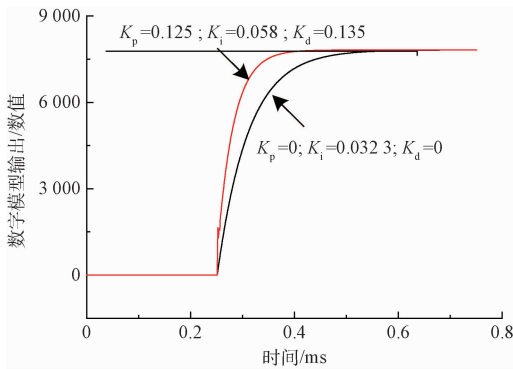


图 5 全光纤电流互感器数字模型的阶跃响应仿真

由仿真结果得出,采用积分算法的响应时间较长;采用 PID 算法后,系统的阶跃响应速度更快。

3 实验研究

以上通过理论和仿真得到采用 PID 控制算法对动态性能提高的有效性。下面通过实验研究来验证其分析和仿真结果。实验主要通过全光纤电流互感器的闭环检测带宽测试进行验证。

根据全光纤电流互感器的工作原理可知, Faraday 效应输出信号频率与输入信号频率一致^[14],因此利用锁相放大相关算法计算得到幅值和相位,其中被测电流信号和全光纤电流互感器的输出信号分别作为锁相放大器的参考通道和测量通道。通过被测电流信号的频率由低频到高频的扫频,利用锁相放大器测得全光纤电流互感器的输出信号的幅值、相位,从而绘制出幅频特性和相频特性曲线。

当控制算法采用积分时,得到全光纤电流互感器进行频率特性测试如图 6 所示。

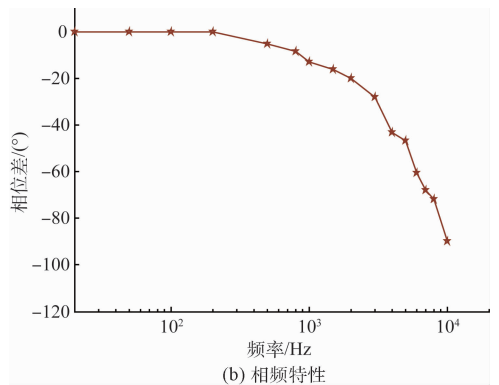
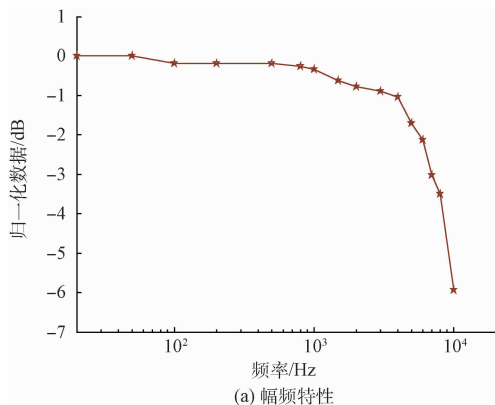


图 6 数字控制器为积分环节的幅频、相频特性曲线

由频率特性曲线得出,控制器为积分环节时全光纤电流互感器的一 3 dB 带宽约为 7 kHz。

将全光纤电流互感器的数字控制器改为 PID 算法,得到测试其频率特性如图 7 所示。

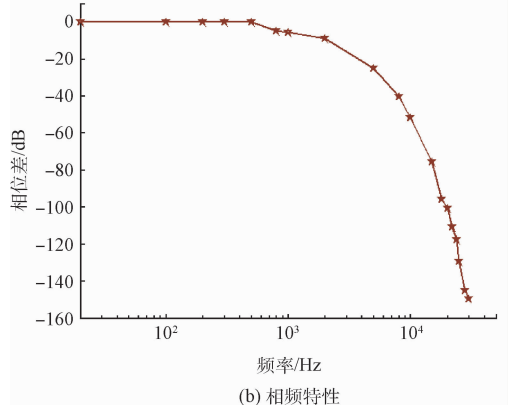
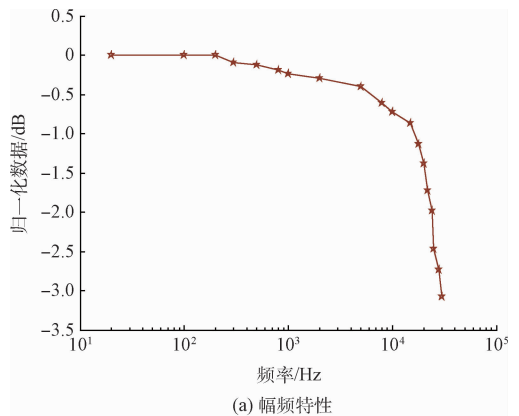


图 7 数字控制器为 PID 的幅频、相频特性

由频率特性曲线可以看出,全光纤电流互感器的闭环检测带宽为 18 kHz。

实验结果表明,采用 PID 控制算法后,全光纤电流互感器的带宽得到明显提高。

4 结 论

基于全光纤电流互感器的工作原理,建立了离散数学模型,在积分和 PID 控制算法下,对全光纤电流互感器理论分析和仿真。实验测试了数字控制器分别采用积分和 PID 算法时互感器的-3 dB 带宽,结果表明数字 PID 控制算法可有效地提高了全光纤电流互感器的闭环带宽,改善了全光纤电流互感器的动态特性,满足了电力系统的快速性要求,增强了全光纤电流互感器的工程应用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王红星,张国庆,郭志忠,等. 电子式互感器及其在数字化变电站的应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 31(7): 94-98.
- [3] BOHNERT K, GABUS P, NEHRING J. Fiber-optic current sensor for electro winning of metals [J]. Journal of Light Wave Technology, 2007, 25(11): 3602-3609.
- [4] BOHNERT K, KOSTOVIC J, PEQUIGNOT P. Fiber optic voltage sensor for 420 kV electric power systems[J]. Optical Engineering, 2000, 39(11): 3060-3067.
- [5] 王天永, 张志海. 浅谈自动控制中的 PID[J]. 纯碱工业, 2010(1): 44-46.
- [6] 王夏霄,张猛,邬战军,等. 光纤陀螺中 PID 控制理论

与试验研究[J]. 电子测量技术. 2012, 35(11): 32-35.

- [7] 钟远聪,周杰,陈书汉. 基于法拉第磁光效应的电流方向测量研究[J]. 光学技术. 2016, 42(1): 78-80.
- [8] 李传生,张春熹,王夏霄. 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.
- [9] 于佳,张春熹,王夏霄,等. 环路增益对光纤电流互感器测量准确度的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 1-8.
- [10] 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办法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 42-46.
- [11] 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.
- [12] 王立辉,杨志新,殷明慧,等. 数字闭环光纤电流互感器动态性能仿真与测试[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1890-1895.
- [13] 王夏霄,王野,王熙辰,等. 全光纤电流互感器动态模型实验研究[J]. 电力系统保护与控制 2014, 42(3): 9-14.
- [14] 王夏霄,张猛,李传生,等. 基于 Faraday 效应的光纤陀螺频率特性评估方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 5(3): 156-160.

作者简介

李军, 1988 年出生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事一次设备智能化研究和光纤传感技术研究工作。

E-mail: 574084502@qq.com