

正交双路光纤电流互感器的信号处理方法

苏 涛¹ 奚 玮^{2,3}

(1 西安电子科技大学电子工程研究所, 西安 710071)

(2 西北工业大学电子信息学院, 西安 710068)

(3 西安导航技术研究所八室, 西安 710068)

摘 要 利用正交双路光纤传输光电流信号的处理方法, 满足了光纤电流互感器在电力系统暂态保护应用中的实时处理要求. 此方法可从正交双路光信号中直接提取两路电流信息, 减小了光路传输不理想对电流测量值的影响. 结合模数变换过采样技术和先进的数字信号处理技术, 提高了系统对暂态故障的响应速度, 改进了检测性能. 实验表明, 此方法在暂态信号的采集和实时处理方面, 比现有方法的延迟小且精度高.

关键词 光纤电流互感器; 正交双路; 暂态保护; 过采样; 实时信号处理

中图分类号 TM452 **文献标识码** A

0 引言

互感器是电力系统中主要的保护和监控设备之一. 随着电力系统向高电压、大容量发展, 传统的电磁式电流互感器暴露出越来越多的问题^[2~5]: 易饱和, 对高频信号特别是线路上的暂态信号响应性较差; 绝缘结构复杂, 尺寸大, 造价高, 设备安装检修不方便; 存在潜在危险; 另外, 随着数字技术在电力系统中的广泛应用, 为了使传统的互感器和数字设备接口, 需要在两者之间加上电流变换器. 光电子和光纤通讯技术的发展, 推动了新型光纤电流互感器(Optical Current Transformer, OCT)的研究与应用. 和传统的电流互感器相比, OCT 有如下优点: 无磁饱和现象; 测量带宽和精度高; 尺寸小, 绝缘结构简单, 安全可靠; 使用光纤传输信号, 可有效防止电磁干扰; 其输出可以方便地与计算机接口.

光纤电流互感器主要分为以下 2 类: 1) 磁光式

光电电流互感器(MOCT), 也称为无源型 OCT. 2) 混合式光电电流互感器(HOCT), 也称为有源型 OCT. 由于光纤的主要成分是二氧化硅, 它具有耐高压等特性, 将光纤用于信号的传输, 使得电流互感器无论从重量上还是从体积上都有很大的改善. MOCT 结构简单, 但现有信号处理方法的延迟较大, 且易受光路信号波动的影响^[1]. 本文针对现有 MOCT 存在的问题, 采用新的光纤信号产生和处理方法, 提高其在电力系统暂态信号处理中的性能.

1 MOCT 的原理

MOCT 的工作原理是法拉第磁光效应^[2]. 当一束线偏振光通过置于磁场中的磁光材料时, 线偏振光的偏振面就会线性地随着平行于光线方向的磁场大小发生旋转. 通过测量载流导体周围线性偏振光偏振面的旋转角度, 就可间接地测量出导体中的电流值. 如图 1, θ 为线偏振光偏振面的旋转角度,

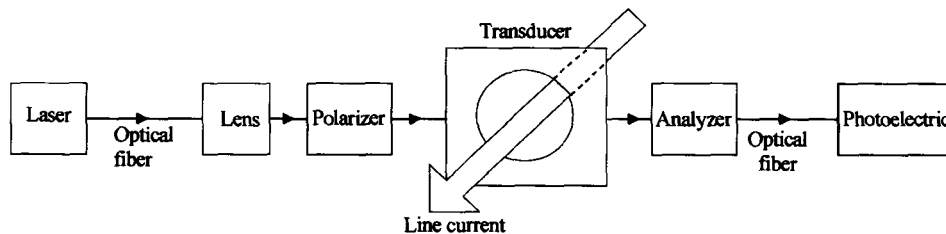


图 1 法拉第磁光效应原理图
Fig. 1 Principle of Faraday magnetic optical effect

H 为光路上的磁场强度, 磁光效应可表示为

$$\theta = V \int_L \bar{H} d \bar{L} \quad (1)$$

式中 V 是磁光材料的 Verdet 常数; L 是磁光材料中的通光路径. 对闭环式 MOCT, 因光路闭合, 有

$$\theta = V \int \bar{H} d \bar{L} \quad (2)$$

由安培环路定律可得

$$\theta = V \cdot I \quad (3)$$

式中 I 是载流导体中的电流. 测出 θ 就可求出电流 I . 设起偏器的输出光强为 J_i , 起偏器与检偏器的夹角为 φ , 检偏器的输出光强为 J_o , 光路中的光强衰减

系数为 a , 由马吕定律可得如下关系

$$J_o = aJ_i \sin^2(\varphi + \theta) \quad (4)$$

设定 $\varphi = 45^\circ$, 则

$$J_o = aJ_i \sin^2(45^\circ + \theta) = \frac{1}{2} aJ_i (1 + \sin 2\theta) \quad (5)$$

设直流分量 $J_{dc} = \frac{1}{2} aJ_i$, 交流分量 $J_{ac} = \frac{1}{2} aJ_i \cdot \sin 2\theta$, 两值相除, 可消除起偏器输出光强 J_i 和光路光强衰减系数 a 的影响, 得

$$\frac{J_{ac}}{J_{dc}} = \sin 2\theta \quad (6)$$

从而得到角度 θ , 即得出了导线电流.

普通 MOCT 系统(图 2)由 3 部分组成: 光发射部分、光路部分和光接收部分. 其工作原理是: LED 发出的光信号经过光纤传送到高电位的光学传感器中, 在导体被测电流产生的磁场作用下, 使线性偏振光的偏振平面发生偏转, 线性偏振光经过检偏器转换成含有偏转角度信息的光强度信号, 再经过光纤传送到低电位的接收部分, 通过光电转换变为电信

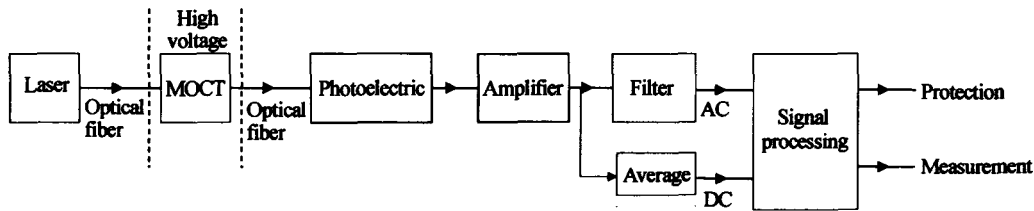


图 2 MOCT 的结构示意图
Fig. 2 Architecture of MOCT

2 正交双路 MOCT 的原理

为了无延迟地从 J_o 得到 θ , 这里提出正交双路 MOCT 的方法. 在图 1 中安装两个光学检偏器, 调整使得两者角度相差 90° , 将得到的两路光学信号同时传输到信号处理模块, 这两条光路并在一起, 光信号的路径几乎一致. 令式(4)中 φ 分别为 45° 和 135° , 相互垂直, 就得到正交的两路信号

$$J_{o1} = a_1 J_i \sin^2(45^\circ + \Delta\varphi_1 + \theta) = \frac{1}{2} a_1 J_i (1 + \sin(2\Delta\varphi_1 + 2\theta)) \quad (7)$$

$$J_{o2} = a_2 J_i \sin^2(135^\circ + \Delta\varphi_2 + \theta) = a_2 J_i \cos^2(45^\circ + \Delta\varphi_2 + \theta) = \frac{1}{2} a_2 J_i (1 - \sin(2\Delta\varphi_2 + 2\theta)) \quad (8)$$

从式(4)可以看出, 当 $\varphi = 45^\circ$ 和 135° 时, 接收到的信号对 θ 最灵敏, 这就是 φ 分别为 45° 和 135° 的主要原因. 而这时, 式(7)、(8)简洁, 信号处理也比较简单. 当 $a_1 = a_2$, $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = 0$ 时, 式(7)、(8)相减后, 再除以两式之和, 就直接得到

$$\frac{J_{o1} - J_{o2}}{J_{o1} + J_{o2}} = \sin 2\theta \quad (9)$$

号, 再把这个电信号进行一定的处理, 得到被测电流. 具体的处理过程是, 光信号经过线性的光电转换后, 再经模拟电路或数字电路处理, 以及幅度和相位校正, 就可输出反映导线电流的输出信号. 因为光电转换是完全线性的, 为了叙述简便, 上述推导中, 仍用 J_o 、 J_{dc} 和 J_{ac} 表示光电转换后得到的电信号. 此方法存在的问题是, 要从 J_o 中分解出 J_{dc} 和 J_{ac} , 必须采用模拟滤波或数字滤波的方法, 用均值法测直流也相当于采用低通滤波器. 无论是模拟滤波器还是数字滤波器, 都存在响应延迟的问题^[6], 滤波器对暂态信号响应实时性较差, 例如 N 阶 FIR 滤波器的群延迟为 $\frac{N}{2}$, 当 N 等于 40, 采样率等于 8 kHz 时, 可以滤除频率大于 200 Hz 的噪声和干扰, 但滤波器群延迟为 2.5 ms, 再加上数字电路的其它延迟, 如输入、预处理、输出, 延迟太大, 延迟了对暂态故障的实时响应. 模拟滤波器电路还存在一致性差、不稳定的缺点.

但因为检偏器角度不可能安装的十分准确, 所以在式(7)、(8)中必然有角度误差 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$, 两路的光强衰减系数也不同^[1]. 两条光路的光强衰减系数虽然不同, 但变化缓慢, 可以实时测定, 并校正为相同值. 这样可以认为 $a_1 = a_2 = a$. 令式(7)、(8)相减后, 再除以两式之和, 得到

$$\frac{J_{o1} - J_{o2}}{J_{o1} + J_{o2}} = \frac{\sin(2\Delta\varphi_1 + 2\theta) - \sin(2\Delta\varphi_2 + 2\theta)}{2 + \sin(2\Delta\varphi_1 + 2\theta) + \sin(2\Delta\varphi_2 + 2\theta)} = \frac{\cos(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \cdot \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + 2\theta)}{1 + \sin(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \cdot \cos(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + 2\theta)} \quad (10)$$

角度误差 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 不能调整为零, 但可以调整的很小, 且在安装完成后可以精确测定. 特别是在连动的两个检偏器上, $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 的变化幅度、方向趋同, 因此 $\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2$ 值很小. 上式可简化为

$$\frac{J_{o1} - J_{o2}}{J_{o1} + J_{o2}} \approx \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + 2\theta) \cdot \cos(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \quad (11)$$

式中除了 θ 外都是已知量, 用反三角函数的泰勒级数展开, 就可得到导线电流 I . 但式(11)的误差较大, 为了准确求得 θ , 必须考虑 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 的影响, 令

$u = \frac{J_{o1} - J_{o2}}{J_{o1} + J_{o2}}$, 对式(10)进行变换后, 解方程得

$$\sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + 2\theta) = \frac{u \cdot \cos(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)}{1 + \sin(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \cdot \sqrt{1 - u^2}} \quad (12)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{u \cdot \cos(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)}{1 + \sin(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \cdot \sqrt{1 - u^2}}\right) - \frac{1}{2}(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) \quad (13)$$

利用反三角函数的 11 阶泰勒级数展开式, 可以准确求得 θ .

在理想情况下, 从式(13)得到的被测导线电流是无误差的. 实际系统中, 由于磁光效应、电光效应的非线性, a_1 、 a_2 、 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 等参数的测量误差, 以及噪声、干扰等因素的影响, 得到的被测导线电流值与实际值存在误差. 通过精心调整光路的各参数以及数字信号处理方法, 可以把误差降低到允许的范围内.

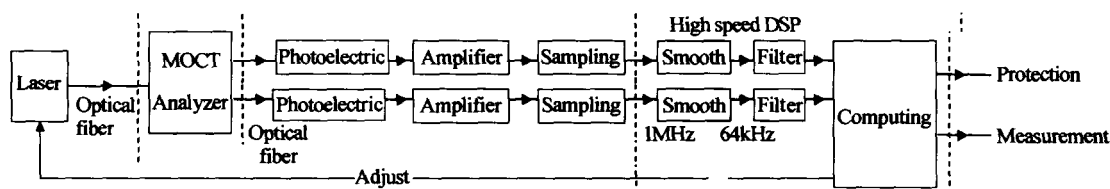


图3 正交双路 MOCT 信号处理系统

Fig. 3 Signal processing system of quadrature paths MOCT

保护输出的实时性满足了要求, 从暂态故障发生到保护输出的延迟小于 4 ms. 用精密校准仪对保护输出的精度进行了测试(表 1). 在被测电流较小时, 因为噪声、角度误差的影响较大, 测量误差较大; 在被测电流达到满量程时, 因为这是系统误差校正点, 所以误差最小; 随着被测电流进一步增大, 系统的非线性因素逐渐显现, 测量误差逐渐变大. 但所有量程档都能满足保护输出精度的要求. 用精密校准仪对计量输出也进行了测试, 精度满足要求.

表 1 暂态保护的实验结果

被测电流量程	10%	20%	50%	100%	150%	200%
测量误差	0.8%	0.3%	0.2%	0.1%	0.3%	0.5%

4 结论

本文采用正交双路 MOCT 测量、监控高压输出电线中的传输电流. 此 MOCT 系统不是用信号滤波的方法来得得到交直流信号, 而是直接用正交双路信号包含的信息进行数字信号处理, 得到偏转角度, 从而测得导线电流值, 对暂态故障的响应速度十分理想, 比现有 MOCT 系统的响应速度大大提高. 经测试, 此方法的保护输出和计量输出的精度均能满足实际应用要求.

3 正交双路 MOCT 的实验结果

图 3 是正交双路 MOCT 的信号处理系统, 采用了新的数字信号处理技术, 包括高速 AD 变换器和高速数字信号处理器(DSP). 为了提高信噪比, 滤除高频噪声的影响, 同时减少数字信号处理的延迟, 采用了过采样技术, 12 位 AD 转换器的采样率为 1 MHz. 数字信号先经过平均滤波器, 在滤除部分噪声的同时, 将采样率降低为 64 kHz, 这一处理相当于把 AD 位数提高到 16 位. 再进一步采用滑窗低通滤波器, 最后由高速 DSP 进行实时处理. DSP 采用高性价比的 TMS320C6713, 每秒执行 2 亿条指令, 峰值运算速度达到每秒 12 亿次浮点运算, 用于进行两路信号的滤波、角度求解、光强系数补偿. 在安装 MOCT 时, 利用校准仪器, 精确测算角度误差, 在系统实时运行过程中, 还定期计算两路光强系数以对两路信号的光强不一致进行补偿.

参考文献

- 王政平, 李庆波, 冯瑞颖, 等. 起偏器参量对光学电流传感器性能的影响. 光子学报, 2003, 32(4): 444~447
Wang Z P, Li Q B, Feng R Y, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 444~447
- 李美英, 王凯. 利用光纤技术测量电流. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 40~42
Li F Y, Wang K. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 40~42
- 易本顺. 光电式互感器的研究和发展及其在电力系统中的应用. 武汉大学学报信息科学版, 2002, 27(1): 57~62
Yi B S. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(1): 57~62
- Yi B S, Chu B C, Liu Y B. Simultaneous temperature and electric current measurement by using different faraday sending elements in an optical current sensor. Proceedings of SPIE, 1999, 3740: 505~508
- Yi B S, Chu B C, Chiang K S. New design of optical electric current sensor for sensitivity improvement. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 2000, 49(2): 418~423
- Sophocles J Orfanidis. Introduction to Signal Processing. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1998. 9: 110~153

Signal Processing of Quadrature Double Paths Optical Current Transformer

Su Tao¹, Xi Wei^{2,3}

1 Institute of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071

2 School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710068

3 The 8th Department of Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an 710068

Received date: 2004-08-30

Abstract An approach to implementing quadrature double paths OCT and the corresponding signal processing method is presented, meeting the real time processing requirement of electric power transient protection. The current signal can recover directly through the double paths while suppressing the effects of ripples in optical paths. By over sampling in data converting and advanced digital signal processing technique, the response delay to transient failure is lowered down and the detecting performance is improved. The experiment proves this method has lower processing delay and higher precision than the conventional one.

Keywords Optical current transducers; Quadrature double path; Transient protection; Over sampling; Real time signal processing

Su Tao was born in 1968, received Ph. D. in 1999. Now he is an associate professor of National Lab for Radar Signal Processing in Xidian University. He focusses on high speed real time signal processing, fast algorithm and parallel processing system designing, and has published 4 books relevant to DSP and ten research papers.