

基于正交双路光纤电流互感器暂态信号处理

苏变玲^{1,2}, 苏 涛², 辛云宏^{1,2}

(1. 渭南师范学院 物理系, 陕西 渭南 714000;

2. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出利用正交双路光纤信号传输的处理方法, 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。论述了磁光式光电电流互感器(MOCT)系统的原理, 其中普通 MOCT 系统通过测量载流导体周围线性偏振光偏振面的旋转角度, 间接测量出导体中的电流值; 正交双路 MOCT 系统不是用信号滤波的方法得到交/直流信号, 而是直接用正交双路信号的信息进行数字信号处理, 得到偏转角度, 从而获得导线电流值。基于 Matlab 的仿真实验说明正交双路 MOCT 系统测量和监控高压输电线中传输电流的方法实时性强、延迟小、精度高。

关键词: 光纤电流互感器; 正交双路; 暂态保护; 实时信号处理; 小波变换

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)02-0021-04

0 引言

电流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^[1-4]。随着数字技术在电力系统中的广泛应用, 光电子和光纤通信技术得到发展, 推动了新型光纤电流互感器 OCT(Optical Current Transducer)的研究与应用。

光纤电流互感器主要分为磁光式光电电流互感器 MOCT(Magnetic OCT)、混合式光电电流互感器(HOCT)2 类。MOCT 结构简单, 但现有信号处理方法的延迟较大, 且易受干扰。这些干扰来自光电检测电路的外部扰动和内部噪声, 外部扰动包括辐射源的随机波动和附加的光调制, 光路传输介质的湍流及背景起伏, 杂散光的入射及检测的电力系统所受到的电磁干扰等。光电检测器件、输入电路和前置放大器等器件固有噪声是光信号检测接收的另一主要扰动源。这些外部扰动和内部噪声及有用信号同时存在、相互混淆, 限制了检测系统分辨率的提高。因此, 在光电检测电路设计中, 必须对干扰信号(暂态信号)进行实时处理, 以提高对来自光电检测电路的外部电力系统中的扰动和内部噪声处理的能力。

1 普通 MOCT 系统的原理

MOCT 的工作原理是法拉第磁光效应^[1]。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的大小发生旋转。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 所示。

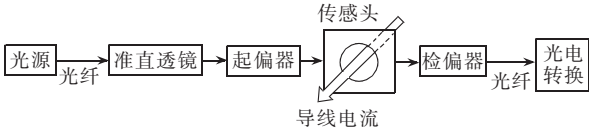


图 1 法拉第磁光效应原理图

Fig.1 Principle of Faraday magnetic optical effect

由安培环路定律可得:

$$\theta = VI \quad (1)$$

式中 θ 为线偏振光偏振面的旋转角度; V 是磁光材料的 Verdet 常数; 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_0 , 光路中的光强衰减系数为 a , 由马吕定律可得如下关系:

$$J_0 = aJ_i \sin^2(\varphi + \theta) \quad (2)$$

设定 $\varphi = 45^\circ$, 则

$$J_0 = aJ_i \sin^2(45^\circ + \theta) = \frac{1}{2} aJ_i (1 + \sin 2\theta) \quad (3)$$

设直流分量 $J_{dc} = aJ_i / 2$, 交流分量 $J_{ac} = aJ_i \sin 2\theta / 2$, 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:

$$J_{ac} / J_{dc} = \sin 2\theta \quad (4)$$

从而得到角度 θ , 即得出了导线电流。

普通 MOCT 系统(见图 2)由光发射、光路和光接收 3 部分组成。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号,再把这个电信号处理后,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_0 、 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_0 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。对于计量而言,这是可行的。但是,对于保护而言,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 $N/2$,当 $N=40$,采样率为 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他延迟,如输入、预处理、输出,则延迟太大,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。

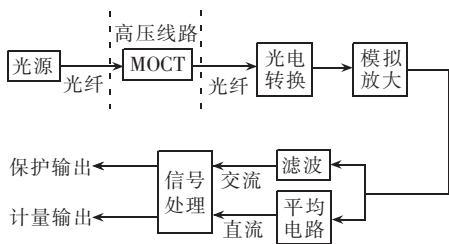


图 2 普通 MOCT 结构示意图

Fig.2 Architecture of common MOCT

2 正交双路 MOCT 系统原理

为了无延迟地从 J_0 得到 θ ,从而无延迟地获得电力系统中电流信号,提出了正交双路 MOCT 方法。在图 1 中安装 2 个光学检偏器,调整使得两者角度相差 90° ,将得到的 2 路光学信号同时传输到信号处理模块,这 2 条光路并在一起,光信号的路径几乎一致。令式(2)中 φ 分别为 45° 和 135° ,相互垂直,就得到正交的双路信号:

$$J_{01} = a_1 J_i \sin^2(45^\circ + \theta) = \frac{1}{2} a_1 J_i (1 + \sin 2\theta) \quad (5)$$

$$J_{02} = a_2 J_i \sin^2(135^\circ + \theta) = a_2 J_i \cos^2(45^\circ + \theta) = \frac{1}{2} a_2 J_i (1 - \sin 2\theta) \quad (6)$$

从式(2)可看出,当 φ 为 45° 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,表达式(5)(6)简洁,信号处理也比较简单。当 $a_1 = a_2$ 时,式(5)(6)相减后,再除以 2 式之和就直接得到:

$$\frac{J_{01} - J_{02}}{J_{01} + J_{02}} = \sin 2\theta \quad (7)$$

但因为检偏器角度不可能安装十分准确,所以在式(5)(6)中必然有角度误差 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$; 2 路的光

强衰减系数也不同^[5],但变化缓慢,可以实时测定,并校正为相同值。则可认为 $a_1 = a_2 = a$,在考虑角度误差时,所得到的正交双路信号为

$$\begin{aligned} J_{01} &= a_1 J_i \sin^2(45^\circ + \Delta\varphi_1 + \theta) = \\ &\frac{1}{2} a_1 J_i [1 + \sin(2\Delta\varphi_1 + 2\theta)] \quad (8) \\ J_{02} &= a_2 J_i \sin^2(135^\circ + \Delta\varphi_2 + \theta) = a_2 J_i \times \\ &\cos^2(45^\circ + \Delta\varphi_2 + \theta) = \frac{1}{2} a_2 J_i \times \\ &[(1 - \sin(2\Delta\varphi_2 + 2\theta))] \quad (9) \end{aligned}$$

令(8)(9)2式相减后,再除以 2 式之和,得到:

$$\begin{aligned} \frac{J_{01} - J_{02}}{J_{01} + J_{02}} &= \frac{\sin(2\Delta\varphi_1 + 2\theta) - \sin(2\Delta\varphi_2 + 2\theta)}{2 + \sin(2\Delta\varphi_1 + 2\theta) + \sin(2\Delta\varphi_2 + 2\theta)} = \\ &\frac{\cos(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + 2\theta)}{1 + \sin(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \cos(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + 2\theta)} \quad (10) \end{aligned}$$

角度误差 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 不能调整为零,但可以调整得很小,且在安装完成后可以精确测定。特别是在连动的 2 个检偏器上, $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 的变化幅度、方向趋同。因此,上式可简化为

$$\frac{J_{01} - J_{02}}{J_{01} + J_{02}} \approx \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + 2\theta) \cos(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \quad (11)$$

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 。

由于式(11)有误差,为了准确求得 θ ,必须考虑 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 的影响,令 $u = (J_{01} - J_{02}) / (J_{01} + J_{02})$,对式(10)变换后,解方程得:

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

利用反三角函数的 11 阶泰勒级数展开式,可以准确求得 θ 。

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{u \cos(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)}{1 + \sin(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \sqrt{1 - u^2}} \right] - \\ &\frac{1}{2} (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) \quad (13) \end{aligned}$$

在理想情况下,从式(1)(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及数字信号处理方法,可以把误差降低到允许的范围内。由于此方法不需采用模拟滤波或数字滤波,因此,对暂态信号具有实时性的响应能力。

3 正交双路 MOCT 系统暂态信号处理

由于正交双路 MOCT 系统所受到的外部扰动(含电力暂态)和内部噪声的影响,所采集到的电流信号实际上是电力暂态信号和噪声信号的叠加。噪声信号的存在使得所测量电力电流信号值存在误

差;电力暂态信号的存在表明电力系统出现了电力故障,因此只有实现对噪声信号的滤除,实现对电力暂态信号的实时检测,才有利于提高电力系统的测量精度,有利于提高电力系统对扰动(电力暂态)的处理能力。

图 3 所示是正交双路 MOCT 信号处理系统实验方案。系统由信号采集、信号处理 2 大部分组成。信号采集是通过正交双路 MOCT 实现的,而信号处理主要通过高速数字信号处理器(DSP)实现的。信号处理部分又包括对提取的暂态电流信号的去噪与故障检测。

3.1 基于小波分解与重构信号去噪^[7]

对任意信号 $x(t) \in L^2(R)$ 可用多分辨率信号分解公式表示为

$$C_{j+1}(k) = \sum_m h_0(m-2k) C_j(m)$$
$$d_{j+1}(k) = \sum_m h_1(m-2k) C_j(m)$$

(14)

式中 $C_j(k)$ 为尺度系数; $d_j(k)$ 为小波系数; h_0, h_1 为一对正交镜像滤波器组; j 为分解系数; N 为离散采样点数。

小波重构过程是分解过程的逆运算,相应的重构公式为

$$x(t) = \sum_k C_j(k) \Phi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(t)$$

(15)

小波的多分辨率分析特性能将信号在不同尺度下作多分辨率分解,并将交织在一起的各种不同频率组成的混合信号分解成不同频段的子信号,因而对信号具有按频带处理的能力。一般,噪声信号多包含在具有较高频率的细节中,从而利用门限阈值等形式对所分解的小波系数处理后,再对信号重构即可达到对信号的消噪目的。

应用小波分解与重构的方法去噪具体步骤是:根据需要,将含有噪声信号在某一尺度下分解到不

同的频带内,然后再将噪声所处的频带作阈值量化,最后通过小波重构达到去噪的目的。

3.2 电力暂态信号的实时检测

电力故障信号一般都属于暂态信号,而暂态信号又属于非平稳的突变信号,因此,对电力故障的实时检测,即为对电力暂态信号的实时检测。由于小波变换的模极大值在多尺度上表现出信号的突变和暂态特征^[8],若小波变换在更小的尺度上不存在局部极大值,则在该邻域内不可能有奇异点,奇异点的存在与每一尺度都具有模极大值有关,一般尺度从大到小,模极大值点汇聚为奇异点,因而可利用多分辨分析对信号进行多尺度分解,小波系数在信号的突变点具有模极大值,通过对模极大值点的检测可确定故障发生的时刻,实现暂态故障的实时检测。

3.3 正交双路 MOCT 信号处理结果

正交双路 MOCT 信号处理系统实验方案图如图 3 所示。其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)。为提高信噪比、滤除高频噪声的影响及减少数字信号处理的迟延采用了过采样技术,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。再采用滑窗低通滤波器,最后由高速 DSP 作实时处理。DSP 采用高性价比的 TMS 320C6713,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 2 路信号的滤波、角度求解、光强系数补偿。保护输出实时性满足了要求,从暂态故障发生到保护输出的迟延小于 10 ms,在 DSP 实验平台 TMS32067DSK 板上得到了验证。图 4 是利用正交双路 MOCT 信号处理系统,对含噪暂态电力骤降信号的去噪与实时检测的基于 Matlab 的仿真结果(n 为采样点数)。

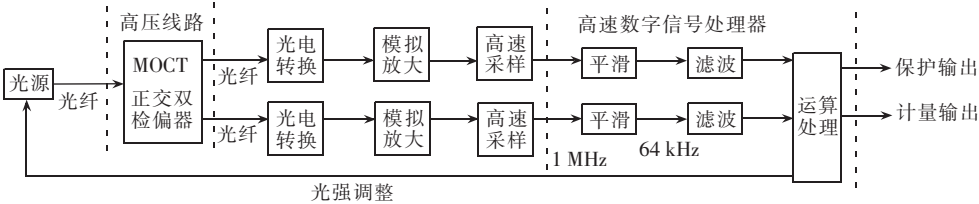


图 3 正交双路 MOCT 信号处理系统实验方案
Fig.3 Signal processing system of quadrature dual-path MOCT

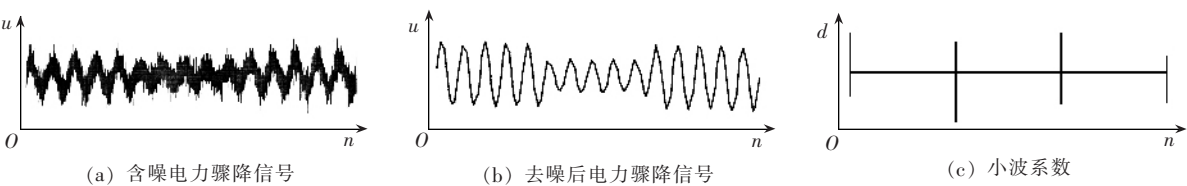


图 4 正交双路 MOCT 系统对电力骤降信号的处理结果
Fig.4 Processing result of electric power sag signal by quadrature dual-path MOCT

4 结语

本文采用正交双路 MOCT 测量、监控高压输电线路中的传输电流。此 MOCT 系统不是用信号滤波的方法得到交/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,因而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,另外由于小波变换具有良好的去噪和实时性能,因此,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,即有精确的计量输出,同时又具有实时检测故障的保护功能。

参考文献:

- [1] 李英英,王凯. 利用光纤技术测量电流[J]. 电力系统自动化,1998,22(15):40-42.
- LI Fu-ying,WANG Kai. Measurement of electrical current with optic fiber technology[J]. **Automation of Electric Power Systems**,1998,22(15):40-42.
- [2] 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[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2002,27(1):57-62.
- YI Ben-shun. Research and development of optical current and voltage transducers for electrical power systems[J]. **Geomatics and Information Science of Wuhan University**,2002,27(1):57-62.
- [3] 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[J]. **Proceedings of SPIE**,1999(3740):505-508.
- [4] YI B S,CHU B C,CHIANG K S. New design of optical electric current sensor for sensitivity improvement[J]. **IEEE Trans. Instrumentation and Measurement**,2000,49(2):418-423.
- [5] 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[J]. 光子学报,2003,32(4):444-447.
- WANG Zheng-ping,LI Qing-bo,FENG Rui-ying,et al. Influences of the polarizer parameters on the performance of an optical current sensor [J]. **ACTA Photonica Sinica**,2003,32(4):444-447.
- [6] ORFANIDIS S J. Introduction to signal processing[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1999.
- [7] ARAVENA J I,CHOWHUURY F N. A new approach of fast fault detection in power systems[C]// **ISAP '96**. USA:[s.n.],1996:328-332.
- [8] 胡铭,陈珩. 基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位[J]. 电网技术,2001,25(3):12-16.
- HU Ming,CHEN Heng. Detection and location of power quality disturbances using wavelet transform modulus maxima[J]. **Power System Technology**,2001,25(3):12-16.
- [9] 徐碧. 小波变换的实时性应用研究[J]. 光电工程,2000,27(2):24-27.
- XU Bi. A study on real time application of wavelet transform[J]. **Opto-electronic Engineering**,2000,27(2):24-27.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

苏变玲(1965-),女,陕西大荔人,讲师,硕士,研究方向为电力暂态信号的处理(E-mail:sbling@wntc.edu.cn);

苏涛(1967-),男,陕西西安人,副教授,博士,研究方向为高速实时信号处理、快速算法、并行处理系统设计等方面;

辛云宏(1967-),男,陕西蒲城人,讲师,博士,研究方向为电路与系统。

Transient signal processing based on quadrature dual-path optical current transducer

SU Bian-ling^{1,2},SU Tao²,XIN Yun-hong^{1,2}

(1. Weinan Teachers College, Weinan 714000, China;

2. Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An approach to producing and processing quadrature dual-path optical signal is presented to meet the real-time processing requirement of electric power transient protection with optical current transducers. The principle of MOCT(Magnetic Optical Current Transducer) is discussed. In common MOCT system, the amperage of a conductor can be indirectly got by measuring the revolvable angle of the linear polarization's optical plane around the carrying current conductor with signal filter. While in quadrature dual-path MOCT system, it is directly got by measuring the revolvable angles with digital signal processing. Simulation with Matlab proves that the latter is of less processing delay and high precision in high-voltage transmission line current measuring and monitoring.

This project is supported by Research Fund of Education Office of Shaanxi Province(04JK310) and Research Fund of Weinan Teachers College(03YKS009).

Key words: optical current transducers; quadrature dual-path; transient protection; real-time signal processing; wavelet transform