

一种混合式光学电流互感器的设计

于文斌¹, 张国庆¹, 李岩松², 郭志忠^{1,3}, 杨以涵²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 华北电力大学电力系, 北京 102206;
3. 北京许继电气有限公司, 北京 100085)

摘要: 介绍了一种混合式光学电流互感器, 它包含两个传感输出通道: 传统采样电流传感通道和块状光学玻璃传感通道。利用采样电流传感器的高精度稳态输出对光学玻璃传感头进行跟踪系数校正, 有效地提高了整个混合式光学电流互感器的稳态精度和暂态精度。本设计使得光学电流互感器的频带宽、无磁饱和等一系列优点得到充分发挥, 同时具有的双输出通道也是对电力系统保护的一种冗余设计, 为目前光学电流互感器的实用化提供了一种全新的思路。

关键词: 电流互感器; 暂态性能; 系数校正; 差动保护

中图分类号: TM452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)04-0067-05

0 引言

随着电力系统电压等级的升高和传输容量的不断增大, 传统的电磁式电流互感器(CT)暴露的一系列缺点越来越突出: 高压绝缘复杂、动态测量范围小、频带窄、易受电磁干扰、故障电流下铁心易磁饱和以及存在磁滞现象等等。相比之下, 新型光学电流互感器(OCT)在这些问题上就具有绝对的优势。国内外专家积极从事这方面的研究并取得了一些成果, 不同原理的光学电流互感器样机相继研制成功并挂网试运行^[1~4]。从运行效果来看, 这些OCT部分解决了上述问题。

光学电流互感器的最终目标应该是无源式全光学电流互感器, 但是光学材料受温度、振动等引起的双折射影响^[2], 使得OCT运行精度和长期稳定性一直以来都不能得到很好的解决, 大大减缓了其实用化进程。本文提出了一种混合式光学电流互感器(Hybrid Optical Current Transformer-HOCT)的设计, 它包含传统采样CT和块状光学玻璃传感头两个传感输出通道。传统采样CT的暂态性能虽然不是很理想, 但是其稳态精度可以达到很高, 工业应用已达0.2%, 且能在电力系统中长期稳定运行。而光学玻璃传感头的暂态性能是比较完美的, 只不过受环境温度等的影响, 其优良的性能不能得到长期的保证。在本文的设计中, 利用采样CT通道的稳态输出对光学玻璃传感通道的输出进行跟踪系数校正, 采样CT在整个系统扮演着光学传感头的一个稳态参考模型的角色。这样设计的HOCT, 不仅能够满足电力系统长期稳定运行和高稳态精度的要求, 而且大

大提高了装置的暂态精度, 使得其频带宽、无磁饱和等一系列优点得到充分发挥。而且, 双输出通道对电力系统继电保护来说还是一种冗余设计。

CT的暂态性能一直是影响保护正确动作的主要因素。例如, 在各种差动保护中, 区外故障时两侧CT由于饱和而产生不平衡电流, 严重时将会导致保护算法得到的结果为区内故障。为了防止由于CT饱和而导致的保护误操作, 采取的普遍措施是提高保护的整定值来躲过此不平衡电流, 这样保护的灵敏度就不得不降低^[5,6]。由于OCT不含铁心, 它在一次大电流下不会饱和, 在大的动态范围内能保持良好的线性, 采用OCT可以有效地提高现有保护的灵敏度和可靠性。

本文设计的HOCT的传感输出在正常和故障时均能正确线性反映一次电流, 而且均能保证较高的测量精度。针对HOCT优良的暂态性能, 即能以较高的精度无饱和地反映一次电流值, 初步评价了传统电流差动保护的灵敏度和可靠性, 提出了一些改进建议。分析结果表明基于HOCT测量值的差动保护性能将会有一定程度的提高。这对于推动新型光学电流互感器在继电保护中的应用以及现有差动保护判据的改进和新保护原理的提出有一定的指导意义。

1 混合式光学电流互感器

由于受温度、振动等因素的影响, OCT的长期稳态精度目前还很难与传统的基于电磁感应原理的电流互感器相媲美, 要作为计量设备长期稳定地运行于电力系统中, 完全替代传统CT还有相当的差距,

因而阻碍了其实用化进程。以往对光学电流互感器的研究多侧重于稳态特性,致力于提高其稳态精度和稳定性,忽略了暂态特性方面的研究,而光学电流互感器优良的暂态特性正是传统 CT 所无法比拟的一大优势。我们现在做的工作就是:采取措施充分发挥它的优势,补偿它的劣势。

1.1 系统结构

设计的混合式光学电流传感器总体上包含以下几个主要模块:高端电流传感单元、光纤传输系统和数字信号处理单元,其系统结构框图如图 1 所示。高端电流传感单元又主要包含传统采样 CT 及其辅助电源模块、光学玻璃传感头三部分。

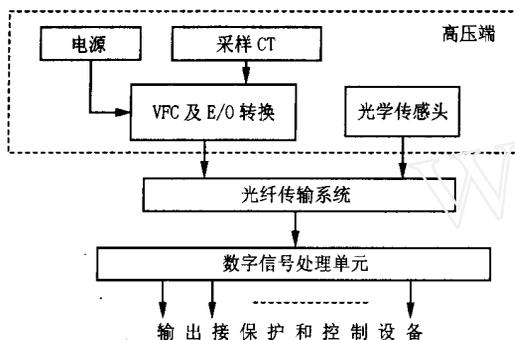


图 1 混合式光学电流互感器的系统框图

Fig. 1 System structure of HOCT

由于高端电路和电网处于同一个电位,采样线圈无须考虑高电压绝缘设计,其精度可以达到 0.05% 以内。目前采样线圈主要有 Rogowski 线圈和传统环形铁心 CT 两种。Rogowski 线圈采用非磁性芯,采样灵敏度非常小,当一次电流在 100 A 以下时,二次侧输出电压为 μV 量级,要精确地测量这么小的电压比较困难。考虑到设计的额定测量电流值为 300 A,采样线圈采用准确级为 0.05 级的铁心线圈,压频转换(VFC)及电光转换(E/O)电路的电源能量取自电网,通过一个电源变压器以及相应的整流、滤波电路将电网电流转换为稳定的 $\pm 5\text{ V}$ 直流电压。

光学传感部分采用 Verdet 常数相对较高、温度系数相对较小的国产重火石玻璃 ZF-7 构成块状光学传感头,其传感原理为我们所熟悉的 Faraday 磁光效应,光路采用单入双出,即双光路系统。

光纤传输系统具有两个重要的作用,由于光纤本身就具有很好的绝缘性能,首先它可以作为高低压之间的绝缘介质,其次是实现高压侧电流信号向低压侧的高速传送。光纤传输系统包括光发送驱动器、光纤和光接收驱动器。对于传统采样 CT,光发

送驱动器在高端电路中,将 TTL 电平的频率脉冲电信号转换为光信号耦合进光纤,光纤向低端光接收器传送数字脉冲信号。而对于块状光学传感头部分,光发射和光接收均在低压端,光纤将直流光源从低压端传送至高压端,经光学传感头,调制信号再经过光纤传送至低压端光接收器,光纤传送的是模拟量。多模光纤较单模光纤有较高的耦合效率,本文采用了芯径为 $62.5\ \mu\text{m}$ 的多模光纤作为传输光纤。

数字信号处理单元的核心采用 DSP 芯片,使用高性能的微处理芯片和有效的算法实现信号处理的实时性,辅以外围接口模块提供显示、继电器保护和远程控制等的接口。对于传统采样 CT,光接收器接收的数字脉冲信号直接输入 DSP 的计数器;而对块状光学传感部分,由于光纤传送的是模拟信号,首先必须通过 A/D 转换芯片转换成数字信号才能送入 DSP 进行实时数值处理。

1.2 信号处理和输出选择

传统采样 CT 的输出 u_{CT} ,一方面直接用作整个光学电流互感器的计量输出和辅助保护输出,另一方面作为块状光学传感头的系数校正输入。由于光学传感部分采用双光路系统,为满足不同要求,计量和保护分别采用不同的信号处理算法,即保护采用差除和信号处理方案,而计量则采用 Sato 等人提出的改进的差除和信号处理方案^[7]。

本文采用自适应系数校正技术,利用采样 CT 的高精度稳态输出对光学玻璃传感头输出进行跟踪系数校正,使得整个 HOCT 的暂稳态性能都达到比较高的要求。

环境温度的变化是一个缓变的过程,它引起的光学传感头输出系数的变化当然也是一个缓变的过程。光学传感头的输出可以用下式简单表示:

$$u = k(T) \cdot i \quad (1)$$

式中: i 为一次电流, u 为输出电压信号, $k(T)$ 是比例系数,它是温度的函数,正是由于 $k(T)$ 的存在,使得光学传感头的精度得不到长期的保证。

以故障瞬间来分析,设故障前比例系数为 $k_-(T)$,故障后的系数为 $k_+(T)$,由于温度引起的系数变化是缓变的,则可以认为在故障前后极短的时间内两者是相等的,即:

$$k_-(T) = k_+(T) \quad (2)$$

故障前采样 CT 可以精确地测得一次电流,准确地得到此时光学传感头输出的比例系数,用故障前的比例系数来代替故障后的系数,实现系数的跟踪补偿。

具有双输出通道是这种设计方案的另一个特点,但是如果不加选择地都作为输出将会给后续保护的运用带来一定的困难。这就要求对最终输出通道作出一定的选择,图2为设计中输出通道选择程序处理流程框图。

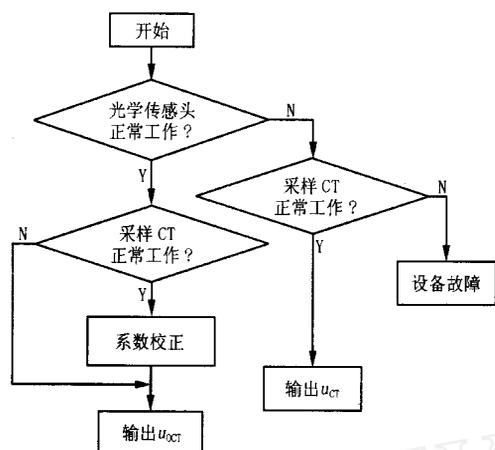


图2 输出选择程序处理框图

Fig.2 Block diagram of output selection program processing

在采样CT和光学玻璃传感头均正常工作的情况下,选择经过系数校正后的光学传感头的输出 u_{OCT} 作为 HOCT 的输出。如果采样CT由于某种原因不能正常工作,比如说一次电网处于小电流或停电状态时,高压侧电路的电源供电将会出现供电死区,则选择没有经过系数校正的光学传感头的输出 u_{OCT} 作为 HOCT 的输出。虽然此时输出精度有所降低,但仍能线性地正确反映一次电流,对于保护仍然能正确动作。而当光学玻璃传感部分出现问题,则选择采样CT的输出 u_{CT} 作为 HOCT 的输出,此时相当于常规的电流互感器。还有一种情况就是两个输出通道都不能正常工作,此时整个 HOCT 设备就得检修了,当然这种情况出现的几率应该还是比较小的。

1.3 结果与分析

本设计中的光学传感头输出在经过实时系数校正后,其测量精度可以达到传统采样CT输出的精度。图3为测试的一组数据波形,传统CT测得的一次电流有效值为 390.73882 A,光学传感头测得的电流有效值 390.86057 A,相对比差为 0.037%。但是在故障情况下,系数的校正其实应该是个延时校正,故障时校正系数不是实时更正的,而是延用故障前一时刻的校正系数。也就是说,在延时校正后光学传感头输出仍能保证较高的精度,设计对于提高电流互感器的暂态精度才有实际意义。

图4为延时2s校正后光学传感输出与采样CT

输出的相对误差曲线。可以看出,如果采样CT的误差为0.2%,则光学电流互感器在故障情况下的误差仍能保证在0.5%以内。

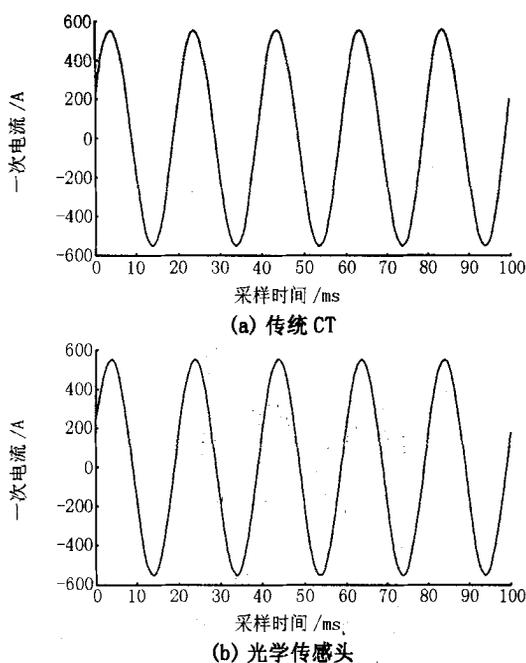


图3 一次电流波形

Fig.3 Waveforms of primary current

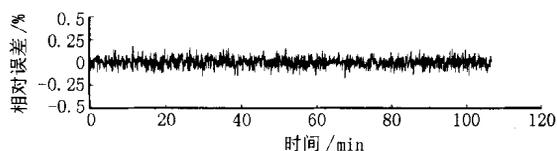


图4 相对误差曲线

Fig.4 Relative error curve

2 电流差动保护判据的评述

目前已有的各种微机电流差动保护,其原理大多与常规的差动保护相同。即将每一支路电流的若干个采样值用于某一种算法,计算出相应的差动电流。

差动保护所取得的各支路电流是电流互感器的二次侧电流,而一般电流互感器都存在一个激磁电流^[6]。在假定铁磁回路为线性特性,各电流互感器变比都一致的情况下,以双端元件为例,差动电流为:

$$i_d = (i_1 + i_2) - (i_{1\mu} + i_{2\mu}) \quad (3)$$

式中各量均折算到二次侧,当被保护元件没有短路故障时, $i_1 + i_2 = 0$, 此时有:

$$i_d = - (i_{1\mu} + i_{2\mu}) = i_{\mu b} \quad (4)$$

$i_{\mu b}$ 即所谓的不平衡电流。当电流互感器的磁通未饱和时, $i_{\mu b}$ 值很小, 而且与输入电流 i 成线性关系, 此时, $i_d = i_{\mu b} = 0$, 此不平衡电流随一次电流增加而增加。由于铁心的非线性特性, 当电流增大到一定程度以后, $i_{\mu b}$ 增加的速度愈来愈快, 因此需要采用非线性的制动特性。

而对于光学电流互感器并不存在这个激磁电流 $i_{\mu b}$, 当然也就不存在由 $i_{\mu b}$ 而产生的不平衡电流, 这样不仅可以简化保护的整定, 而且可以提高保护的灵敏度。

目前国内的传统数字电流保护普遍采用基于工频正弦量的向量差动原理, 其基本的动作判据为:

$$\begin{cases} |I_1 + I_2| > I_0 \\ |I_1 + I_2| > K(|I_1 - I_2|) \end{cases} \quad (5)$$

以线路保护为例(下同), 式中 I_1, I_2 为线路两侧工频电流向量, 以母线指向线路为正方向, I_0 为最小整定值, K 为制动系数^[8]。

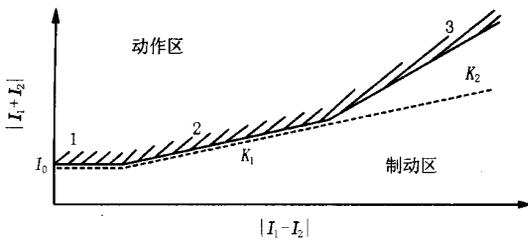


图5 差动保护动作特性

Fig. 5 Operating characteristics of differential protection

图5中实线为差动保护比率制动特性曲线, 第3段是用来保证区外故障引起CT饱和的情况下有足够的防卫能力, 不至于引起保护误动。在采用OCT作为测量手段时, 由于不存在测量饱和的问题, 第3段折线的制动系数 K_2 可以仍然保持为 K_1 , 很显然保护的制动区将增大, 即保护的灵敏度得到了提高, 同时也简化了整定。

在区外故障时, 假定两侧电流互感器的测量误差分别为 e_1 和 e_2 , 考虑最严重的情况, 即 $e_1 = -e_2 = e_{\max}$, 要保证区外故障时的制动效果, 则根据式(5), 应满足下式:

$$e_{\max} < K \quad (6)$$

很显然, 保护制动系数 K 的取值与采用的电流互感器性能存在着一定的关系。

3 结论

光学电流互感器的最终目标应该是无源式全光

学电流互感器, 鉴于目前其实用化进程缓慢的状况, 本文提出了混合式光学电流互感器的设计方案。它包含了两个传感输出通道, 利用采样CT通道的稳态输出对光学玻璃传感头通道的输出进行跟踪系数校正。这样, 设计的HOCT不仅能够满足电力系统长期稳定运行和高稳态精度的要求, 而且大大提高了装置的暂态精度, 使得其频带宽、无磁饱和等一系列优点得到充分发挥。而且, 双输出通道对于电力系统保护来说还是一种冗余设计。

本文通过对电流差动保护的分析, 旨在说明光学电流互感器的运用对差动保护判据的影响, 这对保护判据的改进提供了一些理论依据, 有利于推动光学电流互感器在继电保护中的应用。特别是本文设计的HOCT, 它不仅解决了饱和的问题, 而且具有较高的暂态精度, 通过上文分析, 将有效地提高电流差动保护的灵敏度。

参考文献:

- [1] 易本顺, 刘延冰, 阮芳 (YI Ben-shun, LIU Yan-bing, RUAN Fang). 光学电流互感器现场运行性能分析 (Field Performance Analysis of Optical Current Transformer) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1997, 17(2): 138 - 140.
- [2] Song J, McLaren P G, Thomson D J, et al. A Prototype Clamp-on Magneto-optical Current Transducer for Power System Metering and Relaying [J]. IEEE Trans. on P. D., 1995, 17(2): 1764 - 1770.
- [3] 纪昆, 李英英 (JI Kun, LI Yingying). 光电式电流互感器的实用化设计 (A Practical Design for Optoelectric Current Transformer) [J]. 光电工程 (Opto-Electronic Engineering), 2002, 29(2): 39 - 44.
- [4] Donaldson E F, Gibson J R, Jones G R, et al. Hybrid Optical Current Transformer with Optical and Power-line Energisation [J]. IEE Proc-Gener, Transm, Distrib, 2000, 147(5): 304 - 309.
- [5] Li H Y, Crossly P A. Design and Evaluation of Current Differential Protection Scheme Incorporating a Fiber Optical Current Sensor [J]. IEEE, 2000, 1936 - 1940.
- [6] 陈德树, 马天皓, 刘沛, 等 (CHEN De-shu, MA Tian-hao, LIU Pei, et al). 采样值电流差动微机保护的一些问题 (Problems in Realization of Microcomputer Based Differential Current Protection by Sampled Values) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipments), 1996, 60(4): 3 - 8.
- [7] Sato T, Sone I H, et al. Development and Application of Bulk-optic Current Sensor [J]. Tech. Digest, 11th OFS Conf., 1996: 130 - 133.

- [8] 高厚磊 (GAO Hou-lei). 新型数字式分相电流差动保护的研究 (Study of New Digital Phase Segregated Current Differential Protection) [D]. 天津:天津大学出版社 (Tianjin: Tianjin University Press), 1997, 31 - 56.

作者简介:

于文斌 (1976 -), 男, 博士研究生, 从事光学测量技术及其在继电保护中的应用方面的研究;

郭志忠 (1961 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统的信息化、自动化和最优化, 电力系统稳定分析控制和电力系统光学测量技术等方面的研究。

收稿日期: 2003-06-02; 修回日期: 2003-07-22

A design of hybrid optical current transformer

YU Wen-bin¹, ZHANG Guo-qing¹, LI Yarr-song², GUO Zhi-zhong^{1,3}, YANG Yi-han²

(1. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Beijing XI Electric Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: A novel design of hybrid optical current transformer (HOCT) is introduced. The HOCT includes two sensing output channels: conventional sampling current sensing channel and bulk-optic glass sensing channel. It effectively improves the transient and stationary accuracy of HOCT by using the high accuracy stationary output of sampling CT to adjust the output of bulk-optic sensing head. The advantages of HOCT such as wide-band, non-magnetic saturation are achieved; meanwhile, double output channels is a redundant design for power system. For practical research of HOCT, this is a new design thought.

Key words: hybrid optical current transformer (HOCT); transient performance; coefficient adjustment; differential protection

中国高等学校电力系统及其自动化专业第 20 届学术年会 征文通知

中国高等学校电力系统及其自动化专业第 20 届学术年会拟于 2004 年 10 月在郑州大学举行。现将有关事项通知如下:

一 征文范围

1 电力系统规划与可靠性; 2 电力系统稳态分析与控制; 3 电力系统暂态分析与控制; 4 高压直流输电及灵活交流输电技术; 5 能量管理系统及配电网自动化; 6 电力系统继电保护; 7 电力系统自动化及运动技术; 8 电力设备监测与故障诊断; 9 人工智能在电力系统中的应用; 10 电力市场; 11 理论电工; 12 教学研究及其它

二 论文格式和提交

1 论文可用中文或英文撰写。论文应由题目、作者信息、摘要、关键词、引言、正文、结论、参考文献和作者简介等组成。论文排版格式详细说明和范例请通过郑州大学电气工程学院“中国高等学校电力系统及其自动化专业第 20 届学术年会”网页查看。

2 每篇论文篇幅一般不超过 3 页, 最多为 4 页。篇幅为 4 页的录用论文在正常版面费 (另行通知) 之外另增收 100 元。

3 作者同时采用网上提交和原稿邮寄两种方式提交论文。网上提交要求论文以 word 文件形式从本届年会网页提交, 同时请按照要求在网填写相关信息, 服务器收到后将自动返回收到信息和论文编号。原稿邮寄请将论文一式二份 (激光打印件) 挂号寄会议联系人。请用铅笔在页面右下角标注论文页码, 在题目左上角按照征文范围标明论文方向, 如: 论文方向: 电力系统继电保护。在信封背面注明“电自专业年会征文”字样。

4 征文截止日期为 2004 年 6 月 30 日。

5 经专家评审后决定论文是否录用。录用论文于 2004 年 9 月 1 日前在网上公布, 并通过 E-mail 通知作者。如不录用, 恕不退稿。

三 其他事项

1 本届学术年会大会报告人和报告内容采用大会特邀、个人自荐、单位推荐和专家评审相结合的方式确定。大会报告收入大会论文集, 请报告人按照论文排版格式排版。

2 本届学术年会适逢第 20 届, 除进行学术交流外, 还将安排纪念活动, 为此, 特向各高等学校, 特别是曾举办过本专业年会的高等学校和个人征集年会历史资料 (如照片等) 和回忆文章, 请给予大力支持。年会历史资料可直接寄给年会联系人, 扫描件和回忆文章可通过本届年会网页递送。为办好这次盛会, 欢迎通过电话、网页或 E-mail 向会议筹备组提出意见、建议和要

3 本届年会筹备组通信地址: 河南省郑州市文化路 97 号郑州大学电气工程学院

邮 编: 450002 会议联系人和稿件收件人: 孙淑红, 尹淑萍 E-mail: dianzi2004@zhu.edu.cn

电 话: (0371) 3886713 或总机 3887361, 3886564, 3887359 转 322, 216 传 真: (0371) 3887351

4 会议信息请通过郑州大学电气工程学院“中国高等学校电力系统及其自动化专业第 20 届学术年会”网页查看。

郑州大学中国高等学校电力系统及其自动化专业第 20 届学术年会筹备组
2004 年 1 月 8 日