

聚磁式光学电流互感器结构的研究

韦兆碧, 马志瀛, 柳明, 杨欢, 卢振松, 白洁

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Study on Structure of Optical Current Transducer with Magnetic Concentrator

WEI Zhao-bi, MA Zhi-ying, LIU Ming, YANG Huan, LU Zhen-song, BAI Jie

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 在介绍光学电流互感器原理和聚磁原理的基础上, 给出了一种聚磁式光学电流互感器的结构, 并对聚磁器通过 ANSYS 软件进行建模仿真, 验证了不同气隙长度下的聚磁效果。试验结果表明, 采用聚磁结构的光学电流互感器不但提高了光学电流互感器的灵敏度, 而且具有较高的线性度, 因而有着良好的应用前景。

关键词: 光学电流互感器; 结构; 聚磁器; 反射式光学结构中图分类号: TM452; TM93 文献标志码: A

Abstract: Basing on the introduction of theory of the optical current transformer and the theory of concentrating magnetism, this paper described a kind of structure of the optical current transformer with magnetic concentrator, simulated the magnetic concentrator and confirmed the effect of concentrating magnetism in different length of air gap with ANSYS. The test result indicates that the optical current transformer with structure of concentrating magnetism not only enhances sensitivity of the optical current transformer but also be of higher linearity, thus it has a good application prospect.

Key words: optical current transducer; structure; magnetic concentrator; reflective optical structure

0 引言

光学电流互感器(OCT)是以法拉第磁光效应为基础、以磁光材料为介质的新兴电力测量装置。它通过测量光波在经过磁光材料时其偏振面旋转(由于电流产生的磁场的作用)的角度来确定被测电流的大小。在高电压大电流测量的条件下使用OCT较之传统的电磁式互感器,具有抗高电磁噪声干扰、动态范围大、响应快、传感器电流灵敏度高以及测量装置结构紧凑、体积小、重量轻、价格便宜、非接触测量等优点,因而受到越来越多的关注。聚磁式光学电流互

感器以磁光晶体作为测量介质,利用铁磁材料能够聚磁的机理,增强磁光晶体所处磁场的强度,从而达到增加传感器灵敏度的作用,且铁磁材料易于加工和安装。使用磁光晶体作为测量介质的OCT不受光纤扰动的影响,缩短了磁光晶体的通光光路,降低了双折射效应^[1,2]。由于聚磁式光学电流互感器具有上述优点,因而备受国内外学者的青睐,文[3]对测量范围为1000A的钳形表式光学电流互感器作了介绍。

1 理论基础

法拉第磁光效应是指当一束线偏振光通过置于磁场中具有磁光特性的材料时,其偏振面发生旋转的现象。法拉第效应旋光角度为

$$=VBL = \mu VHL \quad (1)$$

式中 μ 为磁光材料的磁导率;H为磁场强度;L为光束沿着磁场方向所经过磁光材料的通光路径长度;V为磁光材料的Verdet常数。从式(1)可以得出,要提高电流互感器的灵敏度,可以通过提高磁光材料的Verdet常数,增加磁场强度H以及延长光束沿磁场方向经过的路径长度的方法实现。目前国内外很多学者采用具有较高Verdet常数的磁光材料作为测量介质。对于以检测偏振态的变化来检测电流大小的光学电流互感器而言,虽然提高L能够提高测量灵敏度,但是单纯增加磁光晶体长度,一方面增加了磁光晶体的线性双折射效应^[1,2],另一方面不利于安装,同时价格昂贵,且增加灵敏度的能力有限。目前国内外学者开始采用聚磁器的方法来提高磁光晶体的磁场强度^[1-6],其中文[1]采用螺线管方式进行聚磁,取得了长期挂网试验的成功;文[4]在聚磁结构的基础上,采用了在磁光晶体表面涂覆反射薄膜,并通过调整光线入射角的方法来增加通光路径,但

收稿日期: 2007-03-29; 修回日期: 2007-05-15

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050698007)。

作者简介: 韦兆碧(1974-),男,博士研究生,主要从事高压电器及其智能化研究。

该方法需要精确计算入光和出光路径, 不太容易实现光路对准, 同时增加了传感器的线性双折射效应, 因而传统的直射式聚磁光学电流互感器结构更具有实际应用价值。图1是聚磁式光学电流互感器的聚磁原理结构图, 图中磁环总的平均磁路长度为 L_{CT} ; g 为磁光晶体长度; L_3 为聚磁器中的气隙长度。

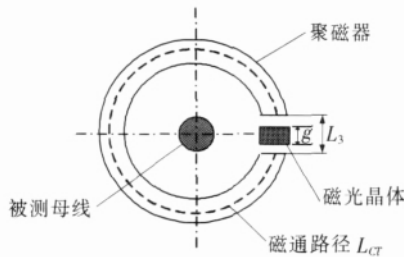


图1 聚磁式光学电流互感器原理结构图

设铁心在非饱和条件下, 铁心中的平均磁场强度为 H_{CT} , 气隙处的平均磁场强度为 H_3 , 磁光材料的通光路径长度为 g , 待测电流为 I , 对于单母线穿心式测量结构, 根据安培环路定律有 $H_{CT}L_{CT}+H_3L_3=I$, 可近似认为 $\mu_0 H_3 = \mu H_{CT}$, 将此关系代入上式得

$$\frac{\mu_0}{\mu} H_3 L_3 + H_3 L_3 = I$$

式中 μ_0 为空气磁导率 (磁光晶体磁导率近似等于 μ_0); μ 为铁心相对磁导率。因为: $\mu_0 / \mu \gg L_{CT} / L_3$, 则近似有 $H_3 L_3 = I$ 。

设电流引起的法拉第偏转角为 α , 磁光材料的费尔德常数为 V , 则

$$\alpha = VBg = \mu_0 V H_3 g = \mu_0 V H_3 g L_3 / L_3 = \mu_0 V I g / L_3 \quad (2)$$

由式(2)可知, 聚磁式光学电流互感器的法拉第旋转角与磁光材料的费尔德常数、待测电流以及磁光材料的长度与聚磁圈的气隙长度有关, 且当磁光材料以及聚磁线圈的参数确定时, 法拉第偏转角正比于被测电流 I 。

2 聚磁器的理论分析

2.1 聚磁器的结构要求

在聚磁式光学电流互感器模型的理想情况下, 线偏振光旋转角 α 与被测导体电流可近似认为是线性关系在一些文献中已有介绍, 但是对于聚磁器的设计方面包括磁环尺寸、形状以及和空气隙尺寸的搭配比例关系等方面对于聚磁式光学电流互感器的影响鲜有文献提及。由于聚磁器在聚磁式光学电流互感器中具有重要的作用, 不同的聚磁结构以及尺寸选择都会直接影响到电流互感器的测量, 因此对于聚磁器的设计应该予以充分关注。

在传统的 CT 设计中, 剩磁密度是磁环在过渡状态中呈现非线性和磁滞现象的根本原因, 也是影响 CT 测量精度的最主要原因。目前已经研究出很多减少剩磁密度的方法, 其中选取具有较窄磁滞回线的材

料以及在磁环上取气隙方法得到众多学者的肯定。软磁材料是磁性材料中应用最广泛的一类, 它具有狭窄的磁滞回线、小的矫顽力、高的饱和磁感应、很高的导磁率和较高的电阻率等特点。而电工用硅钢片 (YB73-70D21) 除具有上述软磁材料的特点外还具有磁滞损耗和涡流损耗低且具有良好的工艺性能, 性价比高且易于加工, 非常适合用于聚磁器的设计。

由于聚磁式光学电流互感器需要将磁光材料固定在聚磁器所形成的磁场中进行测量, 因此聚磁器不能封闭。这种不封闭的结构一方面能够用于固定磁光材料, 另一方面可以降低聚磁器的剩磁密度, 减小磁饱和给测量造成的影响。图2是闭合铁心以及带有气隙铁心的磁化曲线^[7], 图中磁环总的平均磁路长度为 L_{CT} , 单位励磁电流与磁通密度的关系 $i_{\omega} = F(B)$ 是带气隙磁环的磁化曲线, 是通过曲线 $H_{CT} = f(B)$ 及直线 $H_3(L_3/L_{CT})$ 的横坐标相加得到的, N_p 称为铁心的去磁系数。由图2可知, 在磁环不带气隙时, 剩磁密度是 B_r ; 当铁心带气隙后, 剩磁密度变小到 B_{r0} 。很明显, 气隙能够减小铁心的剩磁密度, 可以减小非线性及磁滞现象的影响。

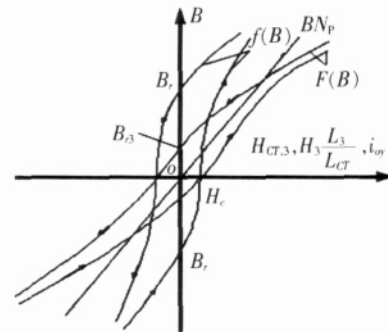


图2 闭合铁心和带有气隙铁心的磁化曲线

根据文[7]得出的结论, 当相对计算气隙 L_3/L_{CT} 0.02 (相应于 $N_p=0.16 \times 10^4$) 时剩磁密度已经非常小, 在计算中可以将其忽略。根据这一要求, 可合理选择磁路和气隙长度。

2.2 聚磁器模型的建立及磁场分析

为了更清楚地进行分析, 利用 ANSYS 软件建立聚磁器模型, 见图3。铁心选用 DT₄ 钢 (其磁化特性曲线可从相关材料中查到), 采用外侧长 100 mm、内侧长 60 mm、厚 16 mm 的方形结构, 母线长 200 mm, 相对磁导率为 1, 近似认为母线无限长; 空气在以母线为圆心、底面直径为 600 mm、长为 200 mm 的圆柱形范围内, 相对磁导率为 1, 其边界满足 Dirichlet 条件, 即圆柱形边界上的磁位为零。

在 ANSYS 中对以上模型进行剖分并计算磁场强度, 其数学简化公式为

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{I}{(R_{CT} + R_3) \times S} = \frac{I}{\frac{L_{CT}}{\mu_0 \mu} + \frac{L_3}{\mu_0}} \quad (3)$$

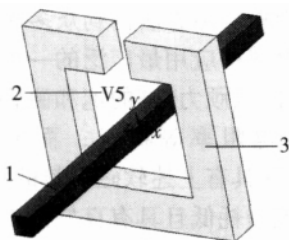


图 3 方形聚磁器模型仿真图

其中 B 为磁场强度; S 为铁心和气隙的截面积; I 为母线电流; L_{CT} 为铁心磁路长度; L_3 为气隙长度; μ 为铁心的相对磁导率。聚磁器的磁场强度分布仿真结果见图 4。从图中可以看出: 当载流导体处于磁环中心时, 磁场强度沿磁环的方向上强度有所变化; 气隙中磁场强度分布相对比较均匀。

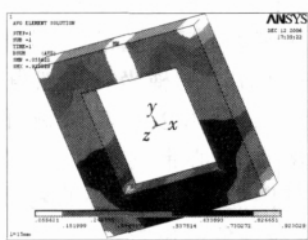


图 4 聚磁式光学电流互感器原理结构框图

为了直观地看出聚磁器中心截面上的磁力线的分布, 图 5 给出了用二维模型 ANSYS 的仿真结果, 其气隙中的磁场值与三维模型结果基本相同。

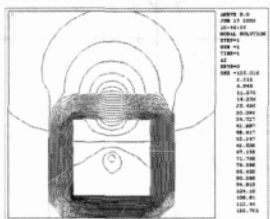


图 5 反射式光学结构正面示意图

表 1 中分别列出了在母线电流为 1 000 A 时, 平均磁路长度为 L_{CT} ($320 \text{ mm}-L_3$)、不同气隙 L_3 (10、15、20 mm) 下的磁场强度相对平均值。在没有聚磁器的条件下, 母线在相同空间位置处产生的磁场强度 H 为 497.4 A/m, 与表 1 中气隙的磁场强度值相比较, 可以看出经过聚磁器聚磁后, 磁光晶体所处位置的磁场强度增加了两个数量级以上。

表 1 ANSYS 仿真结果 (1 000 A 时)

气隙长度/mm	气隙 B/T	气隙 $H/(A \cdot m^{-1})$	铁心 B/T	铁心 $H/(A \cdot m^{-1})$
20	0.062 31	49 584.53	0.577 21	96.429
15	0.082 70	65 813.33	0.627 083	104.340
10	0.123 23	98 066.88	0.705 544	116.970

从表 1 中可以看出, 在聚磁器形状确定的情况下随着气隙长度的减小, 磁场强度随之增大。结合式 (2) 可以得出, 在磁光晶体长度 g 确定时 随 L_3 的减小而增大, 但是 L_3 的减小给磁光晶体、起偏器

以及检偏器等光学器件的安装将带来较大的困难。

在上述仿真数据分析的基础上, 搭建聚磁式光学电流互感器试验系统, 选取 1 mm 厚 20 mm 宽的硅钢片 16 片组成一个外侧长 100 mm、内侧长 60 mm 的正方形结构。考虑到磁光晶体等光学器件的安装固定, 气隙长度选取 15 mm, 此时 L_3/L_{CT} 的值为 $0.049 > 0.02$, 剩磁密度非常小, 在计算中完全可以将其忽略。

3 聚磁式光学电流互感器试验模型及初步结果

在上述分析的基础上, 搭建的聚磁式光学电流互感器原理结构框图和实物模型见图 6。图中光源发出的光经过准直自聚焦透镜后进入 $\lambda/4$ 波片去偏, 去偏后的光通过起偏器成为线偏振光进入磁光晶体, 并通过检偏器后入射到光探测器, 输出表征母线电流变化的光偏转信号, 其中磁光晶体所处的磁场为 H (H 为已经过聚磁后的磁场)。

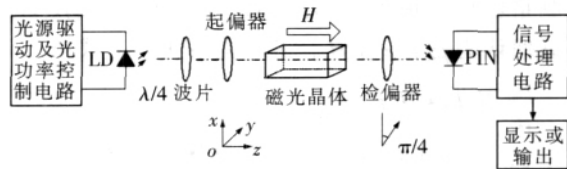


图 6 聚磁式光学电流互感器实物模型

此结构中光学器件较多, 无法在聚磁器的气隙内完成所有器件的安装, 因而聚磁式光学电流互感器设计中只将磁光晶体安装在聚磁器中而将其他光路都安装在聚磁器之外, 为此设计了专用的反射式光学结构, 见图 7。该结构较好地解决了增大磁光晶体的尺寸和缩短聚磁器的气隙长度的矛盾, 而且光路长度增加并不多, 不会使光波产生过大的衰减, 但其结构增加了工艺加工的难度。笔者选用国内 MR-3 型法拉第磁光晶体, 它在 632.8 nm 波长条件下具有较高的费尔德常数 ($V = -0.392 \text{ min/Oe} \cdot \text{cm}$)。试验中测母线电流的安匝是通过在聚磁器臂上缠绕 50 匝线圈来等效, 当图 8 中线圈在 0~10 A 变化时, 可以等效 500 安匝的母线电流。图中可以通过调节安装在法兰上的起偏器和检偏器很方便地实现夹角角度的调整。

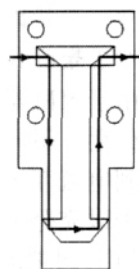
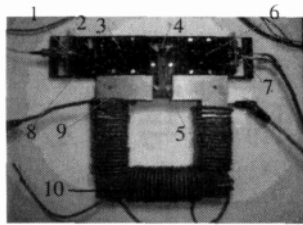


图 7 反射式光学结构正面示意图

此结构中光学器件较多, 其特性易受温度变化的影响, 必须做出校正或补偿。光源对系统产生的



1—法兰(内装准直自聚焦镜) 2— $\lambda/4$ 波片 3—起偏器
4—反射式光学结构 5—磁光晶体 6—检偏器
7—光电检测器 8—垫板 9—聚磁环 10—一次线圈

图8 聚磁式光学电流互感器输入输出关系图

影响较大,应选用带有制冷器和光功率可控的激光器。在后面的研究中将采用补偿的方法以消除由温度变化对磁光晶体费尔德常数和光学器件尺寸所带来的不利影响。

对于图6中传感器输出的光电流经过电流电压转换电路、信号调理以及低通滤波后输送给计算机进行处理,计算机通过软件编程实现低通滤波和频谱幅值判别相结合的消噪算法有效地分离了噪声信号,实验结果见图9,从图中可以看出该互感器在0~500 A测量范围内具有良好的线性度。

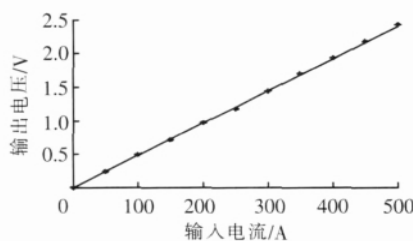


图9 聚磁式光学电流互感器输入输出关系图

4 结语

笔者在介绍聚磁式光学电流互感器的基础上,给出了一种聚磁器的结构,并利用仿真软件搭建模型对聚磁器进行分析,验证了不同气隙下的聚磁效

果,最后制作了聚磁式光学电流互感器的实物试验模型。在光路设计中应用反射式结构解决了增加磁光晶体长度以及缩短气隙长度来提高传感器测量灵敏度的矛盾。试验结果表明,聚磁式光学电流互感器由于缩短了磁光晶体长度,线性双折射效应的影响较小,且易于加工实现,传感器输入输出线性度较好,因而具有良好的应用前景。

致谢

该课题的研究获得了高等学校博士点专项科研基金资助,在样机试制中得到了西安应用光学研究所的协助,特此致谢!

参考文献:

- [1] 张国庆. 光学电流互感器的理论与实用化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [2] 卢振松. 聚磁式光学电流互感器的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [3] MIHAJLOVIC P, PETRICEVIC S, STOJKOVIC Z, et al. Development of a Portable Fiber-optic Current Sensor for Power Systems Monitoring [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2004 (53): 24-30.
- [4] YI B, CHU B C B, CHIANG K S, et al. New Design of Electric-current Sensor for Sensitivity Improvement [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2000(49): 418-423.
- [5] KATSUKAWA H, ISHIKAWA H, OKAJIMA H, et al. Development of an Optical Current Transducer with a Bulk Type Faraday Sensor for Metering [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1996(11): 702-707.
- [6] LI C, KONG M G, JONES G R, et al. Sensitivity Improvement of an Optical Current Sensor with Enhanced Faraday Rotation[J]. J Lightwave Technol., 1997, 15(12): 2246-2252.
- [7] B B 阿法纳西耶夫(苏). 电流互感器[M]. 陆安业, 肖耀荣, 朱英浩译. 北京: 机械工业出版社, 1989.

(上接第335页)

表3 通过双线性插值计算出的合闸时间和实测值之间的误差 ms

温度/	165/V	166/V	167/V
11.1	0.041	0.125	0.065
3.2	0.065	0.015	0.014
-4.3	0.158	0.214	0.174
-7.1	0.016	0.066	0.033
-8.3	0.035	0.021	0.004
-10.0	0.004	0.082	0.038
-11.6	0.026	0.086	0.025

用双线性插值法及归一化处理方法进行合闸时间的预测。实验结果分析表明,该方法简单、快捷,能很好地满足同步关合误差在 ± 1 ms内的要求。

参考文献:

- [1] 施玉祥, 陶晓农. 中低压变电站无功调节的研究 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 54-57.
- [2] 林 莘. 永磁机构与真空断路器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 胡建伟, 汤怀民. 微分方程数解法 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 李 利. 配永磁机构真空断路器测控系统及其同步关合技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2002.
- [5] CEREDA C, GEMME C, REUBER C. Synchronous Medium Voltage Circuit Breaker [C]// ABB Solution Based on Magnetic Drive and Electronic Control, CIGRED 99-15th Conference on Electric Distribution, 1999: 13-21.