

混合型光学电流互感器的集磁环传感头

关宏亮, 尚秋峰, 杨以涵

(华北电力大学 电力工程学院, 北京 102206)

摘要: 光学电流互感器 OCT(Optical Current Transformer)相对于传统电磁式电流互感器有着许多优点。对混合型 OCT 的集磁环式传感头的磁环进行理论分析, 以安培环路定理和铁磁物质磁化曲线为基础, 分析了带气隙磁环的磁化曲线, 通过消除剩磁密度对铁芯的影响计算磁环和气隙尺寸; 根据有关资料和试验结果得出结论, 给出混合型 OCT 集磁环的横截面积、平均半径和气隙长度。

关键词: 光学电流互感器; 传感头; 集磁环; 气隙; 截面积

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)02-0030-03

0 引言

光学电流互感器 OCT(Optical Current Transformer)也被称为磁光式电流互感器 MOCT(Magneto-Optical Current Transformer), 按照传感部分的不同结构可分为全光纤光学电流互感器、混合型光学电流互感器两大类; 前者传光、传感都是采用光纤, 后者传光采用光纤、传感采用磁光材料。

混合型光学电流互感器传感所用的磁光材料一般采用磁光玻璃, 根据传感头是否带有铁芯, 可分为加集磁环式混合型光学电流互感器和闭环式混合型光学电流互感器。闭环式混合型光学电流互感器结构设计主要是要考虑偏振光在两种不同界面上发生全反射时, 电矢量相互垂直两个分量之间要产生相位差, 而影响测量精度。为了减少这一相位差的影响, 光路设计时要考虑相位补偿。

加集磁环式光学电流互感器是以一小块磁光材料作为传感元件, 并在它周围加一环形的导磁材料, 加强磁光材料中的磁场强度, 以增加其测量灵敏度。图 1 为其结构示意图(图中 1 为通流导体, 2 为集磁环, 3 为磁光材料, 4 为起偏、检偏器, 5 为光纤)。为进一步提高灵敏度, 光路可设计成多个来回的形式^[1,2]。

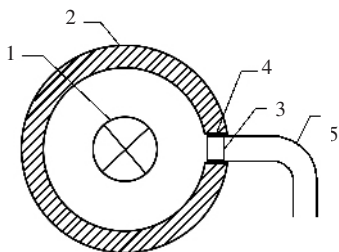


图 1 加集磁环式混合型光学电流互感器传感头部分

Fig.1 The sensor head of hybrid OCT with ferromagnetic ring concentrator

设被测电流为 I , 铁芯的导磁率为 μ_1 , 间隙和磁光材料的导磁率为 μ_0 , 铁芯和气隙的长度分别为 L_1 和 L_2 , 则间隙中的磁场(也就是加在磁光材料上的磁场) H 为

$$H = \frac{I}{L_1 \mu_0 / \mu_1 + L_2} \quad (1)$$

由于 $\mu_0 \ll \mu_1$, 所以式(1)可以简化为

$$H \approx I / L_2 \quad (2)$$

设磁光材料(包括起偏器和检偏器, 这里认为就是气隙尺寸)的长度为 L_3 , 由 Faraday 磁光效应公式 $\theta = \mu_0 V K I$ (式中 θ 为线偏振光偏振面的旋转角度; V 为磁光材料的 Verdet 常数; K 为只跟磁光材料中通光路径与通导体相对位置有关的常数)^[3] 可知线偏振光在平行于光线传播方向上的旋转角度 θ 为

$$\theta = \mu_0 V H L_3 = \frac{\mu_0 V I L_3}{L_1 \mu_0 / \mu_1 + L_2} \approx \frac{\mu_0 V I L_3}{L_2} \quad (3)$$

由此可以推出:

$$I \approx L_2 \theta / (\mu_0 V L_3) \quad (4)$$

式(4)就是计算所测通导体中电流的最终公式。这种类型的光学电流互感器传感头部分的光路比较简单, 和传统的电磁式电流互感器有相同之处, 易于实现, 但是由于存在铁芯, 有些文献提及可能存在故障电流下的饱和、磁滞现象^[4]。

本文将对磁环的设计和间隙尺寸进行讨论计算, 得出合适的设计尺寸, 通过适当的间隙消除剩磁密度, 使之提高这种光学电流互感器的线性化, 提高测量精度, 满足各种测量和保护装置的精度要求。同时, 为了体现 OCT 体积小、重量轻的优点, 必须使集磁环式传感头的磁环尺寸尽量小, 重量尽量轻, 这样才是最优的设计。

1 含有气隙铁芯的理论基础

传统电磁式电流互感器, 剩磁密度有时是铁芯在过渡状态中呈现非线性或磁滞现象的根本原因^[5], 对于本文所提到的集磁环式混合型光学电流互感器中的磁环也有同样问题。

因此, 在磁环上取一不大的气隙, 一方面可以放置磁光材料, 另一方面可以消除剩磁密度, 克服磁饱和带来的影响。图 2 是带有气隙(集磁环)和不带有

气隙的两种环形铁芯的简化磁化曲线图,图中 1 为完整的磁环,2 为带有气隙的磁环(集磁环), $B_{\max}$ 为最大磁通密度;构成铁芯的材料是新型特种钢片^[5]。

由图中曲线可以看出带有气隙的磁环磁化曲线近似直线。

1.1 磁环的磁化曲线

这里带气隙的圆环铁芯叫做磁环。现假设磁环沿平均磁路长的横截面面积 S_M (见图 3) 不变,而且气隙断面的各点上气隙的几何长度是相同的。由于气隙尺寸非常小,可以用气隙几何尺寸代替磁力线的长度,即认为气隙内磁力线没有凸出情况。显然,在这种条件下,每个气隙中磁通的横截面面积等于铁芯磁环的横截面面积 S_M ,而且铁芯磁环中的磁通密度 B_{CT} 与气隙中的磁通密度 B_3 也是相等的,即 $B_{CT} = B_3 = B$ 。磁环总的平均磁路长为 l_{CT} ,磁环内部磁场强度为 H_{CT} ,气隙中为 H_3 。根据安培环路定理,可得到被测通导体中的电流 i_0 为

$$i_0 = H_{CT} + H_3 l_3 \quad (5)$$

磁环中的磁场强度与磁通密度由根据磁化曲线求得的 $H_{CT} = f(B)$ 关系曲线确定。气隙中的磁场强度按公式 $H_3 = B/\mu_0$ 求得,式中 μ_0 为空气的磁导率。如果 S_M 和 l_3 分别以 m^2 和 m 为单位,磁通密度以 T 为单位,磁场强度以 A/m 为单位,那么磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$,因此,单位励磁电流^[5]为

$$i_{oy} = i_0 / l_{CT} = f(B) + BN_p = F(B) \quad (6)$$

$$N_p = l_3 / (\mu_0 l_{CT}) = l_3 \times 10^{-7} / (4\pi l_{CT}) \quad (7)$$

式中 N_p 为磁环的去磁系数。

单位励磁电流与磁通密度的关系 $i_{oy} = F(B)$ 是磁环的磁化曲线。这一关系可用图解法求得,如图 4 所示。

1.2 磁环的剩磁密度

通过曲线 $H_{CT} = f(B)$ 及直线 $H_3(l_3/l_{CT}) = BN_p$ 的横坐标相加得出带气隙磁环磁化曲线,即图 4 中的 $F(B)$ 。图中磁环磁化和去磁曲线 $i_{oy} = F(B)$ 是按照局部曲线就是磁滞回线的上升和下降支线时绘制的。由图 4 可见,在没有气隙的时候,剩磁密度是 B_r ;当在铁芯上开一个口,即带气隙后,剩磁密度变小

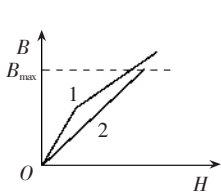


图 2 简化的磁化曲线
Fig.2 The simplified magnetization curves

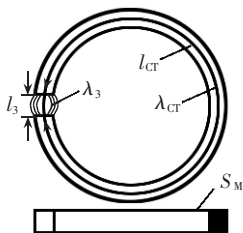


图 3 磁环平面及截面图
Fig.3 The plane and cross-sectional diagrams of ferromagnetic ring

到 B_{r3} 。很明显,气隙能够减小铁芯的剩磁密度,可以克服非线性 and 磁饱和现象的产生。这里通过图解法确定磁环的剩磁密度。剩磁密度可根据对应于极限磁滞回线的下降支线绘制出的 $i_{oy} = f(B)$ 曲线求得,见图 5。

磁通密度 B_{r3} 对应下降曲线 $F(B)$ 与纵轴的交点。可看到,该曲线与横轴的交点对应着磁环材料的矫顽磁化力 H_C ,与直线 BN_p 的交点对应着剩磁密度 B_{r0} 。

不用绘制曲线 $F(B)$,根据式(6)也可以求出磁通密度

B_{r3} ,因为当 $i_{oy} = 0$ 时, $f(B_{r3}) = -B_{r3}N_p$ 。绘出极限回线 $f(B)$ 的下降支线和直线 $B_{r3}N_p$ 对纵轴的镜像(图 5),找出它们的交点,该点就对应着 B_{r3} 。可见,气隙中将建立一个与磁环中的剩磁通磁势绝对值相等,但方向相反的磁势 $f(B_{r3})$ 。由式(7)可知, l_3/l_{CT} 越大,相对应的 N_p 就越大,从而通过绘图方法得到的磁环磁化曲线下降段与纵轴的交点就越靠近原点,也就是磁环的剩磁密度 B_{r3} 越小。

气隙 l_3 是从实际上消除剩磁密度 B_{r3} 对磁环在过渡状态中工作准确度的影响这一条件出发确定的。为此必须使磁通密度 B_{r3} 实际上不超过正常状态下的磁通密度。

对于牌号为 1511 和 1512 的电工钢片^[5],当相对计算气隙 $l_3/l_{CT} \approx 0.02$ (相应于 $N_p = 0.16 \times 10^4$) 时可以实现这一条件。类似于图 5 表示的图解法说明,在这种情况下剩磁密度 $B_{r3} = 0.0345 T$ 。这个磁通密度可以认为是很小的,在计算中允许将其忽略。由图解法可知,所取的相对气隙越大,剩磁通就越小。本文取相对气隙 $l_3/l_{CT} = 0.025$ 进行计算。

2 磁环尺寸确定

2.1 磁环气隙尺寸

如图 6 所示(图中 H_3 为气隙中相对磁场强度, l_3 为气隙长度),测量磁环气隙中的磁感应强度并且与磁环铁芯中的磁感应强度进行比较,以两者的比值为纵轴,以气隙尺寸为横轴作出一条关系曲线。

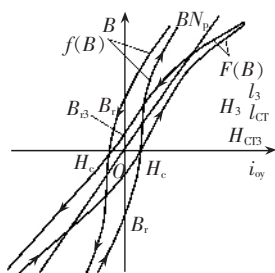


图 4 闭合铁芯及磁环磁化曲线
Fig.4 The magnetization curves of closed and open iron cores

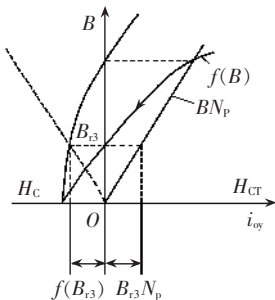


图 5 磁环剩磁密度确定
Fig.5 Determination of remanent flux density of ferromagnetic ring

很明显,取气隙尺寸 $l_3 = 10 \text{ mm}$ 最能反映通导体中电流产生的磁场,因为此时对应的气隙磁感应强度相对值接近 1,也就是此时气隙中的磁感应强度等于铁芯中磁感应强度。

所以取 $l_3 = 10 \text{ mm}$,再根据上面所得出的结论,当相对气隙 $l_3/l_{CT} = 0.025$ 时可以满足磁环在过渡状态中仍然保持线性的要求,可计算磁环的平均磁路长度 $l_{CT} = l_3/0.025 = 10 \text{ mm}/0.025 = 400 \text{ mm}$,从而计算出磁环的平均半径 r 。由于 $l_{CT} = 2\pi r$,所以可计算:

$$r = \frac{l_{CT}}{2\pi} = \frac{400 \text{ mm}}{2 \times 3.1415926} \approx 63.662 \text{ mm}$$

在实际运行中 r 可以取得更小一些,因为 r 越小产生的 l_3/l_{CT} 就越大,由上面推出的结论可知磁环的剩磁密度就越小,则所测量的结果就更加准确。

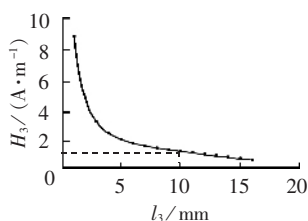
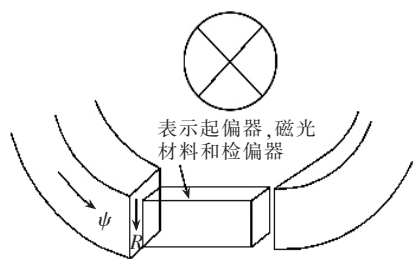
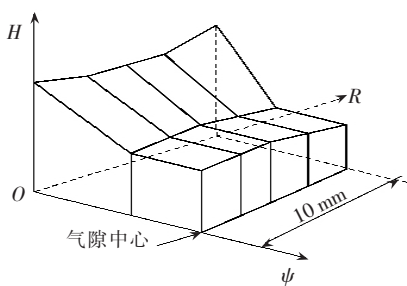


图 6 磁环气隙尺寸的确定

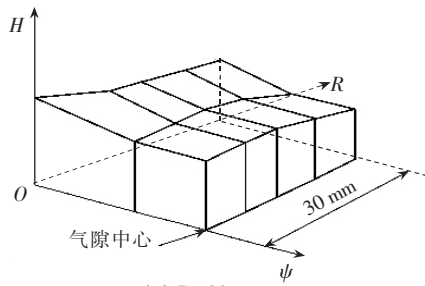
Fig.6 Determination of gap size of ferromagnetic ring



(a) 磁环宽度 R



(b) $R = 10 \text{ mm}$



(c) $R = 30 \text{ mm}$

图 7 不同磁环宽度对应的磁场分布情况

Fig.7 Magnetic distributions of different ferromagnetic ring widths

3 结论

本文对混合型光学电流互感器的集磁环传感头进行了理论分析,以安培环路定理和铁磁性物质磁化曲线为基础,对带气隙磁环的磁化曲线进行分析,通过消除剩磁密度对铁芯的影响计算磁环和所含气隙尺寸。并且根据有关资料和结论计算出集磁环铁芯截面和气隙的理论尺寸为:磁环截面 $35 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,平均半径 63.662 mm ,气隙取 10 mm 。

参考文献:

- [1] LI G, KONG M G, JONES G R, et al. Sensitivity improvement of an optical current sensor with enhanced Faraday rotation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15 (12): 2246 - 2252.
- [2] YI, CHU B, CHIANG B C B, et al. New design of optical current sensor for sensitivity improvement [A]. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE [C]*. [s.l.]: IEEE, 1999. 24 - 26.
- [3] 刘公强, 乐志强, 沈德芳. 磁光学 [M]. 上海: 上海古籍出版社, 2001.

2.2 磁环截面面积

在磁环半径和气隙尺寸的计算中,做了一个近似,即 $B_{CT} = B_3 = B$ (由于气隙尺寸比较小,近似认为铁芯内的磁感应强度和气隙内的磁感应强度相等)。为了保证 OCT 的精确度,就要保证这个近似更能接近真实值,即尽量使气隙内的磁感应强度均匀。文献[6]给出了铁芯不同宽度 R (磁环径向宽度尺寸,如图 7 中所示)时对应的磁力线分布图(见图 7),可以看出 R 的值越大磁力线就越均匀,就是气隙内的磁感应强度就越接近铁芯内的磁感应强度,得出的测量结果就越准确, OCT 的精确度就越高。取 R 值为 30 mm 已经可以使气隙内的磁力线比较均匀了,这里取 $R = 35 \text{ mm}$ 。

至于磁环垂直于磁环平面方向的高度,对气隙内的磁感应强度影响基本可以忽略不计,当然,磁环垂直于磁环平面方向的高度也要比采用的磁光玻璃厚才行,这里取磁环垂直于磁环平面方向的高度为 20 mm 。这样,磁环的截面积可设计成 $35 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

- [4] 马仙云. 磁光式电流互感器 [D]. 北京: 清华大学, 1996.

MA Xian-yun. Magneto-optical current transformer [D]. Beijing: Tsinghua University, 1996.

- [5] B.B. 阿法纳西耶夫. 电流互感器 [M]. 陆安业译. 北京: 机械工业出版社, 1989.

- [6] YOSHIDA Y, KAWAZOE S, IBUKI K, et al. New fault locating system for air-insulated substations using optical current detector [J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1992, 7(4): 1804 - 1813.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

关宏亮 (1977 -), 男, 满族, 辽宁营口人, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制 (E-mail: guanhongliang 036@163.com);

尚秋峰 (1968 -), 女, 河南商水人, 博士研究生, 研究方向为电力系统自动化;

杨以涵 (1927 -), 男, 辽宁铁岭人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制, 以及人工智能在电力系统中的应用、电力市场等。

Ferromagnetic ring concentrator sensor head of hybrid optical current transformer

GUAN Hong-liang, SHANG Qiu-feng, YANG Yi-han

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Compared with traditional electromagnetic current transformer, OCT (Optical Current Transformer) has many virtues. The ferromagnetic ring concentrator sensor head of hybrid OCT is theoretically analyzed. The magnetization curve of ferromagnetic ring with air gap is analyzed based on the Ampere loop theorem and magnetization curves of ferromagnetic matter, and the sizes of ferromagnetic ring and air gap are obtained by eliminating the effect of remanent flux density on the iron core. According to relevant documents and experimental results, the across section and average radius of ferromagnetic ring concentrator and gap length of hybrid OCT are offered.

Key words: optical current transformer; sensor head; ferromagnetic ring concentrator; air gap; across section