

文章编号: 1002-2082(2004)05-0040-03

一种大动态范围的磁光电流传感器方案

焦斌亮, 郑绳萱, 单伟

(燕山大学 光电子系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 提出了一种扩大磁光式电流传感器动态范围的方法。磁光式电流传感器是基于法拉第效应和安培环路定律实现电流测量的。由于法拉第旋转角随被测电流周期性增大, 测量时只能利用正弦曲线单调变化的部分, 因此限制了电流的测量范围。利用光纤维尔德常数随光波长变化这一特性, 通过测量两种光波旋转的角度差, 获得了大电流的测量值。在正常计量范围内利用单波长数据获得精度较高的计量值, 达到扩大传感器测量范围的目的。分析表明, 当两波长的维尔德常数相差20%时, 电流测量范围可以扩大到单波长时的6倍。采用这种方法可望用一个传感器同时满足电力系统中的计量和保护两种用途。

关键词: 电流传感器; 光纤传感器; 法拉第效应

中图分类号: TP73-33

文献标识码: B

A Scenario of the Magneto-Optical Current Sensor for Large Dynamic Range Measurement

JIAO Bin-liang, ZHENG Sheng-xuan, SHAN Wei

(Department of Opto-electronics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A new method to extend the dynamic range of the magneto-optical current sensor is presented. The magneto-optical current sensor is based on Farada effect and Ampere's law to realize the current measurement. Because the Faraday rotation angle increases periodically with the current measured, only a monotone region of the sinusoid could be used and the measurement range is narrowed. With the wavelength dependence of the Verdet constant, a large current could be measured by way of measuring the difference of the rotation angles corresponding to the two different wavelengths within one sensor. The metering data, which is more accurate than the data from the dual wavelength, can be acquired by a single wavelength. It is theoretically shown that 20% Verdet constant difference between the two wavelengths will increase the current measuring range 6 times. This method can make the magneto-optical current sensor adaptive to both metering and protection in power system.

Keywords: current sensor; fiber sensor; Faraday effect

引言

用于电力系统的电流传感器(互感器)通常分为两种:一种用于计量,但精度要求较高,测量范围通常在4 kA以内;另一种用于保护,精度要求较低,测量范围通常达到几十千安。目前电力系统普遍使用的电流传感器均采用电磁感应原理。由于高压隔离的需要,使得传感器系统体积庞大,造价高昂。相比之下,近年来获得广泛关注的磁光式电流

传感器具有成本低、无磁保和及电隔离性好等多项优点,对其开发研究也取得了很大进展^[1~2]。

磁光式电流传感器的基本原理是磁致旋光效应(法拉第效应)和安培环路定律。通过测量线偏振光的旋转角,实现电流测量。传统的磁光式电流传感器采用单一波长的线偏振光,随着电流的增大,光矢量的旋转角将周期性增大,而传感器输出通常呈正弦特性,只能利用正弦波单调变化的部分来测

收稿日期:2003-07-24; 修回日期:2003-10-12

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(2001266)

作者简介:焦斌亮(1964-),男,陕西户县人,燕山大学副教授,主要从事光纤传感器和CCD应用技术研究工作

量, 因此限制了电流的测量范围。

本文提出的双波长方案是利用光纤的维尔德常数随光波长变化的特点, 通过测量两种光波旋转的角度差获得大电流测量值的。在正常计量范围内, 利用单波长数据获得精度较高的计量值, 从而达到了扩大传感器测量范围的目的。采用这种方法, 可望用一个传感器同时满足计量和保护两种用途。

1 原理

1864年, 法拉第发现在强磁场作用下, 原本不具有旋光性的物质产生了旋光性, 即线偏振光通过加有外磁场的物质时, 其光矢量发生了旋转, 光矢量旋转的角度与磁感应强度及光通过的距离成正比, 这就是磁致旋光效应或法拉第效应。如果已知物质特性(维尔德常数)及光通过的距离, 测出线偏振光旋转的角度, 则可得到外加磁场的磁感应强度, 从而得到产生磁场的电流值。

法拉第磁光效应可描述为^[3]

$$\theta_F = VBL$$

式中, θ_F 为线偏振光的法拉第旋转角; V 为代表物质特性的维尔德常数; B 为作用在光路上的磁感应强度; L 为光路长度。

如图1所示, 将作为传光介质的光纤在待测电流导线上绕 N 圈, 则光纤线圈中传送的线偏振光在电流磁场的作用下发生法拉第旋转。利用安培环路定律可以得到待测电流 I 与 θ_F 的关系式:

$$\theta_F = VNI$$

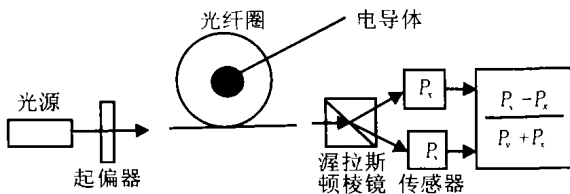


图1 磁光式电流传感器原理

Fig. 1 Principle diagram magneto-optical Current sensor 出射的线偏振光通过渥拉斯顿棱镜分解成振动方向互相垂直的两束线偏振光, 其光强 P_x 和 P_y 分别由两个光电探测器来接收并转换为电信号, 则有关系式:

$$P = \frac{P_x - P_y}{P_x + P_y} = K\theta_F \tag{1}$$

式中, K 是与光纤性能有关的系数, 因此待测电流为

$$I = \frac{P_x - P_y}{(P_x + P_y)KN} \tag{2}$$

式中, P_x 和 P_y 分别代表线偏振光在两个垂直方向分量的光强。从图2可以看出, 它们可分别表示为

$$\begin{aligned} P_x &= E_x^2 = E^2 \cos^2 \theta_F \\ P_y &= E_y^2 = E^2 \sin^2 \theta_F \end{aligned} \tag{3}$$

将(3)式代入(2)式, 可得:

$$I = \frac{\cos 2\theta_F}{KN} \tag{4}$$

由(4)式可以看出, 由于余弦函数的周期性, 电流 I 的测试范围对应的 $\theta_F = 0 \sim 90^\circ$ 。实际应用时, 要通过光路调整使 $I = 0$ 时 θ_F 偏置在 45° 方向, 并取 $\theta_F = 45^\circ$ 附近约 45° 的范围, 这时 θ_F 随 I 近似线性变化, 且测试精度较高。

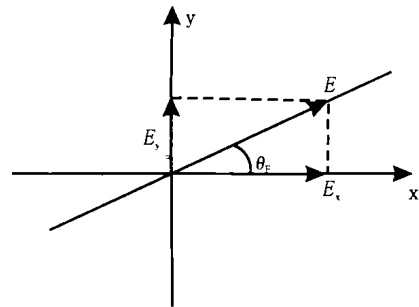


图2 光矢量在两个垂直方向上的分量

Fig. 2 Two orthogonal components of an optical vector

由经典电动力学理论可以推知抗磁性和顺磁性介质的维尔德常数^[4]:

$$V = \frac{e\mu_0}{mc_0} \left(\frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots \right) \tag{5}$$

式中, e 和 m 分别是电子电荷和电子质量; μ_0 为真空磁导率; λ 和 c_0 分别是真空中的光波长和光速; b 和 $c \dots$ 是常量系数。由于(5)式中含有一些未知的系数, 因此常用经验公式表示 V 与 λ 的关系, 如Hoya光学公司的FR-5玻璃的维尔德常数表示为

$$V(\lambda) = 0.0781 - 0.128\lambda^{-2} - 0.513 \times 10^{-3}\lambda^{-4}$$

由于维尔德常数是光波长的函数, 因此当图1中传感器输入的光波长不同时, 同一电流下两种光波的

法拉第旋转角将不同。利用这一特性可以大大提高电流测量范围。

3 实现方法

双波长磁光式电流传感器的结构如图3所示。两种波长的激光通过光纤耦合器进入光纤起偏器,得到

的线偏振光通过保偏光纤传输,经过传感光纤圈后产生法拉第旋转。返回的线偏振光经渥拉斯顿棱镜分成s波和p波,经半透半反镜分光,最后通过带通滤光片获得单波长光束,由相应的电信号送至信号处理器运算后获得测试值。通常传感光纤圈要进行退火处理,以减小线性双折射对测试精度的影响。

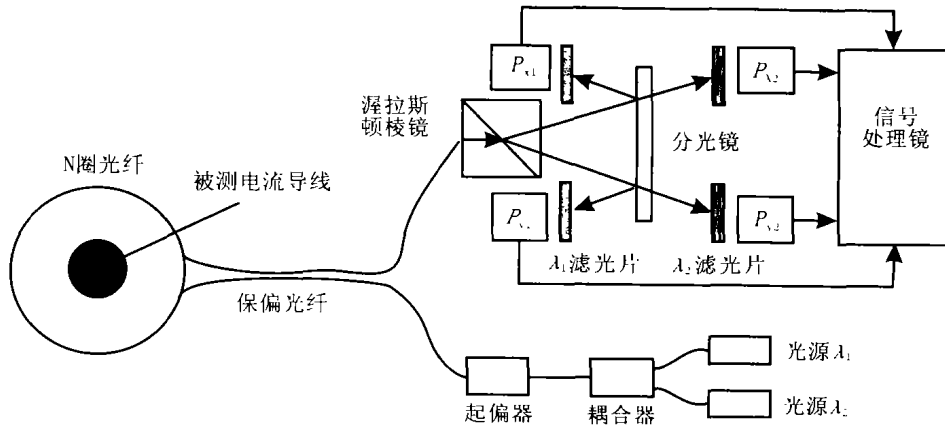


图3 双波长电流传感器结构图

Fig. 3 The structure diagram of current sensor for dual wavelength

信号处理器首先通过(1)式计算对应于 λ_1 和 λ_2 的 P_1 和 P_2 值,一组 P_1 和 P_2 值对应着一个被测电流。由于 $V(\lambda)$ 是经验公式,精度并不高,因此不宜用解析方法计算电流值,可通过定标的方法测出一系列离散的电流值对应的 P_1 和 P_2 值,然后存储于信号处理器中(测试时采用查表的方法得到被测电流值)。只要有足够的存储容量和定标精度,就可以满足传感器的精度要求。

双波长方法可以满足大电流的测试要求,并能扩大传感器测试范围,其最大可测电流值取决于 $V(\lambda_1)$ 和 $V(\lambda_2)$ 值之差。设电流增大到 I_M 时两线偏振光的法拉第旋转角分别为

$$\theta_{F1} = V(\lambda_1)NI_M = n\pi/2$$

$$\theta_{F2} = V(\lambda_2)NI_M = (n-1)\pi/2$$

则 I_M 即为最大可测电流值。式中 n 为正整数。设 $V(\lambda_1) : V(\lambda_2) = 6 : 5$,容易解得 $n=6$ 时,最大可测电流值扩大到单波长时的6倍。

4 结论

利用维尔德常数随波长变化的原理,采用双波长光波作为传感光波可扩大磁光式电流传感器的测试范围。通常情况下,用单波长获得的数据作为电流计量值;当电流异常增大时,利用双波长数据获得电流值,从而实现一台传感器同时完成计量和保护两项功能。

参考文献:

- [1] A H Rose, S M Etzel, K B Rochford. Optical fiber current sensors in high electric field environments[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(6): 1042-1047.
- [2] J D P Hrabliuk. Optical current sensors eliminate CT saturation [A]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C], 2002, 2: 1478-1481.
- [3] 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京:机械工业出版社, 1980. 339-341.
- [4] 刘公强, 乐志强, 沈德芳. 磁光学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2001. 42-45.