

用于冲击电流测量的自积分式 Rogowski 线圈的研究

The Study of a Self-integrator Rogowski Coil

北京交通大学电气工程学院 (北京 100044) 何海昉 李明 张小青

摘要:文中介绍了一种自制的自积分式 Rogowski 线圈配合示波器所组成的冲击电流测量系统的基本原理,采用标准电阻对该 Rogowski 线圈的测量结果进行了实验校准,并对校准实验数据进行处理。从处理结果看,该 Rogowski 线圈具有较好的冲击电流测量精度。

Abstract: The paper gives an introduction of the principle of large impulse current measurement based on a self-integrator Rogowski coil. Experiment is made to calibrate the Rogowski coil by the standard resistor. The experimental results are used to check the measuring accuracy and to determine the current sensitivity of the Rogowski coil.

关键词: 冲击电流 Rogowski 线圈 校准测量

Key words: Impulse current Rogowski coil Calibration measurement

技
术
论
坛

1 引言

在试验电子设备雷电电涌防护装置的防护性能时,通常需要进行冲击电流的测量,以前最常用的方法是利用低欧姆阻值的标准电阻器配合示波器测量冲击电流的幅值和波形。但用这种方式测量大电流时,由于需要将标准电阻直接串入被测回路,为了不引起回路电流的明显变化,要求标准电阻器阻值很低(一般在 $0.1\sim 10\text{m}\Omega$),且能直接耐受冲击大电流所产生的热和力效应而阻值恒定不变。因此要求这种标准电阻器采用特殊材料、特殊工艺来制造,所以价格比较昂贵。

在雷电电涌保护器的性能试验中,采用了另一种方式来测量大电流——Rogowski 线圈配合示波器测量。我们设计和制作的自积分式 Rogowski 线圈采用串入式接线方式,接线简单、体积小、造价低、使

用方便,是一种经济实用的雷电电涌冲击电流测试工具。

2 自积分式 Rogowski 线圈测量原理

Rogowski 线圈(罗氏线圈)又叫电流测量线圈、微分电流传感器,它利用的是电磁感应的原理,其结构如图 1 所示。

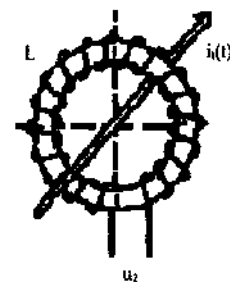


图 1 Rogowski 线圈结构图

导线均匀地绕在一个非铁磁性小截面骨架上,中间有电流流过的导线为被测电路。可见线圈与被测

电路之间是没有直接电的联系。当被测电流沿轴线通过线圈时,在环绕绕组所包围的体积内产生相应变化的磁场,同时在 Rogowski 线圈两端形成感应电压 u_2 。

$$u_2(t) = M \frac{di_1}{dt}$$

其中互感为:

$$M = \frac{\mu n h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

式中:

- i_1 为被测电流;
- h 为骨架的高度;
- n 为线圈的匝数;
- b 为骨架的外径;
- a 为骨架的内径;
- μ 为真空磁导率。

输出电压 u_2 正比于被测电流的变化率,即输出信号是电流对时间的微分,相位相差 90° 。

由分析可知, Rogowski 线圈输出电压并不是正比于被测电流的,所以要通过一个对输出电压信号进行积分的电路,才可以真实还原输入电流。常用的积分电路有 RC 外积分电路和 LR 内积分电路。外积分电路包括无源 RC 积分电路和有源 RC 积分电路,外积分电路的脉冲宽度响应受积分器的时间常数影响,参数选择不当会造成信号波长部分的衰减,半峰值时间测量不准确或输出信号过弱而使得测量易受干扰。我们采用了 LR 内积分电路。

自积分式 Rogowski 线圈用线圈自身的电感 L 与线圈端口所接的小电阻 R 构成积分器,又称为 LR 积分的 Rogowski 线圈。因有电流回路,在线圈感应电势 u_2 作用下会产生二次侧线圈的感应电流 i_2 。按 D 级雷电电涌防护装置的测试指标要求,绕制的 Rogowski 线圈接线及各元件参数如图 2 所示。

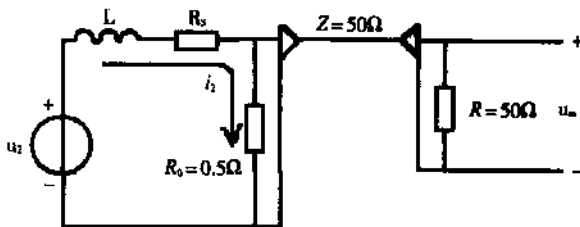


图 2 自积分 Rogowski 线圈原理图

其中线圈为 130 匝, L 为线圈自感, R_s 为线圈的内电阻, 线圈的匝间电容很小, 可忽略不计。端口电阻 R_0 选择远小于电缆的波阻抗 Z 。则可以忽略 Z 的影响, 认为线圈电流 i_2 流经端口电阻 R_0 在其两端形成的电压就是供给示波器的信号电压 u_m , R 为匹配电阻。

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} = L \frac{di_2}{dt} + i_2(R_s + R_0)$$

因 $R_s + R_0$ 很小 所以:

$$L \frac{di_2}{dt} \gg i_2(R_s + R_0)$$

则方程可简化为:

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} \quad L \frac{di_2}{dt}$$

这样接入示波器的信号电压为:

$$u_m(t) = R_0 i_2(t) = \frac{R_0}{L} \int_0^t L \frac{di_2}{dt} dt = \frac{R_0}{L} \int_0^t u_2 dt$$

即信号电压 u_m 是通过 u_2 对 t 的积分获得的。 L/R_0 为积分常数, 这样就得到示波器采集的信号电压与被测电流之间的线性关系。

$$u_m(t) = \frac{R_0}{L} \int_0^t M di_1 = \frac{MR_0 i_1(t)}{L}$$

线圈的电感值 L 可以通过试验测定, 互感 M 也可以通过电桥及标准互感的测定法测得。

3 自积分式线圈的实验校准

对自制的 Rogowski 线圈进行校准的实验接线如图 3 所示。它主要由冲击电流发生器、标准测量电阻、被校 Rogowski 线圈和数字存储示波器组成。由冲击电流发生器在回路中产生冲击大电流, 标准电阻和被校 Rogowski 线圈同时测取回路电流信号, 其中标准电阻上的电压信号送入示波器后被换算成电流, 被校 Rogowski 线圈二次侧输出电压直接在示波器上显示。为了获得充分可靠的校对数据点, 实验时分别采用了增大电流测试和减小电流测试两种方式来测取校对数据点, 这两种方式下的实测校对数据分别见表 1 和表 2, 其中比较典型的一组校对信号录波见图 4。

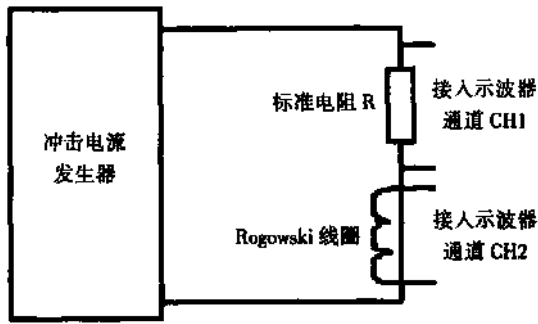


图3 校验电路

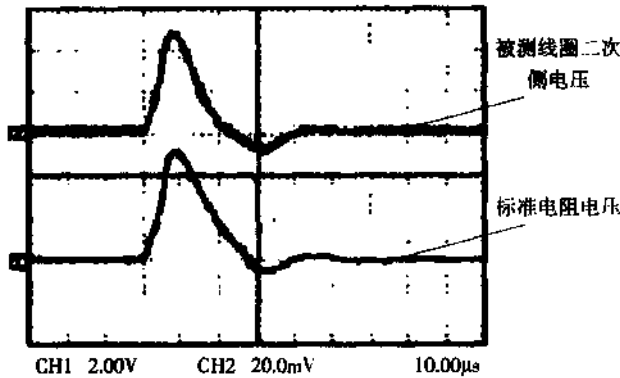


图4 实验录波

表1 增加电流实测校对数据

测量方式 试验序号	标准电阻			被校 Rogowski 线圈		
	电流 I_1 (A)	波头时间 (μ s)	波长时间 (μ s)	电压 U_2 (V)	波头时间 (μ s)	波长时间 (μ s)
1	386	9	21	1.52	9	20
2	583.8	9	19	2.28	8	19
3	926.56	9	18	3.52	9	19
4	1012.24	8	20	4.00	8	19
5	1318.27	9	20	5.2	8	18
6	1989.17	9	21	8.00	9	21
7	3201.51	8	18	13.0	8	17
8	5131.83	9	19	21.2	9	20

表2 减小电流实测校对数据

测量方式 试验序号	标准电阻			被校 Rogowski 线圈		
	电流 I_1 (A)	波头时间 (μ s)	波长时间 (μ s)	电压 U_2 (V)	波头时间 (μ s)	波长时间 (μ s)
1	5131.83	9	19	20.8	9	20
2	3248.59	9	21	13.0	8	20
3	1953.86	9	20	7.8	9	19
4	1318.27	8	19	5.2	8	20
5	1035.78	9	21	4.08	8	19
6	918.08	9	18	3.60	9	17
7	583.80	8	19	2.28	8	19
8	343.69	9	17	1.32	9	18

从表1和表2可见，对冲击电流波头和波长时

间参数的测量，被校 Rogowski 线圈能够与校准电流满意的吻合。为了对被校 Rogowski 线圈的电流幅值测量灵敏度进行校定，对表1和表2中给出的离散数据点 (U_2, I_1) 采用最小二乘法进行线性拟合，即求线性拟合函数 $S(U_2)$ 使得误差：

$$\| \delta \|^2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \omega(U_{2i}) [S(U_{2i}) - I_1(U_{2i})]^2 \right\}$$

式中：

$\omega(x_i)$ 为权函数。

通过在计算机上进行编程计算，得到增大电流数据点的线性回归方程为：

$$I_1 = S(U_2) = 242.02U_2$$

减小电流数据点的线性回归方程为：

$$I_1 = S(U_2) = 246.52U_2$$

再将上述两条拟合曲线取平均加权值得到线性方程：

$$I_1 = 244.27U_2$$

即被校 Rogowski 线圈的电流测量平均灵敏度参数为 244.27 (A/V)。

4 结论

本文介绍了自积分 Rogowski 线圈的冲击电流测量原理，并给出了适用于雷电电涌防雷装置测试的具体线圈参数。通过冲击电流实验校对，自积分 Rogowski 线圈的波形参数测量精度被考察，其电流幅值测量灵敏度也被标定。从校对实测结果看，自积分 Rogowski 线圈测量精度较高，测量灵敏度的线性度较好，能够胜任雷电电涌防护装置的测量。

参考文献

- 1 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术. 清华大学出版社, 2003.
- 2 IEC 61643-1. Surge protective devices connected to low-voltage distribution IEC. 1998.
- 3 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析. 清华大学出版社, 2001.

作者简介：何海昉，硕士研究生。研究方向为电力系统自动化。