

用于小电流测量的 Rogowski 线圈电流互感器

廖京生, 郭晓华, 朱明均, 叶妙元, 杨泽富

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

摘要: 在用 Rogowski 线圈测量电流时, 国外通常把小于 1 000 A 的电流测量统称为小电流测量。当 Rogowski 线圈测量小于 100 A 电流时, 线圈所感应出的电压信号极其微弱(仅为几 mV 到几十 mV), 易受干扰而很难准确测量, 因此, 电力系统中研制用于小于或等于 100 A 电流的 Rogowski 电流互感器一直是公认的一大难题。文中介绍了一种通过后续电路的处理来测量小电流的新型 Rogowski 电流互感器, 给出了其基本原理、实现和频率响应特性, 最后就额定电流为 100 A 的 Rogowski 电流互感器给出了实验结果。实验数据证明, 其精度达到了 0.2 级。这种方法在测量额定值为几十 A 甚至几 A 电流时同样适用。

关键词: Rogowski 电流互感器; 小电流测量; 频率响应特性

中图分类号: TM452

0 引言

基于 Rogowski 线圈的电流互感器以其线性度好、无磁饱和、测量频率范围宽、动态范围大、结构简单等优点成为互感器发展的新方向^[1,2]。电力系统中用于测量电流的 Rogowski 线圈电流互感器, 在被测电流较小(≤ 100 A)时, 由于 Rogowski 线圈没有铁心, 从中感应出来的微弱的电压信号(几 mV 到几十 mV)易受干扰而很难测准, 所以, 用于小电流测量的 Rogowski 线圈电流互感器被公认为是一大难题^[3]。

本文介绍了一种用于小电流(≤ 100 A)测量的 Rogowski 线圈电流互感器, 其准确度达到 0.2 级。

1 Rogowski 线圈的工作原理

Rogowski 线圈实际上是均匀密绕在一环形非磁性骨架上的空心螺线管, 其输出电压正比于被测电流的变化率^[4,5]。它的结构原理如图 1 所示。

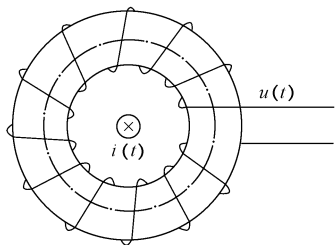


图 1 Rogowski 线圈的原理
Fig. 1 Theory of Rogowski coil

若 Rogowski 线圈的截面是矩形, 则其输出电

压为:

$$u(t) \approx M \frac{di}{dt} \quad (1)$$

互感为:

$$M = -\frac{\mu_0 n h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (2)$$

式中: i 为被测电流; h 为骨架的高度; n 为线圈的匝数密度; b 为骨架的外径; a 为骨架的内径; μ_0 为真空磁导率。

当线圈均匀密绕, h 和 $(b-a)$ 相对于骨架的内径 a 尽可能小, 而且线匝内不存在磁场梯度方向的分量时, 式(1)近似成立^[6]。因此, 对 Rogowski 线圈的输出电压积分即可还原出被测电流。

2 Rogowski 线圈测量小电流 (≤ 100 A) 的几种实现方法

用 Rogowski 线圈测量小电流的难点在于从 Rogowski 线圈感应出的电压太微弱, 以下为解决的方法。

2.1 增加 Rogowski 线圈的互感

由于 Rogowski 线圈没有铁心, 由式(2)可知, 互感系数 M 是很小的。在被测电流较小时, 从 Rogowski 线圈感应出的电压很小, 所以在测量小电流(≤ 100 A)时, 通常采用的方法是提高 M , 如:

a. 增加 Rogowski 线圈的高度和厚度, 或增大其匝数密度。由式(2)可知, M 与 h , $\ln(b/a)$, n 成正比。增加线圈的高度和厚度与式(1)成立的条件相违背, 而且随着线圈高度的增加, 密绕在 Rogowski 骨架上的线圈很难绕紧。这样的线圈抑制外界杂散磁场的能力不强, 容易受外界干扰的影响, 严重影响测

量精度。而且,绕线所用的漆包线不能太细,否则批量生产绕制时容易断裂,故线圈的匝数 n 不能过大。

b. 采用多层绕制的线圈结构。单层绕制的线圈的互感系数、自感、串联电阻和杂散电容都比较小,单层绕制的 Rogowski 线圈的互感 M 的大小为 $0.1 \mu\text{H} \sim 1 \mu\text{H}$ 。多层绕制的线圈,即在前一层线圈表面绕制上新一层的线圈,用这种方法绕制的线圈可以使互感 M 较大,在相同的骨架上与单层绕制的线圈相比,多层绕制的线圈的互感 M 可以达到 $1 \mu\text{H} \sim 10 \mu\text{H}$ ^[6]。但是,多层线圈的分布电容随着线圈匝数的增加而呈现线性增加,串联电感与线圈匝数的平方成正比,这些因素均会降低 Rogowski 线圈的频率响应特性。这种结构的线圈不适合对频率和相移要求较高的场合,而且,由于前一层绕线的影响,多层绕制的线圈很难保证均匀密绕,故抑制外界杂散磁场的 ability 不强,很容易受外界干扰的影响,测量精度不高。

c. 多个线圈叠加。将多个具有相同尺寸骨架的线圈串联叠加,这样绕制的线圈的分布电容随线圈数量增加而近似线性减小,串联电感随线圈数量增加而线性增加。这样,Rogowski 线圈的频响特性在理论上是不受影响的,线圈的互感 M 也相应地增大,但是,由于各线圈绕线之间存在分布电容,故 Rogowski 线圈的频率实际上是下降的。实验表明,当叠加 2 个线圈时,Rogowski 线圈的频率范围下降 10%;叠加更多的线圈时,Rogowski 线圈的频率范围下降更多;而且随着线圈数量的增多,线圈的高度也相应增加,这样就不适用于对空间要求较严的场合。

以上方法采用的是直接提高 Rogowski 线圈互感 M 的方法,实验证明,以上方法都存在着缺陷。

2.2 电路中(积分器前)采用放大环节放大感应的电压信号

Rogowski 线圈的输出是一个微分信号,对其积分后可以还原出被测电流。通常采用 RC 积分器^[7],或线圈电阻很小时让其工作在自积分状态下^[8]。由于被测电流较小,我们采用了电子积分器。但是,由于运算放大器存在着失调电压、失调电流、偏置电流以及温度漂移等问题,经积分电容的不断积累,出现所谓“积分漂移”的现象,给测量造成很大的误差,故采用如图 2 所示的惯性环节来代替积分器,它对抑制积分漂移很有用,而且可以稳定工作点。只要合理地设计电路参数及选用温漂小($0 \pm 30 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)的积分电容,反馈电阻及温度变化引起的误差是可以控制在允许范围之内的^[9]。

但是,当被测电流很小时,从 Rogowski 线圈感应出的电压信号相当微弱。在被测电流为 5 A 时,典

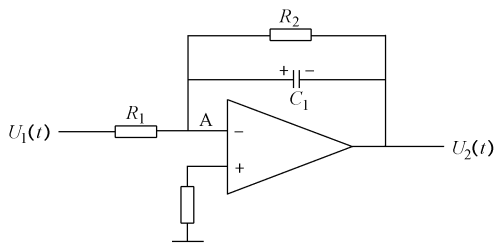


图 2 惯性环节电路

Fig. 2 Circuit diagram of inertial loop

型的单层绕制线圈输出只有几 mV,甚至更低,经过积分环节,信号衰减到几乎为 0,如此小的信号很容易受干扰而失真,高精度测量中测准十分困难。因此,我们通过在积分器前加入放大环节来放大从 Rogowski 线圈出来的微分信号。但是,放大环节中的运放噪声或漂移经惯性环节时被积分放大(对直流信号,惯性环节主要起放大作用),并在后级放大环节中再次被放大,输出的交流电压上叠加了一个直流分量,这样的系统测量误差很大,因此,我们选用了低漂移的运放,而且增加了一个“隔直”环节来去除直流分量(因为测量的是交流电流,不含直流分量,从 Rogowski 线圈里感应出来的信号是不含有直流分量的,故可以使用隔直环节)。选用温漂小($10^{-5}/^\circ\text{C}$ 数量级)的电容和几百 k Ω 的隔直电阻(温漂为 $15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$),隔直回路带来的误差及其因温度和频率的变化引起的误差是可以忽略不计的。

Rogowski 线圈电流互感器的测量系统框图如图 3 所示,图中, $U(t)$ 为 Rogowski 线圈的输出电压, $U_0(t)$ 为 Rogowski 测量系统的输出电压。通过以上处理即可获得 IEC 60044-8 规定的测量 4 V 输出及角差的要求。



图 3 Rogowski 线圈电流互感器测量部分系统框图

Fig. 3 System frame of the Rogowski current transducer's measurement

在保护回路中,由于短路电流不仅包括稳态正弦的周期分量,还包括非周期的直流分量,直流分量是由短路过渡过程中感应电势和短路回路阻抗所确定的一个按指数规律衰减变化的电流,在保护回路中应该真实地反映实际电流,故不能采用隔直电路。我们采用了极低漂移的运放,而且采用特殊的不含运放的积分电路,第 1 级放大环节的漂移不会得到放大。实验证明,最后输出的因运放漂移带来的直流电压不到 1 mV,这样就可以保证整个系统保护部分测量精度的要求。保护部分系统框图如图 4 所示。

经过以上环节的处理即可获得符合 IEC 60044-8 中规定的保护部分额定输出电压

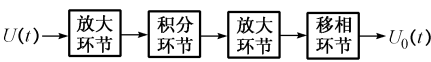


图 4 Rogowski 线圈电流互感器保护部分系统框图
Fig. 4 System frame of the Rogowski current transducer's protection

225 mV(或150 mV)及角差的要求。

3 频率响应特性

若放大环节为一反相放大器,积分环节为 RC 积分器,则 Rogowski 线圈工作在微分状态的等效电路^[10]如图 5 所示。

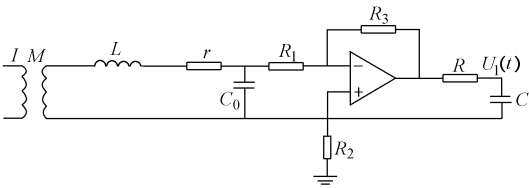


图 5 Rogowski 线圈工作在微分状态下的等效电路图
Fig. 5 Equivalent circuit of the Rogowski coil working on differential state

R_1 即为取样电阻。系统的传递函数为:

$$\frac{U_1(s)}{I(s)} = -R_3 M_s \left\{ (RCs + 1) \left[LC_0 s^2 + \left(C_0 r + \frac{L}{R_1} \right) s + \left(\frac{r}{R_1} + 1 \right) \right] R_1 \right\}^{-1} \quad (3)$$

Rogowski 线圈工作在微分状态,要求 R_1 较大,又 Rogowski 线圈的 C_0 和 L 都很小,由式(3)可知,测量回路存在振荡环节。而且,在下限频率 $f_L = 1/(2\pi RC)$ 和上限频率 $f_H = 1/(2\pi \sqrt{LC_0})$ 之间存在一输出与频率无关的区域。若按输出电压的相对误差为 1% 考虑,系统的实际工作频率范围^[10]为:

$$\Delta f = \frac{1}{2.66} f_H - \frac{10}{\sqrt{2}} f_L \quad (4)$$

由式(4)可知,系统的工作频率范围不受放大环节影响,我们只要选用工作频率范围宽的运放,积分器前的放大环节是不会影响 Rogowski 线圈的频率响应特性的。

4 校验

合理地设计 Rogowski 线圈的结构、线圈外部的金属屏蔽和回线,可以使 Rogowski 线圈的输出电压受外磁场的影响很小,且与载流导体在线圈的位置无关,故我们采用一种等安匝的校验方法,对额定电流为 100 A 的 Rogowski 线圈电流互感器进行了校验。即在 Rogowski 线圈外均匀绕上校验线圈,

如果校验线圈为 n 匝,流经校验线圈的电流为 I ,由全电流定律可知,磁场强度沿封闭曲线的线积分等于穿过这个曲线所包围的曲面的电流总和,即:

$$\oint H dl = \sum i$$

相当于线圈中心直通 nI 的电流。对这种方法可以用小的稳定的电流来模拟大电流的情形。我们对额定电流为 100 A 的 Rogowski 电流互感器做了实验,实验数据如表 1 所示。

表 1 Rogowski 线圈电流互感器测量部分测试结果
Table 1 Test results of Rogowski coil current transducer's measurement

输入电流 nI/A	输出电压/ V	角差/ (°)	比差/ (%)
120.3	4.814 0	359.97	-0.04
99.9	3.993 9	359.97	0.05
80.1	3.202 0	359.94	0.06
60.9	2.435 4	359.98	0.02
40.6	1.623 4	359.99	0.04
20.1	0.804 0	359.80	0.00
10.0	0.401 0	359.77	-0.25
5.0	0.200 2	359.95	-0.10

注:额定电流 100 A; $n = 10$ 匝。

实验证明,我们研制的额定电流为 100 A 的 Rogowski 电流互感器达到了 0.2 级电流互感器的标准。

保护部分要求从额定电流一直做到 20 倍额定电流,由于实验室无法模拟短路电流,故用等安匝法对正弦稳态电流做了模拟,实验数据如表 2 所示。

表 2 Rogowski 线圈电流互感器保护部分测试结果
Table 2 Test results of Rogowski coil current transducer's protection

输入电流 nI/A	输出电压/ V	角差/ (°)	比差/ (%)
100.6	0.225 0	359.89	0.6
606.8	1.354 3	359.82	0.8
1 214.2	2.709 1	359.80	0.8
2 024.0	4.516 8	359.77	1.0

注:额定电流 100 A; $n=200$ 匝。

实验结果说明,对于正弦稳态电流,我们的电路符合 IEC 60044-8 中 5P20 的要求,对于短路电流中非周期直流分量的测量,理论上也是可行的。

5 结语

本文介绍了一种用于小电流(≤ 100 A)测量的 Rogowski 线圈电流互感器,并给出了额定电流为 100 A 的 Rogowski 线圈电流互感器的实验数据。对于更小电流(额定电流几十 A)的测量,此种方法也

是可行的。

参考文献

- 1 聂一雄,尹项根,张哲(Nie Yixiong, Yin Xianggen, Zhang Zhe). 磁位计在电力系统继电保护中应用的可能性探讨(The Feasibility Discuss of Rogowski Coil Supply on Relay Protection). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(16): 35~38
- 2 徐雁,叶妙元,张庆,等(Xu Yan, Ye Miaoyuan, Zhang Qing, et al). 光电互感器的应用及接口问题(The Interface and Supply of Optic-electric Transducer). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(24): 45~48
- 3 Ray W F. The Use of Rogowski Coils for Low Amplitude Current Waveform Measurement. In: IEE Colloquium: Measurement Techniques for Power Electronics. Birmingham (UK): 1992
- 4 Oates C. The Design and Use of Rogowski Coils. In: IEE Colloquium: Measurement Techniques for Power Electronics. Birmingham (UK): 1992
- 5 Guo Xiaohua. Study of Digital Optical Instrument Transformers on HVDC Power Line. In: CIGRE. Wuhan: 2001
- 6 Ramboz J D. Machinable Rogowski Coil, Design and

Calibration. In: IEEE Proceedings——Integrating Intelligent Instrumentation and Control. 1995. 329

- 7 Thomas R T. High-impulse Voltage and Current Measurement. IEEE Trans on Instrumentation & Measurement, 1970, 19(2): 112~117
- 8 Pellinen D, Staggs V. A Technique to Measure High-power Electron Beam Currents. Rev Sci Instr, 1973, 44: 46~49
- 9 陈本孝(Chen Benxiao). 对交流大电流测量装置中惯性环节的误差分析(The Error Analysis for Inertial Loop of AC Large Current Measurement Device). 华中工学院学报(Journal of Huazhong University of Science and Technology), 1980, 8(4)
- 10 揭秉信(Jie Bingxin). 大电流测量(Measurement of Large Current). 北京: 机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 1987

廖京生(1978—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电子式电流互感器. E-mail: hust_liao@sina.com

郭晓华(1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为电子式电流互感器。

朱明均(1940—), 男, 副教授, 主要从事空心线圈电流互感器和各种新型传感器的研究。

ROGOWSKI COIL CURRENT TRANSDUCER FOR LOW AMPLITUDE CURRENT MEASUREMENT

Liao Jingsheng, Guo Xiaohua, Zhu Mingjun, Ye Miaoyuan, Yang Zefu
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Measuring current, which is less than 1 000 A, is usually called low amplitude current measurement overseas when using a Rogowski coil for the measurement of current. The voltage induced in the coil is very small (only several mV and several tens mV) and easily disturbed when the measured current is less than 100 A. The paper introduces a novel Rogowski coil current transducer to measure current which is less than 100 A by circuit disposing. The basic theory, the realization and the frequency responses are given. At last, test results of Rogowski current transducer, of which rated current is 100 A, prove the precision of the transducer to be grade 0.2. This method is valid when the measured current is less than 100A, even only several amperes.

Key words: Rogowski coil current transducer; low amplitude current measurement; frequency response