第 20 卷 第 11 期
2007 年 11 月

传 感 技 术 学 报
CHINESE JOURNAL OF SENSORS AND ACTUATORS

Vol. 20 No. 11
NOV. 2007

Thunder Current Measurement Using Rogowski Coil

WANG Dong-ju, ZHOU Hao *

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The shortcoming that waveform distortion exits in the use of large scope and high speed transient current measurement through current transformer; on the contrary such measurement on impluse current can be put up well with the Rogowski coil. The dynamic property of a practical coil is analyzed theoretically, and compared with the result of experiments on the coil. the conclusion that the precision which is required in the measurement on impulse current of a large scale can be satisfed through Rogowski coil is achieved.

Key words: measurement of impulse current; dynamic property; analyzing of frequency spectrum; Rogowski coil

EEACC: 1290; 2140

采用 Rogowski 线圈测量雷电冲击电流

王东举, 周 浩 *

(浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 传统电磁式 CT 应用在高频大暂态电流测量中存在波形失真的不足, 而 Rogowski 线圈可以较好地用于该类冲击电流幅值及波形的测量. 通过对一个实际 Rogowski 线圈的动态特性进行理论计算并仿真, 再与实测结果相对比. 对比分析结果表明, Rogowski 线圈在大幅度范围里对雷电冲击电流测量精度都能满足要求.

关键词: 冲击电流测量; 动态特性; 频谱分析; Rogowski 线圈

中图分类号: TM89 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-1699(2007)11-2531-04

在继电保护系统中, 常需要测量比正常运行时大得多的电流, 在这方面传统电磁式 CT 往往不能胜任. 对某一具体 CT 而言, 由于其含有铁芯, 在通过比其额定量程大得多的电流时, 铁芯就会发生饱和, 使得 CT 主副线圈中电气量不再符合线性关系, 测量结果就会与实际相差很大. 为解决这一应用中问题, 人们制作出了 Rogowski 线圈. 相对于传统电磁式 CT, 其不含有铁芯, 并且线圈不与一次导体存在电气联接关系, 因而就不存在磁饱和问题, 也不存在动力稳定与热力稳定问题. 近些年来, 人们对 Rogowski 线圈的动态特性、误差分析以及设计方案等都做了不少的研究[1-4]. 但对 Rogowski 在大范围电流幅值情况下的实际特性并未有具体研究测试. 本文对具体的 Rogowski 线圈在冲击电流从几 kA 到上百 kA 时进行试验测试, 并与理论结计算果相对照, 说明 Rogowski 线圈可以满足大雷电冲击电流测量的精度要求, 为 Rogowski 线圈在测量雷电冲击电流中应用提供了数据参考.

1 Rogowski 线圈的基本工作原理

Rogowski 线圈是一种特殊结构的空心线圈, 又称磁位计[5], 用来测量导体中通过的电流. Rogowski 线圈实质上是将一组导线绕在一个非磁性的骨架上, 线圈的两端要从同一端引出, 以减少外界电磁场对其影响. 线圈一般绕两层, 一层向前一层向后做回线, 如果线圈只绕一层, 就只用单根导线做回线. 在进行测量时, 线圈围绕被测导线放置, 单层 Rogowski 线圈结构示意如图 1 所示.

根据全电流定理, 线圈围绕的导体中通过电流 i 时, Rogowski 线圈中将产生感应电动势 $e.e$ 与 i 的

收稿日期: 2007-03-25 **修改日期:** 2007-07-12

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

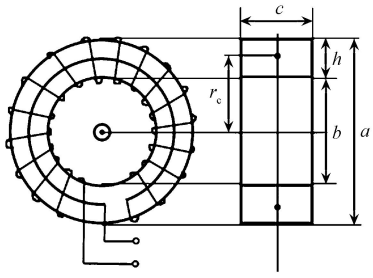

图 1 单层 Rogowski 线圈原理结构图

关系如式(1) 所示[6]:

$$e = M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式(1) 中,M 为 Rogowski 线圈与其所围导体间的互感,M 的值与线圈几何形状有关. 本试验中绕制的线圈其截面为矩形. 用 a, b, c, h, r_c 分别表示线圈的外径,内径,宽度,厚度以及等效半径,n 为线圈总匝数,μ_0 为空气中的磁导率,由于线圈的骨架为非磁性材料,其磁导率与空气很相近,故此处统一使用空气磁导率. 矩形截面[3,6-8] 的 Rogowski 线圈的互感 M 以及自感 L 分别如式(2)、(3) 所示:

$$M = \frac{n\mu_0 S}{2\pi h}\ln\left(\frac{1 + h/2r_c}{1 - h/2r_c}\right) \tag{2}$$

$$L = nM \tag{3}$$

式(2) 中,$S = hc$ 为线圈截面的面积;线圈截面为矩形时 r_c 的计算公式如式(4) 所示:

$$r_c = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{3a^2 + 3b^2 + 2ab}{2}} \tag{4}$$

Rogowski 线圈在测量时,要在其两端间加一个小电阻 R_s,线圈的等效电路如图 2 所示.

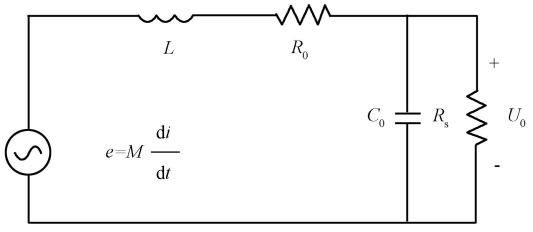

图 2 Rogowski 线圈等效电路

在图 2 中,R_0 是线圈的直流电阻,C_0 是线圈导体间分布的杂散电容[9-10],这个电容很小,只在测量 10 MHz 以上频率信号时才对测量结果有大的影响[4,11],在本试验中,考虑到所测冲击电流的主要能量集中频带并不很高,远在此频率之下,因此在计算中可忽略该杂散电容.

根据图 2 所示的等效电路,在忽略杂散电容 C_0 时推出 Rogowski 线圈的传递函数如式(5) 所示:

$$H(s) = \frac{U_0(s)}{I(s)} = \frac{R_s Ms}{sL + R_s + R_0} \tag{5}$$

由式(5) 可看出,当 $sL << (R_s + R_0)$,即线圈测量的电流频率较低时,Rogowski 线圈相当于一个微分环节,其输出电压与输入电流的微分成正比,此时要还原输入电流信号,须在输出端再加一个积分环节,该电路被称为外积分型 *Rogowski* 线圈. 当 $sL >> (R_s + R_0)$,即线圈测量的电流频率较高时,此时的 Rogowski 线圈就相当于一个比例环节,输出的电压与输入的电流成正比,还原电流信息时就不需要外加积分环节,该电路就被称为内积分型 Rogowski 线圈,这时线圈两端接的小电阻充当了电感的积分环节.

根据内积分应满足的条件,可得出内积分型线圈的低截止频率为

$$f = (R_s + R_0)/2\pi L \tag{6}$$

2 冲击电流试验参数与理论分析

2.1 设备参数

试验中待测试的 Rogowski 线圈使用非磁性的塑料作为骨架,保持线圈为空心,采用直径 0.5 mm 的漆包线均匀绕于其上,在末端串联小电阻,并将电阻两端引出屏蔽同轴电缆作为测量线. 该线圈的几何参数为: $a = 0.22$ m, $b = 0.074$ m, $c = 0.138$ m, $h = (b - a)/2 = 0.073$ m, $n = 277$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. 可根据式(2),(3),(4) 计算出线圈的互感 $M = 7.771$ μH,自感 $L = 2.153$ mH. 用万用表测出线圈自身电阻 $R_0 = 9.87\ \Omega$,线圈两端接小电阻 $R_s = 0.55\ \Omega$. 根据这些参数,可以由式(6) 计算出该线圈的内积分低截止频率为 770 Hz. 试验设备如图 3 所示.

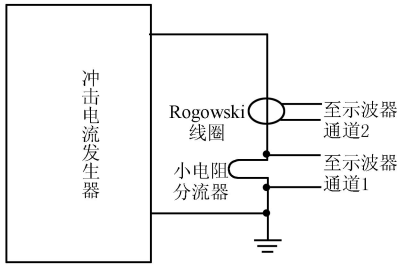

图 3 试验原理图

试验采用的数字示波器型号为 TDS-3012 型,采样频率 100 MHz,采样持续时间为 100 μs. 冲击电流发生器产生 4/10 μs 的冲击电流波. 信号传输线使用两根完全相同的同轴电缆,其匹配阻抗均为 75 Ω.

2.2 标准雷电波频谱分析

双指数模型下 4/10 μs 冲击电流波的频谱分析图如图 4 所示,可以看出该冲击波的主要能量分布在 400 kHz 以下[12]. 另外,该试验的数据采样段的

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

持续时间为 100 μs,因此在本试验中只需对 10 kHz 至 400 kHz 的信号分量进行分析. 这个分析频段远高于该 Rogowski 线圈的内积分成立条件频率 770 Hz,因此,在测试中完全可将该线圈作为内积分型来分析.

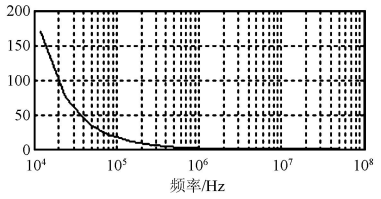

图 4　双指数波频谱分布图

2.3　Rogowski 线圈相频特性

将线圈的参数代入传递函数式(5),作出该线圈的相频特性曲线如图 5 所示.

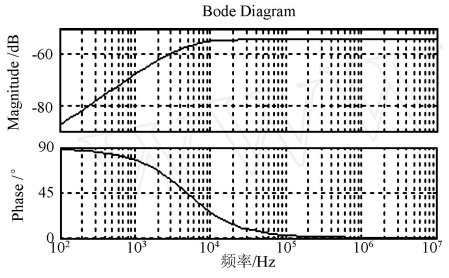

图 5　Rogowski 线圈相频特性图

由相频特性图可以得到该线圈在 10 kHz 至 400 kHz 频段的增益为 - 54 dB,相移基本为零,可以认为此频段下的传递函数是一个比例函数.

3　试验测试结果

使用冲击电流发生器产生一组冲击电流,分别利用圆筒式小电阻分流器与该 Rogowski 线圈测量该冲击电流,记录下两种传感器输出的波形,并以分流器测量结果为基准,对同一电流的两个波形做对比,再进行频谱相位分析. 其中幅值为 31.4 kA 与 67.7 kA 的冲击电流波形及频谱分析图如图 6,图 7 所示.

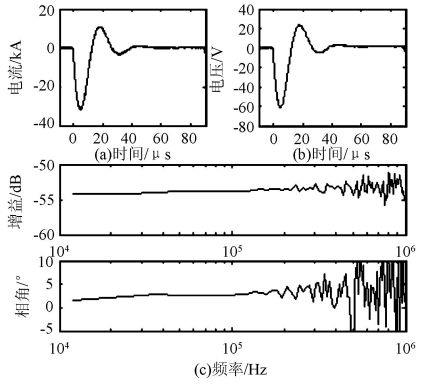

图 6　31.4kA 冲击电流实测及频谱分析图

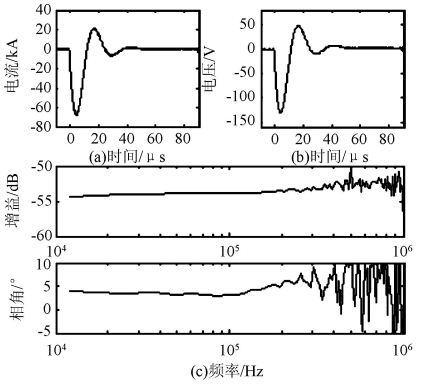

图 7　67.7kA 冲击电流实测及频谱分析图

用小电阻分流器记录下的冲击电流波形为图 6(a)与 7(a),Rogowski 线圈输出的电压波形为图 6(b)与图 7(b),对该线圈的实际频谱分析为图 6(c)与图 7(c). 同时可以计算出,在主电路通过幅值为 31.4 kA 的冲击电流时,该 Rogowski 线圈在 10 kHz 至 400 kHz 的频段内的平均增益为 - 53.6 dB,相移为 3.1°;在通过幅值为 67.7 kA 的冲击电流时,线圈在该频段内的平均增益为 - 53.5 dB,相移为 5.0°. 全部试验测试结果如表 1 所示.

表 1　试验测试结果

冲击电流幅值/kA	波头时间/μs	波尾时间/μs	平均增益/dB	平均相差/°
0.4	4.18	10.3	- 53.0	1.1
0.7	4.16	10.3	- 53.7	2.2
1.1	4.15	10.4	- 53.3	2.6
2.1	4.13	10.3	- 53.4	2.5
5.4	4.1	10.2	- 53.5	2.4
8.0	4.09	10.2	- 53.5	2.3
15.9	4.08	10.1	- 53.5	2.3
21.3	3.86	9.6	- 54.3	- 3.5
31.4	4.10	10.2	- 53.6	3.1
43.0	3.83	9.6	- 54.9	- 1.6
51.1	3.83	9.6	- 53.7	4.9
67.7	3.84	9.5	- 53.5	5.0
84.4	3.90	9.6	- 53.0	7.1
100.7	4.26	10.4	- 53.6	3.8

由于冲击电流的主要频率分量都集中在 10 kHz 至 400 kHz 的频段内,从表 1 试验结果可看到,幅值的增益在理论计算值 - 54 dB 上下 1 dB 的范围内变化,相移幅值在 10°以内. 因此,以上的试验结果说明 Rogowski 线圈对 4/10 μs 冲击电流波波形的还原能力是相当好的,而且传变增益实测结果与理论计算值 - 54 dB 吻合得也很好. 考虑到在试验中,导体穿过线圈与线圈轴的位置有偏离,并且该测试用线圈的绕制并不可能非常均匀,这些都会对线圈在实际使用中的测量结果造成影响[13-14]. 另

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

外,从图 6(c),图 7(c)的频谱分析图可以看出,在 200 kHz 以下的频段内,无论是增益曲线还是相移曲线都非常平稳,只是在 200 kHz 以上时,才有相对较大的波动,这是因为试验中使用的冲击电流波在 200 kHz 以上的高频分量已经很小,外界的影响很容易使高频分量的幅值发生相对大的误差,但对于整个电流冲击波形还原来说,高频部分的引起误差可以忽略. 这里的波形还原只对于波头长度在 1 μs 以上的冲击波来说,而由于自然界中变化最快的电流波脉冲雷电波的波头最短也在 1 μs 以上,因此,用 Rogowski 线圈测量雷电流,其精度已经可以满足需要. 但如果要测量变化更快的电流波脉冲,本试验中使用的线圈很可能就无法满足要求了,此时就需要对 Rogowski 线圈结构有更高的要求,如线圈尺寸要紧凑,骨架温度膨胀系数更低,并且设计中还需要考虑杂散电容的影响[11],本文只对雷电冲击电流的测量进行研究,更快速的脉冲测量可参考相关文献.

4 结语

对自积分型 Rogowski 线圈的实测数据说明,该线圈在雷电冲击电流的主要能量分布频段 10～400 kHz 内呈现理想的比例特性,理论计算与实际测量数据仍符合得很好,Rogowski 线圈在大范围幅值内都可以准确还原冲击电波波形,其幅值最大误差不超过 10 %,相角偏移误差不超过 10 °,满足冲击电流测量要求. 在传感器实际生产中,线圈绕制可做到更加均匀规范,并可以增加完整的屏蔽外壳,这些措施会使 Rogowski 线圈的测量精度进一步提高.

参考文献:

[1] 张红岭,王海明,郑绳楦. Rogowski 线圈的结构与电磁参数的研究[J]. 高电压技术,2006,32(6):21-24.

[2] 陈景亮,姚学玲,孙伟. 两种典型 Rogowski 线圈的研制[J]. 高电压技术,2004,30(7):14-16.

[3] 孔庆源,戴敏. 冲击电流测量中 Rogowski 线圈的应用[J]. 高电压技术,2005,31(11):6-7.

[4] 聂一雄,韩小涛,程汉湘,等. Rogowski 线圈的动模实验研究[J]. 继电器,2006,34(19),11-17.

[5] 聂一雄,尹项根,张哲. 磁位计在电力系统继电保护中应用的可行性探讨[J]. 电力系统自动化,2000,12(16):35-38.

[6] 李维波,毛承雄,陆继明,等. Rogowski 线圈的结构、电磁参数对其性能影响的研究[J]. 高压电器,2004,40(2):94-97.

[7] 李维波,毛承雄,陆继明,等. 分布电容对 Rogowski 线圈动态特性影响研究[J]. 电工技术学报,2004,19(6):12-17.

[8] 黄浩,陆继明,毛承雄,等. Rogowski 线圈结构参数仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2004,16(3):72-75.

[9] 李伟凯,郑绳楦. 高压电压互感器精密电容分压器的研究与设计[J]. 传感技术学报,2005,18(3):634-637.

[10] 于静,李国林,方少军. 目标导体对近感电容传感器电极电容影响研究[J]. 传感技术学报,2006,19(3):746-749.

[11] 王珏,张适昌,严萍,等. 用自积分式罗氏线圈测量纳秒级高压脉冲电流[J]. 强激光与粒子束,2004,16(3):399-403.

[12] 梁瑜,蒋兴良,杨庆,等. 雷电流测量用 Rogowski 线圈频谱特性分析[J]. 高电压技术,2005,31(5):18-20.

[13] 申烛,钱政,罗承沐,等. Rogowski 线圈测量误差分析和估计[J]. 高电压技术,2003,29(1):6-8.

[14] 陈庆,李红斌,张明明,等. 3 种 Rogowski 线圈的设计及其性能分析[J]. 仪表技术与传感器,2005,7:54-55.

王东举(1984-),河南人,硕士研究生,研究方向为电力系统过电压与故障定位;

周 浩(1963-),浙江人,副教授,博士,从事电力系统过电压及其保护研究,zhouhao_ee @zju. edu. cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net