

一种用于绝缘子泄漏电流在线监测的 宽频带微电流传感器的特性研究

陈攀, 孙才新, 米彦, 姚陈果, 肖立

(重庆大学高电压及电工新技术教育部重点实验室, 重庆市沙坪坝区 400044)

RESEARCH OF BROAD BANDWIDTH MICRO-CURRENT SENSOR CHARACTER FOR INSULATOR LEAKAGE CURRENT MONITORING SYSTEM

CHEN Pan, SUN Cai-xin, MI Yan, YAO Chen-guo, XIAO Li

(Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry of Education,
Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: A type of high bandwidth micro-current sensor designed for online monitoring of insulator is described. According to the equivalent circuit model, the effects of sensor coiling number, stray capacitance and loading resistance on pass-bandwidth and sensitivity are discussed. The academic lower limit of the sensor is nearly zero and the upper limit is infinite, which are proved by the analysis of electronic circuit and the simulation by saber. The test of the current sensor shows that the sensor can be used in most HV insulation system with broad pass-bandwidth, high linearity, high sensitivity and no contact.

KEY WORDS: Insulator; On-line monitoring; Current sensor; Broad bandwidth; Cross-core

摘要: 文中描述了一种宽频带微电流传感器, 根据传感器的等效电路模型, 针对研制的一种用于绝缘子在线监测的穿芯式宽频带微电流传感器, 研究了线圈匝数、杂散电容和负载电阻的变化对通频带宽及灵敏度的影响。通过传感器电子电路的分析和 saber 仿真发现, 在理想情况下, 传感器低频下限近似为零, 高频上限为无穷大。测试表明: 该传感器具有通频带宽、线性度好、灵敏度高、无接触等优点, 为高压绝缘在线监测系统提供了一种新的微电流传感器。

关键词: 绝缘子; 在线监测; 电流传感器; 宽频带; 穿芯式

1 引言

近年来, 随着电力设备状态监测技术的发展, 微电流(毫安、微安级)传感器应用越来越广泛。而单匝穿芯式微电流传感器由于其原副边隔离, 对设备接线无影响等特点, 成为高压绝缘设备在线监

测用电流传感器的首选^[1-2]。对于此种电流传感器, 要求其精确度高, 有良好的抗电磁干扰能力和长时间的稳定性。由于高压输电线路污秽绝缘子泄漏电流变化范围很大(几微安~几百安), 因此还要求传感器有较大的动态范围^[3]; 同时由于绝缘子局部放电脉冲信号包含的频谱很宽, 因此要求传感器具有较宽的频带(几赫兹~几十兆赫兹)、良好的瞬态响应和线性度^[4-5], 此外为使在线监测系统安装方便, 采用钳式穿芯结构。传感器磁芯气隙的存在使得现已实际应用的穿芯电流传感器基本上难以达到上述的性能要求^[6], 因此本文针对实际技术难题, 通过传感器电子电路的选择, 使带气隙的钳式穿芯电流传感器具备了上述优良性能, 满足了实际工程需要。

2 宽频带电流传感器的电路设计原理

2.1 电流传感器幅频特性分析

绝缘子泄漏电流的在线监测除了要测量工频泄漏电流外, 还要准确地提取污秽放电过程中的局部放电脉冲信号, 而脉冲信号包含的频谱范围很宽, 因此要求电流传感器工作频带宽, 且下限截止频率低于工频。穿芯式小电流互感器的结构如图 1(a)所示, 气隙可以等效为磁芯磁导率的降低, 不影响幅频特性的理论分析, 图 1(b)为电流传感器等效电路图^[7]。

在图 1 中, M 为线圈的互感; L_s 为线圈的自感; C_s 为线圈的等效杂散电容; R_s 为线圈的等效电阻; R 为线圈的积分电阻(与电感 L_s 组成积分电路);

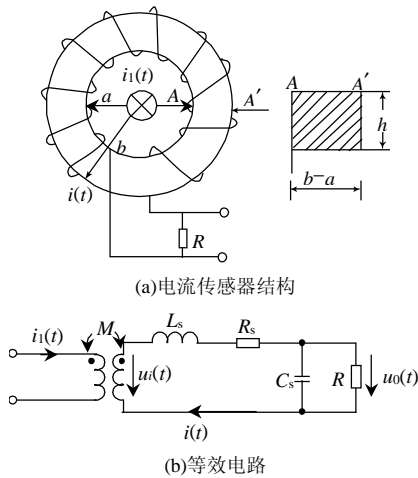


图 1 电流传感器原理

Fig.1 Principle of current sensor

$u_i(t)$ 为互感产生的电势； $u_0(t)$ 为线圈积分电阻上产生的电压。根据图 1(b) 所示的等效电路，可以列出电路方程为^[8]

$$u_i(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} \tag{1}$$

$$u_i(t) = L_s \frac{di(t)}{dt} + R_s i(t) + u_0(t) \tag{2}$$

$$i(t) = C_s \frac{du_0(t)}{dt} + \frac{u_0(t)}{R} \tag{3}$$

式(2)、(3)消除 $i(t)$ ，可以得到

$$L_s C_s \frac{du_0^2(t)}{dt^2} + (R_s C_s + \frac{L_s}{R}) \frac{du_0(t)}{dt} + (1 + \frac{R_s}{R}) u_0(t) = u_i(t) \tag{4}$$

对式(1)、(4)做拉氏变换并化简，得到

$$L_s C_s s^2 + (R_s C_s + \frac{L_s}{R}) s + (1 + \frac{R_s}{R}) U_0(s) = M s I_1(s) \tag{5}$$

在零初始条件下，传感器电路的传递函数为

$$G(s) = \frac{U_0(s)}{I_1(s)} = \frac{M s}{L_s C_s s^2 + (R_s C_s + \frac{L_s}{R}) s + \frac{R_s}{R} + 1} \tag{6}$$

所以，在正弦稳态信号作用下，有

$$G(j\omega) = \frac{U_0(s)}{I_1(s)} = \frac{j\omega M}{-R L_s C_s \omega^2 + j\omega(R R_s C_s + L_s) + R_s + R} \tag{7}$$

由式(7)可以得到电流传感器的幅频特性为

$$|G(j\omega)| = \frac{MR}{L_s + R R_s C_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + [\omega \cdot \frac{L_s R C_s}{L_s + R R_s C_s} - (\omega \cdot \frac{L_s + R R_s C_s}{R + R_s})^{-1}]^2}} \tag{8}$$

电流传感器的自感和互感分别为^[9]

$$L_s = m \cdot \frac{N^2 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \tag{9}$$

$$M = m \cdot \frac{N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \tag{10}$$

式中 m 为相对磁导率； N 为副边线圈的匝数； h 为线圈高度； b 为线圈外径； a 为线圈内径。

因 $L_s \gg R R_s C_s$ ，由式(8)可以得到传感器的上下限截止频率和带宽。

上限截止频率为

$$f_h = \frac{L_s + R R_s C_s}{2\pi L_s R C_s} \approx \frac{1}{2\pi R C_s} \tag{11}$$

下限截止频率为

$$f_l = \frac{R + R_s}{2\pi \cdot (L_s + R R_s C_s)} \approx \frac{R + R_s}{2\pi L_s} \tag{12}$$

工作频带宽度为

$$B = f_h - f_l = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{L_s + R R_s C_s}{L_s R C_s} - \frac{R + R_s}{L_s + R R_s C_s} \right) \tag{13}$$

传感器要获得较大的带宽， f_h 应尽量大，而 f_l 应尽可能小^[10]。由式(11)、(12)可知，应使 L_s 尽可能大， R 尽可能小。由式(9)可见，线圈电感 L_s 与线圈磁芯的磁导率 m ，线圈高度，线圈内外半径的长度及线圈的匝数有关。线圈匝数 N 增加， L_s 增大，电流传感器的频带变宽，但响应灵敏度将下降^[11]。在磁芯材料和线圈尺寸确定以后，传感器的频带宽度和灵敏度将主要决定于积分电阻和线圈匝数，由式(11)~(13)可见，积分电阻 R 决定着传感器的低频下限和高频上限， R 越小，下限截止频率越低，同时上限截止频率越高，即工作频带越宽，但是积分电阻减小将会使传感器的输出电压下降，很难被准确测量。既要保证传感器有足够的灵敏度，又要保证较宽的频带对于传统方法来说是很难实现的^[12]。

2.2 电流传感器电路设计原理

在传感器磁芯材料和线圈尺寸确定后，为了得到较宽的工作频带，必须降低积分电阻，同时还要保证积分电阻上输出的电压信号足够大^[13]。为此，采用以下的传感器电路原理，如图 2 所示。

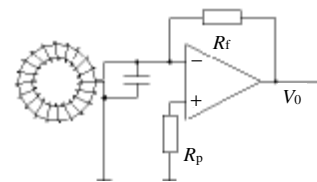


图 2 改进型电流传感器电路图
Fig.2 Circuit of improved current sensor

该电路中的运放电路组成 I-V 转换电路, 传感器等效电路如图 3 所示, 其中 I-V 转换电路等效为电流控电压源。

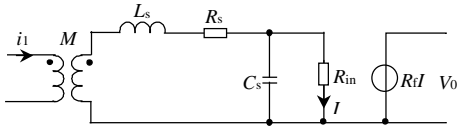


图 3 改进型电流传感器等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of improved current sensor

由图 3、图 1、式(8)可得改进后传感器幅频特性为

$$|G(j\omega)| = \frac{MR_f}{L_s + R_{in}R_sC_s} \cdot \frac{1}{[1 + (\omega \cdot \frac{L_s R_{in} C_s}{L_s + R_{in} R_s C_s} - (\omega \cdot \frac{L_s + R_{in} R_s C_s}{R_{in} + R_s})^{-1})^2]^{1/2}} \quad (14)$$

式中 R_f 为运放反馈电阻; R_{in} 为运放输入电阻 (理想情况下为 0), 由式(14)可以得到改进后传感器的上下限截止频率分别为

上限截止频率

$$f_h = \frac{L_s + R_{in}R_sC_s}{2\pi L_s R C_s} \approx \frac{1}{2\pi R_{in} C_s} \quad (15)$$

下限截止频率

$$f_l = \frac{R_{in} + R_s}{2\pi \cdot (L_s + R_{in}R_sC_s)} \approx \frac{R_{in} + R_s}{2\pi L_s} \quad (16)$$

由式(14)~(16)可知, 运放构成 I-V 电路, 通过调节 R_f 可方便地调节输出电压 V_0 的大小, 同时不影响传感器幅频特性。由于运放构成的 I-V 电路 (电流-电压转换电路) 输入阻抗 R_{in} 极小, 由式(14)、(15)可见传感器的低频得到很大延伸, 同时极小的 R_{in} 与穿芯线圈的等效杂散电容 C_s 相并联, 使得 C_s 的旁路作用大大降低, 于是传感器的高频也得到很大的延伸^[4]。穿芯线圈的自感 L_s 只有在频率很低时才与运放输入阻抗相比拟, 这就使得传感器不要求过多的匝数就可以保证较小的低频下限, 从大量的试验中可知线圈匝数取 100 匝左右既可保证较高的灵敏度, 又可保证较宽的通频带, 同时使得传感器外屏蔽非常容易。极小的 R_{in} 还使得磁芯磁性性能下降, 对传感器的影响大大降低, 这就降低了对磁芯的要求, 使得传感器的造价大大降低, 同时传感器在户外长期使用的性能随时间的变化也大大降低。所以用造价低廉的铁氧体磁芯也可以获得很好的效果, 而仿真和实验也得到了验证^[14-15]。

3 传感器幅频特性仿真与测试

3.1 幅频特性仿真

为了验证上述的理论推导, 利用图 1(a)、图 2 所示电路模型分别对穿芯式电流传感器改进前和改进后的幅频特性, 进行了 saber 小信号交流仿真, 结果如图 4、图 5 所示。

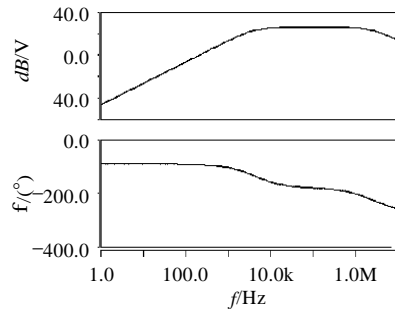


图 4 改进前幅频特性

Fig. 4 Original amp-frequency character

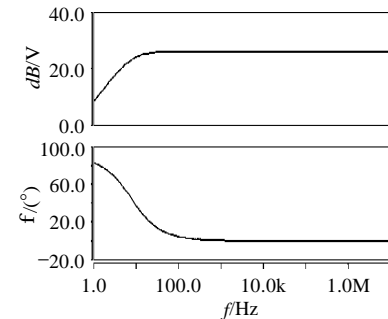


图 5 改进后幅频特性

Fig. 5 Advanced amp-frequency character

由图 4、图 5 可见, 经过 I-V 电路处理后, 穿芯式传感器的频率响应曲线的低频下限和高频上限均得到了很大的延伸, 且低频下限小于 10Hz, 高频上限到 10MHz 也没有明显的衰减, 相位特性也得到了很大的改善, 且在相当宽的频带内相位差都接近于零。

3.2 传感器幅频特性测试

测试用电流传感器采用环形铁氧体磁芯 ($m=2000$), 截面为方形, 传感器为 90 匝, 函数发生器采用 Tektronix 公司的 CFG280, 示波器用 Tektronix 公司的 TDS320B, 带宽为 300MHz。为了测试传感器的高频和低频特性以及传感器的灵敏度, 在实验室条件下, 分别对脉冲信号、30Hz 低频方波信号、10Hz 正弦信号、高频正弦信号以及微电流正弦信号进行了测量, 图 6 为传感器测试结果, 其中上曲线为函数发生器输入电压信号, 用于产生传感器穿芯电流; 下曲线为传感器输出电压信号。

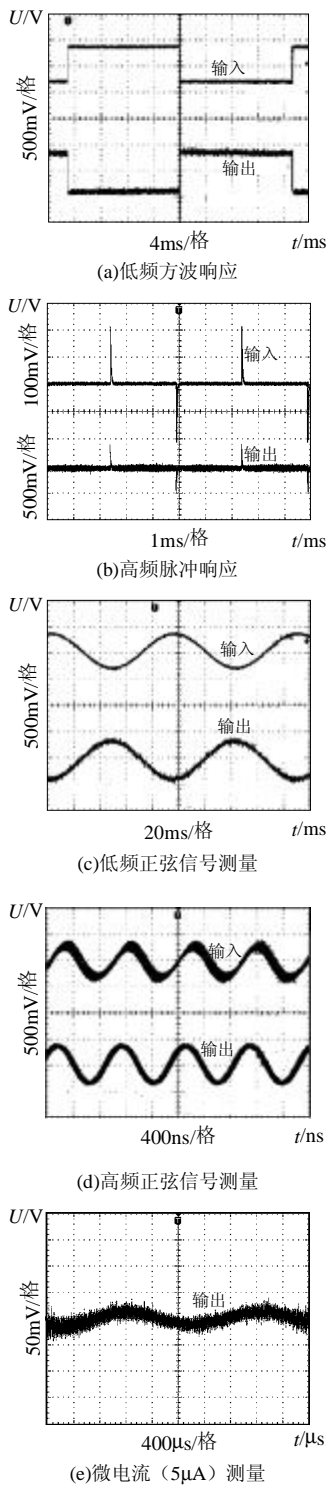


图 6 传感器幅频特性测试

Fig.6 Amp-frequency character test of current sensor

由图 6 可见，传感器对 10Hz 超低频正弦信号和 30Hz 方波信号的响应都没有任何衰减，说明传感器的低频下限仅为几赫兹；而传感器对 1MHz 的高频信号的响应与低频信号的响应吻合，可知传感器的高频上限在 1MHz 以上。实际上通过实验室模拟试验表明传感器在 20MHz 的高频信号下仍然有

较好的高频特性。图 6(e)为 5 μ A 微电流测量信号，虽然干扰较严重，但是可以确定传感器确实取出了穿芯导线的微弱电流信号。

4 污秽绝缘子局部放电信号测量

利用所研制的传感器和绝缘子泄漏电流在线监测系统，在人工气候实验室对 10kV 污秽合成绝缘子的泄漏电流和局部放电信号进行了实测。图 7 为测得的泄漏电流信号，图 8 为测得的局部放电信号。经验证传感器对绝缘子泄漏电流和局部放电信号的极性、相位和幅值都能正确传递，波形失真度也较小。由于工作频带较宽，为了防止干扰信号对监测信号的影响，采用良好的滤波技术和适当的抗干扰措施是非常必要的。

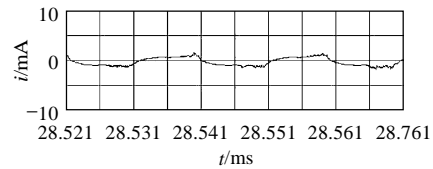


图 7 监测到的泄漏电流波形
Fig.7 Leakage current waveform

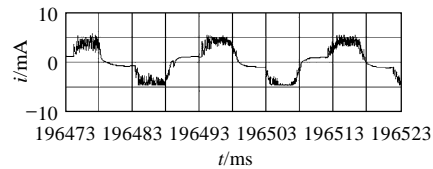


图 8 监测到的局部放电电流波形
Fig.8 Partial discharge current waveform

5 结论

对微电流传感器通频带宽影响最大的是负载电阻及其杂散电容，对灵敏度影响最大的是线圈匝数和负载电阻。绝缘子在线测量用宽频带微电流传感器可等效为带有负载电阻的互感元件，在线圈尺寸和磁芯材料一定的情况下，通过电子电路的设计及线圈匝数的合理选取，既可延伸传感器的通频带，同时也保证了足够高的灵敏度。通过实验验证，该传感器能够准确的传递被监测信号，为绝缘子泄漏电流在线监测和放电模式识别提供了可靠的手段。

参考文献

[1] 吴广宁, 马积勋. 大型电机局部放电在线监测用宽频电流传感器及应用的研究[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(6): 8-13.
Wu Guangning, Ma Jixun. Research of wide frequency current sensor for online PD monitoring on large electromotor[J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 1996, 30(6): 8-13.

- [2] Bartnikas R. Detection of partial discharges (corona) in electrical apparatus[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1990, 25(1): 111-124.
- [3] 唐炬, 宋胜利, 孙才新, 等. 用于局部放电在线监测的高频微电流传感器[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(5): 520-524.
Tang Ju, Song Shengli, Sun Caixin *et al.* High frequency micro-current sensor for online PD monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(5): 520-524.
- [4] 贺景亮. 复合型小电流传感器研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 46-49.
He Jinliang. A study of compound mini-current sensors[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 46-49.
- [5] 鲍海, 余保东, 杨以涵. 双级零磁通电流互感器状态反馈控制研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 12-14.
Bao Hai, Yu Baodong, Yang Yihan. Researching on states feedback control of two-stage flux current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(2): 12-14.
- [6] 罗苏南, 叶妙元, 徐雁. 光纤电压互感器稳定性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 15-19.
Luo Sunan, Ye Miaoyuan, Xu Yan. Stability research on optical fiber voltage transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 15-19.
- [7] 鲍海, 杨以涵. 宽量程电流互感器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 67-71.
Bao Hai, Yang Yihan. Research on the control method of wide range measurement current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 67-71.
- [8] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 1085-113.
Luo Sunan, Tian Zhaobo, Zhao Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 1085-113.
- [9] 胡晓光, 于文斌. 电流互感器的暂态仿真及其铁芯饱和的小波分析[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 58-61.
Hu Xiaoguang, Yu Wenbin. Transient simulation of current transformer and wavfint analysis of its core saturation[J]. Power system Technology, 2001, 25(11): 58-61.
- [10] 李一泉, 何奔腾, 黄瀛. 基于电容式电压互感器暂态误差估计的自适应距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 72-76.
Li Yiquan, He Benteng, Huang Ying. An adaptive distance relay based on transient error estimation of CVT[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 72-76.
- [11] Tziouvaras D A, McLaren P, Alexander G *et al.* Mathematical models for current, voltage and coupling capacitor voltage transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 62-72.
- [12] 王国利, 郑毅, 郝艳捧, 等. 用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 154-160.
Wang Guoli, Zheng Yi, Hao Yanpeng *et al.* Study on the ultra-High-frequency sensors for PD detection in power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 154-160.
- [13] 孙才新, 舒立春, 蒋兴良. 高海拔、污秽、覆冰环境条件下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 15-20.
Sun Caixin, Shu Lichun, Jiang Xingliang. AC/DC flashover performance and its voltage correction of UHV insulators in high altitude and icing and pollution environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 15-20.
- [14] 李国富, 王福兴. 互感式脉冲电流传感器的研制[J]. 电网技术, 1997, 21(4): 13-18.
Li Guofu, Wang Fuxing. Development of pulse current sensor [J]. Power System Technology, 1997, 21(4): 13-18.
- [15] 徐叔梅. 光导纤维电流传感器[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 79-82.
Xu Shumei. Review on current transducer based on optical fiber [J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 79-82.

收稿日期: 2005-06-25。

作者简介:

陈攀(1980-), 男, 硕士研究生, 从事输电线路绝缘子泄漏电流远程在线监测与智能化诊断研究;

孙才新(1944-), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 长期从事电工新技术及其在生物医学中的应用研究, 电气设备在线监测及故障诊断技术与工程应用研究, 复杂环境中的电气外绝缘技术与工程应用研究;

米彦(1978-), 男, 博士研究生, 从事电工新技术及其在生物医学中的应用研究;

姚陈果(1975-), 男, 博士, 副教授, 从事电工新技术及其在生物医学中的应用, 输电线路绝缘子泄漏电流在线监测研究。