

文章编号: 1001-2486 (2001) 04-0059-04

电力设备局部放电在线监测用传感器传输特性分析*

刘少克

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 电流传感器是电力设备局部放电在线监测系统中的一个重要组成部分, 其局部放电信号传输特性直接影响测量结果。本文对电流传感器传输特性进行了理论分析, 有关分析结果与实测结果一致。

关键词: 电力设备; 在线监测; 传感器; 局部放电

中图分类号: TM3; TM8 **文献标识码:** A

Transfer Characteristic Analysis of Sensor for On-line PD Current Monitor of Electric Power Equipment

LIU Shao-ke

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Current sensor is an important element for on-line PD monitor of electric power equipment and its transfer characteristic has a direct influence on PD measurement. The paper shows the analysis of the transfer characteristic of current sensor and the result of theoretical analysis agrees with that of the experiment.

Key words: electric power equipment; on-line monitor; sensor; partial discharge

局部放电在线监测作为一种线圈绝缘检测方法, 由于在提高关键电力设备运行可靠性方面起着举足轻重的作用, 越来越受到人们的重视。采用电流传感器的局部放电在线监测方法是人们普遍采用的两种方法之一^[1]。由于电流传感器在整个监测系统中起着信号的摄取作用, 故其信号传输特性直接影响局部放电的测量结果。尽管广大学者在电流传感器的局部放电在线监测中做了大量的工作, 但是对传感器信号传输特性分析的报道很少^[2]。本文对电流传感器传输特性进行了理论分析, 有关分析结果与实测结果一致。

1 电流传感器一般等效电路

在局部放电 (PD) 在线监测过程中, 采用特制的电流互感器作为传感器, 这种电流传感器采用环状铁心, 电力设备线圈中性接地线或高压端引出线直接穿过环中心, 其上流过的 PD 电流信号为待获取信号, 在环上缠绕的多匝线圈感应电势作为传感器输出。当电流传感器工作时, 线圈绝缘产生的局部放电脉冲电流在传感器的原方流过, 由于原、副方绕组的静电和电磁感应, 而将这种脉冲电流传输到副方。有关分析指出由原方绕组通过电容耦合到副方绕组的信号分量很小, 而主要是通过铁心以电磁耦合的方式传输到副方绕组的。

从变压器理论出发, 我们可得到两种描述电流传感器的等效电路图 1 和图 2。图 1 为基于电压源观点等效电路, 图 2 为基于电流源观点等效电路。图中 r_1 、 $L_{1\sigma}$ 分别为原方绕组电阻和漏电感, r_2' 、 $L_{2\sigma}'$ 分别为副方绕组电阻和漏电感折算值, $C_{2\sigma}'$ 为副方绕组分布电容折算值。 L_m 为磁化电感, 用来考虑传感器的主磁通, 电阻 R_m 为用来考虑传感器铁心中的磁滞与涡流损耗的等效电阻, R_L' 为副方绕组外接电阻折算值。

* 收稿日期: 2001-03-23

作者简介: 刘少克 (1963-), 男, 副教授, 博士。

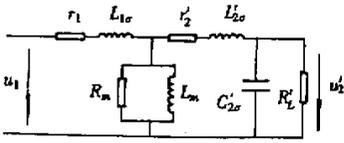


图 1 基于电压源观点等效电路

Fig.1 Equivalent circuit based on voltage source viewpoint

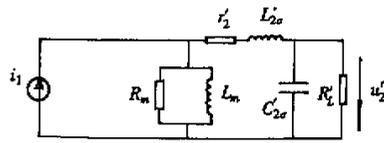


图 2 基于电流源观点等效电路

Fig.2 Equivalent circuit based on current source viewpoint

2 忽略损耗和励磁电流

当略去损耗和励磁电流时,由传感器的等效电路图 1 可得到描述输出 u_2 、输入 u_1 关系的方程为:

$$L_{\sigma}C'_{2\sigma} \frac{d^2 u_2}{dt^2} + \frac{L_{\sigma}}{R'_L} \frac{du_2}{dt} + u_2 = Nu_1 \quad (1)$$

式(1)中 $L_{\sigma} = L_{1\sigma} + L'_{2\sigma}$ 。假设 u_1 为阶跃输入电压,对式(1)的分析指出: $R'_L C'_{2\sigma}$ 值越小,电流传感器对阶跃脉冲瞬态响应越好。但对于电流传感器的副方绕组,一般匝数越多, $C'_{2\sigma}$ 愈大。当副方绕组匝数取得较多时,为了保持较小的 $R'_L C'_{2\sigma}$ 值,外并电阻 R_L 要选得较小。但不利的是 R_L 越小,在同样输入下副方输出也愈低。

3 考虑损耗和励磁电流

考虑损耗和励磁电流时,基于图 1 电压源观点,我们可得到传感器电压传递函数为:

$$H_u = U_{\Sigma}(s) / U_1(s) \quad (2)$$

基于图 2 电流源观点,我们同样可得到传感器电流传递函数为:

$$H_i = U_{\Sigma}(s) / I_1(s) \quad (3)$$

对于电力设备线圈绝缘 PD 在线监测用电流传感器,一般满足 $L_m \gg L'_{2\sigma}$, $r'_2 C'_{2\sigma} \ll 1$, 其外并电阻一般满足 $R'_L \gg r'_2$, $R'_L R_m \gg r'_2 L_m$ 。同时考虑到 PD 电流传感器的结构形式,一般其 $C'_{2\sigma}$ 为 pF 数量级, $L'_{2\sigma}$ 为 μH 数量级,除甚高频情况外, $\omega^2 L'_{2\sigma} C'_{2\sigma} \ll 1$, 在上述条件下,利用拉普拉斯运算算法,并进行简化,最终得到频率 ω 正弦稳态下传感器电流传递函数幅频和相频特性。

幅频特性: $H_i = |H_i(j\omega)|$, 即

$$H_i = \frac{NR_m R'_L L_m \omega}{\sqrt{[R_m R'_L - \omega^2 L_m (R'_L C'_{2\sigma} R_m + L'_{2\sigma})]^2 + [L_m (R_m + R'_L) \omega]^2}} \quad (4)$$

相频特性: $\theta_i = \theta_{u2} - \theta_{i1}$, 即

$$\theta_i = \arctan \frac{R_m R'_L - \omega^2 L_m (R'_L C'_{2\sigma} R_m + L'_{2\sigma})}{L_m (R_m + R'_L) \omega} \quad (5)$$

由式(4)可得电流传递函数幅值谐振频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_m R'_L}{L_m (R'_L C'_{2\sigma} R_m + L'_{2\sigma})}} \quad (6)$$

在谐振频率处,传递函数的相角 $\theta_i = 0$ 。

$$H_i \text{ 的最大值为 } H_{i\max} = \frac{NR_m R'_L}{R_m + R'_L} \quad (7)$$

值 $20 \log |H_i / H_{i\max}|$ 为电流传递函数幅值下降的 dB 数,其 3dB 低频段下限截止频率为

$$\omega_{iL} = \frac{R_m R'_L}{L_m (R_m + R'_L)} \quad (8)$$

其 3dB 高频段上限截止频率：

$$\omega_{iH} = \frac{R_m + R'_L}{R'_L C'_{2\sigma} R_m + L'_{2\sigma}} \quad (9)$$

由式(7)~(9)可以看出, R_L 的引入使 ω_{iL} 降低、 ω_{iH} 变大(尤其当 $R_m \gg R'_L$ 时), 它说明 R_L 的引入, 拓宽了电流传感器的幅值工作频带。同样可以看出, 当 R_L 值一定时, ω_{iL} 主要由 L_m 决定; 而 ω_{iH} 主要由 $L'_{2\sigma}$ 、 $C'_{2\sigma}$ 决定。也就是说, 主电感 L_m 决定了传感器电流传递函数 H_i 幅值低频段的频率响应; 而漏电感 $L'_{2\sigma}$ 、分布电容 $C'_{2\sigma}$ 决定了高频段的频率响应。这里要指出的是当匝数一定时, $L'_{2\sigma}$ 、 $C'_{2\sigma}$ 两者呈反比例趋势变化, 故此, 要同时减小 $L'_{2\sigma}$ 、 $C'_{2\sigma}$ 是困难的。

对于用于实际 PD 监测装置的电流传感器来说, 其电流传递特性除了必须满足幅频特性要求外, 还必须满足相频特性要求。定义 θ_L 、 θ_H 分别为电流传感器的低频和高频段允许相移, 则从相移的角度, 同样可得到电流传感器的低频下限截止频率 $\omega_{\theta L}$ 和高频上限截止频率 $\omega_{\theta H}$ 。

$$\omega_{\theta L} = \frac{R_m R'_L}{L_m (R_m + R'_L) \tan \theta_L} \quad (10)$$

$$\omega_{\theta H} = \frac{(R_m + R'_L) \cdot \tan \theta_H}{R'_L C'_{2\sigma} R_m + L'_{2\sigma}} \quad (11)$$

式(10)~(11)表明, R_L 、 L_m 、 $L'_{2\sigma}$ 、 $C'_{2\sigma}$ 等参数对相频特性上下限截止频率的影响, 与其对幅频特性上、下限截止频率的影响一致, 这说明导致幅频特性变化的因素, 同样也导致了其相频特性的变化。

式(8)~(11)分别就传感器的电流传递函数允许幅值衰减与相移定义了上下限截止频率, 在幅值的振点附近, 其输出信号幅值最大, 相对于输入信号的相移最小, 对于监测局放脉冲的电流传感器, 在选定了分析频段后, 若要求在此频段范围内的信号分量得到最大量的传输, 则振点要设置在等于该段的中心频率。但是, 当外并电阻太大时, 在振频两边, 其幅值和相角随频率可能呈现较大的变化, 从而使信号经传感器传输时分析频段内的信号分量严重失真。这说明要求在所分析频段得到较大的信号幅值传输与要求较小的波形失真是相互矛盾的。因此可以说, 电流传感器的设计, 外并电阻的合理选取, 是一个协调上述二者的过程。

4 应用实例

为了验证上述理论分析, 作者绕制了 3 只电流传感器, 并对它们进行了实际测试。3 只电流传感器副匝匝数 100, 副方开路, 我们分别以 I、II、III 来代表, 以下是它们的有关参数。

| 传感器 | 铁心材料 | 主电感 (μH) | 激磁电阻 (Ω) | 电阻 r_2 (Ω) | 漏电感 $L_{2\sigma}$ (μH) | 分布电容 (pF) |
|-----|-----------|--------------------------|----------------------|--------------------------|--|-------------------------|
| I | 高频铁氧体 | 0.02 | 20 | 7.05 | 10.22 | 53.04 |
| II | 坡莫合金 | 0.22 | 5 | 2.8 | 6.85 | 14.06 |
| III | 坡莫合金(带钢套) | 0.7 | 0.15 | 3.0 | 20.92 | 6.15 |

图 3、图 4 分别示出了电压传递函数幅值比和相移的计算和实测结果。

由图 3、图 4 看出：

1) 对传感器 I、II、III, 采用等效电路观点计算与实测结果吻合较好。它说明, 从工程设计的

观点出发,是可以采用等效电路来对电流传感器的传输特性进行分析的。

2) 存在明显的谐振频率,在谐振频率处,传递函数的幅值最大,相移为零。

3) 副方绕组开路时,在谐振频率附近,幅值和相位随频率都呈现较大的变化。这说明副方绕组开路在实际在线监测时一般是不可取的。

此外,作者还对3只电流传感器在其它情况(不同副边匝数、不同的负载电阻 R_L 等)进行了多组测试,有关测试结果与上述结论保持一致。

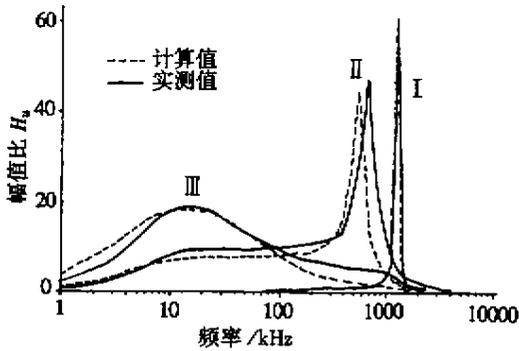


图3 幅值频特性计算与实测比较

Fig.3 Amplitude-frequency characteristic Comparison between calculation and measurement

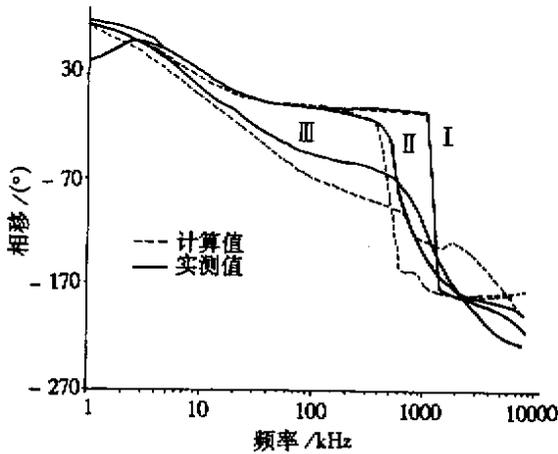


图4 相频特性计算与实测比较

Fig.4 Phase-frequency characteristic Comparison between calculation and measurement

参考文献:

- [1] 刘少克. 大型电机定子绕组绝缘局部放电在线监测研究[D]. 华中理工大学, 1994.
- [2] 王昌长等. 在线检测电力设备局部放电的电流传感器系统的研究[J]. 电工技术学报, 1990(2).

