

文章编号: 1001-2486 (2000) 06-0034-04

## 局部放电在线监测电流传感器的等效电路及其参数计算\*

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:** 局部放电在线监测是保证电力设备正常工作的重要手段。从变压器理论出发, 提出了局放脉冲电流传感器等效电路及其参数计算方法, 所提出的方法已成功地应用于实际局放在线监测传感器的设计中。

**关键词:** 电力设备; 传感器; 局部放电; 在线监测

**中图分类号:** TM762      **文献标识码:** A

### Equivalent Circuit and Parameter Calculation of Current Sensor of On-line Monitor of Partial Discharge

LIU Shao-ke

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

**Abstract:** On-line monitor of partial discharge is an important measure to ensure that the electrical power equipment works well. Based on the theory of transformer, the paper proposes the equivalent circuit and parameter calculation of PD pulses of current sensor. The developed method is used successfully for sensor design of factual PD on-line monitor.

**Key words:** electrical machine; sensor; partial discharge; on-line monitor

线圈绝缘损坏是电力设备故障的一个最主要的方面。随着人们对绝缘损坏机理认识的逐步深入, 线圈绝缘局部放电 (PD) 在线监测越来越引起人们的重视。在传统的“局放”在线监测中, 放电信号的提取主要采用两种方式: 一是对称耦合电容法, 二是中线电流互感器法。这两种方法检测的都是“局放”脉冲电流信号, 故也可统称为脉冲电流法。脉冲电流法由于其检测灵敏度高、方法简便, 而成为在线检测定子绕组绝缘局放的主要手段。

在用脉冲电流法在线检测定子绕组绝缘局放信号时, 最关键的组成部分之一是电流传感器。在中线电流互感器法中, 传感器是采用特殊设计的电流互感器, 其原边为中点接地线, 此地线穿过铁心磁环中心, 副边为绕在铁心上的多匝线圈。一些学者报告了采用这种方法对局放的监测结果, 但对采用这种方法时传感器的设计计算尚未见文献报道。本文对此作了一般性的研究, 有关研究结果已成功应用于实际局放在线监测传感器的设计<sup>[1, 2]</sup>。

## 1 等效电路

用于线圈绝缘局部放电监测的电流互感器是变压器的一种特殊情形, 其原边 1 匝 ( $W_1 = 1$ ), 副边多匝 ( $W_2$  匝), 副边与原边匝数比  $N = W_2 / W_1 = W_2$ 。它与普通电流互感器在结构上类似, 但存在如下不同: 一是普通电流互感器的工作频率低 (一般为工频 50 Hz); 二是普通电流互感器输出为电流信号, 而用于监测“局放”的电流传感器工作频率高、频带宽, 输出一般为电压信号。

由变压器的有关理论知, 将副边各量折算到原方后, 变压器可以用图 1 所示的 T 型电路来等效。图 1 中  $r_1$ 、 $L_{1\sigma}$  分别为原边绕组电阻和漏电感;  $r'_2$ 、 $L'_{2\sigma}$  分别为副边绕组电阻和漏电感 (折算值),  $L_m$  为主电感, 用来考虑变压器的主磁通, 电阻  $R_m$  为考虑铁心中的磁滞与涡流损耗的等效电阻。

\* 收稿日期: 1999-09-14  
 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金  
 作者简介: 刘少克 (1963-), 男, 副教授, 博士。

由于电流传感器的工作频率较一般变压器的工作频率要高得多，故此，除了漏感和主电感外，还必须考虑结构元件间存在的寄生电容。寄生电容分布于各个元件之间，详细分析是相当复杂的；但考虑到电流传感器原边为垂直穿过铁心磁环 1 匝导体，原、副边线圈相隔较远等情况，采用合理的近似，可得其近似等效电路如图 2 所示。

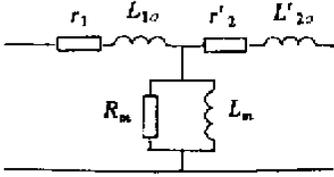


图 1 变压器的一般等效电路

Fig.1 General equivalent circuit of a transformer

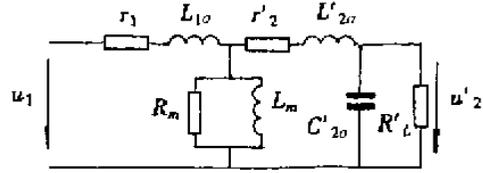


图 2 考虑寄生电容的传感器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of a current sensor when autoexcited capacitance considered

图 2 是一种分析电流传感器工作时的电压源等效电路模型。对图 2 的分析指出，主电感  $L_m$  决定了电流传感器在脉冲传输过程中低频端的频率响应，即低频分量失真；而漏感  $L'_{2\sigma}$ 、分布电容  $C'_{2\sigma}$  决定了电流传感器在高频端的频率响应，即脉冲的高频分量失真。在理想的情况下，希望  $L'_{2\sigma} = 0$ ， $L_m = \infty$ ， $C'_{2\sigma} = 0$ ，这种电流传感器在传输电流脉冲时，不会引起波形畸变。因此，在设计电流传感器时，应力求满足这些条件。

## 2 等效电路参数计算

### 2.1 等效电阻计算

绕组直流电阻按下式确定：

$$R = \rho \cdot l / S \tag{1}$$

式中  $\rho$ ：导线电阻率， $l$ ：总的导线长度， $S$ ：铜导线裸截面面积。对于电流传感器来说，高频下绕组的电阻与低频下相比存在很大的差别。尤其对于原边导体，其线径较粗，由于趋肤效应的影响，在高频下的电阻是其直流电阻的几十倍，甚至上百倍。除了趋肤效应外，副边绕组导体还受邻近效应的影响，但副边绕组导体线径很小，其趋肤效应对副边绕组电阻的影响较其对原边绕组的影响小得多。考虑趋肤效应、邻近效应影响，高频下电阻的准确计算是很困难的。由于电流传感器工作时，副边外接电阻  $R_L$  远远大于副边绕组本身电阻  $r_2$ ， $r_2$  对局部放电脉冲传输影响很小，而且，副边绕组的工作温升很小，是不必考虑的主要问题，故此可以不必对  $r_2$  进行准确计算。

### 2.2 主电感 $L_m$ 计算

考虑图 3 内径为  $R_1$ ，外径为  $R_2$  的铁心磁环，在其上绕有  $W$  匝线圈。当线圈中通电流  $i$  时，它将产生沿铁心闭合的主磁通  $\phi_1$  和沿空气闭合的漏磁通  $\phi_\sigma$ ，如图 3 所示。图 3 中  $H_0$  为  $W$  匝线圈之高度。与  $\phi_1$  对应的是主电感  $L_m$ ，与  $\phi_\sigma$  对应的是漏电感  $L_{2\sigma}$ 。

由安培环路定律，可得主磁通：

$$\Phi_1 = \frac{\mu}{2\pi} w i h_0 L_n \left( \frac{R_2}{R_1} \right)$$

线圈的激磁电感为：

$$L_m = \frac{\Psi}{i} = w \frac{\Phi_1}{i} = \frac{\mu}{2\pi} w^2 h_0 \cdot L_n \left( \frac{R_2}{R_1} \right)$$

式中  $\mu$  为铁心材料导磁率， $h_0$  为铁心磁环高度。对于电流传感器而言，由于原边 1 匝，故此其主电感为

$$L_m = \frac{\mu}{2\pi} h_0 \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2)$$

通常电力设备线圈基波漏电流远远大于局部放电电流, 电流传感器在工作时, 其铁心导磁率  $\mu$  值主要取决于所选铁心材料的磁化曲线及基波漏电流强度。当铁心截面较大时, 可取其材料初始导磁率为工作时的  $\mu$  值。

当  $R_2 - R_1 \ll (R_1 + R_2) / 2$  时, 铁心中的磁通密度可近似看成均匀分布,  $L_m$  可利用下式计算。

$$L_m = \frac{\mu}{2\pi r_0} S \quad (3)$$

式中  $r_0 = (R_1 + R_2) / 2$ ,  $S = h_0 (R_2 - R_1)$

### 2.3 漏电感 $L_{2\sigma}$ 计算

对于图 3 所示线圈结构, 在计算漏磁通磁路长度时, 仅考虑绕组以外空间那部分磁路长度的影响, 将绕组高度除以一个小于 1 的系数  $\rho_1$  作为漏磁通磁路的等值长度, 系数  $\rho_1$  称为洛氏系数, 可按下式计算。

$$\rho_1 = 1 - \alpha (r_2 - r_1) (\pi H_0) \quad (4)$$

式中  $r_1$ 、 $r_2$  分别为圆形横截面的铁心、带铁心线圈横截面外径。假设电流传感器的横截面为矩形, 在此, 采用等效半径的概念, 等效的条件为等效前后横截面周长不变, 即:

$$r_1 = (R_2 - R_1 + h_0) / \pi \quad (5)$$

$$r_2 = (R_2 - R_1 + h_0 + 4\delta + 4d_1) / \pi \quad (6)$$

式中  $\delta$  为铁心与副边线圈间绝缘厚度,  $d_1$  为导线堆积高度 (带漆膜)。

图 4 示出了漏磁磁势的分布。漏磁磁势的分布在绕组所占据的空间中由外表面至内表面呈三角形分布, 而在绕组内表面至铁心外表面呈矩形分布, 故此, 漏磁链可分成两部分: 一是绕组所占空间的漏磁链, 二是绕组内表面至铁心外表面所占空间的漏磁链。由能量法可计算得出整个绕组总的漏磁链为

$$\Psi = \frac{2}{H_0} \cdot \mu_0 w_2^2 \cdot \rho_1 i \left[ \frac{1}{3} d (a + b + 4\delta + 3d_1) + \alpha (a + b + 2\delta) \right]$$

由此, 可得副边绕组漏电感为:

$$L_{2\sigma} = \mu_0 w_2^2 \rho_1 [ 2d (a + b + 4\delta + 3d_1) + 6\alpha (a + b + 2\delta) ] (3H_0) \quad (7)$$

当  $a$ 、 $b$  远大于  $\delta$ 、 $d_1$  时,  $L_{2\sigma}$  可通过下式近似计算。

$$L_{2\sigma} = \mu_0 w_2^2 \rho_1 \cdot (a + b) (6\delta + 2d_1) (3H_0) \quad (8)$$

式 (7) (8) 为副边绕组漏电感的估算式。

通常认为漏感和铁心的导磁率无关, 然而, 当  $\mu \gg \mu_0$  时, 铁心的存在会使漏感增大。当线圈高度  $H_0$  不变时, 减小线径与匝间距离, 同样引起漏感增大。尤其在线径与匝间距离之比小于 0.5 时, 漏感随线径与匝间距离之比的减小而显著增大。

### 2.4 分布电容 $C_{2\sigma}$ 的计算

如果铁心和绕组间的电压为恒值, 当线圈高度  $H_0$  远大于绝缘厚度  $\delta$ , 则间隙中的电场可看成均匀场, 这时绕组与铁心可作为平板电容器的等位面来研究。绕组与铁心间的电容量  $C_{2\sigma}$  为:

$$C_{2\sigma} = \epsilon_0 \epsilon S / \delta = \epsilon_0 \epsilon H_0 \cdot l_p / \delta \quad (9)$$

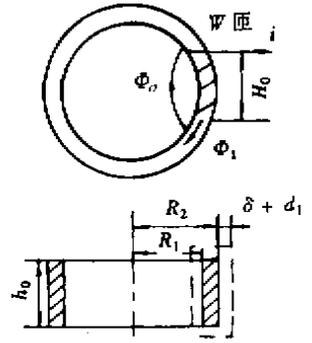


图 3 主电感计算  
Fig.3 Calculation of main inductance

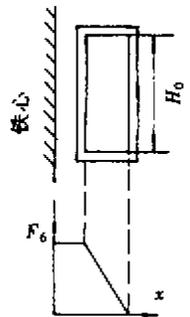


图 4 漏电感计算  
Fig.4 Calculation of leakage inductance

式中  $\epsilon$  为绝缘材料的介电常数,  $l_p$  为平均每匝长度。

以上是副边绕组与铁心之间的静态分布电容计算式。但实际上, 传感器在工作时, 副方绕组的各匝相对于铁心并非等位面, 故此, 等效电容  $C_{2\sigma}$  的计算不能采用式 (9), 而必须采用如下述动态电容的计算值。

假定副边绕组只有一层, 且绕组始端与铁心相连, 从绕组始端到终端, 绕组与铁心间的电压均匀地从零增长到  $U$ 。由电场能量法, 我们可得到动态  $C_{2\sigma}$  计算式为:

$$C_{2\sigma} = \epsilon_0 \epsilon l_p \cdot H_0 (3\delta) \quad (10)$$

当副边绕组不只一层时, 同样可推导  $C_{2\sigma}$  的计算公式。当导线直径与匝间距离之比减小时, 与漏电感相反, 绕组的动态分布电容随之下降。当外加钢屏蔽套时, 同样在钢套与绕组间存在分布电容, 引起总的分布电容增加。

### 3 结束语

局放电流传感器是电力设备线圈绝缘局部放电在线监测不可缺少的重要组成部分。它的性能好坏直接影响整个监测系统性能。本文提出了该种传感器的等效电路及其参数计算方法, 实验测试结果表明, 所提出的方法是可行的, 可满足一般工程设计要求。

### 参考文献:

- [1] Bartnikas R. Detection of Partial Discharges (Corona) in Electrical Apparatus [J], IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1990, 25 (1) 111-124.
- [2] 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.

