

变压器绕组局部放电故障的定位

苏文辉, 鞠平, 丁晓群

(淮海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 频率响应分析法只能检测变压器绕组变形故障,而不能实现对局部放电故障的定位。在频率响应分析法的基础上,对变压器绕组的模拟电路进行了分析研究,利用绕组在一定频率范围内呈现纯容性的特性,给出了实现变压器绕组局部放电故障定位的新思路。经仿真计算,验证了这种局部放电故障定位的有效性。

关键词: 变压器绕组; 局部放电; 定位; 传递函数

中图分类号: TM42; TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2002)08-0040-03

1 引言

随着电力市场建设的不断深入,人们对用电的可靠性提出了越来越高的要求。对于检修部门而言,就应该尽量减少设备检修的时间。据调研发现,在检修部门所用的检修时间里面,查找设备故障的部位所花的时间就占了绝大部分,因此减少设备检修时间的关键就在于尽快找到故障部位。

本文的着重点在于,当变压器绕组上发生局部放电时,如何实现故障的定位。目前,人们常用频率响应分析法(FRA)来诊断变压器的变形故障,这种分析方法诊断变压器变形故障,具有灵敏度高、试验设备轻便、判断直观的优点,但是却只能判断哪个绕组上出现故障,没有办法实现故障的具体定位。本文在频率响应分析法的基础上,结合均匀传输线的相关理论,提出一种新的绕组局部放电故障的定位方法。仿真算例表明,这种方法是有效的。

2 变压器绕组的特性分析

2.1 变压器绕组的等效电路

变压器绕组实质上是由类似均匀传输线的线圈导线绕制而成,因此在对绕组进行特性分析的时候,可以利用电路理论中的均匀传输线的知识来进行分析。在不同频率下进行绕组特性分析时,利用分布参数电路的概念可以得到图1的变压器绕组等效电路。其中 R 为线圈导线单位长度的电阻、 L 为线圈

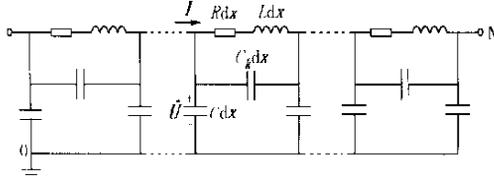


图1 变压器绕组等效电路

导线单位长度的电感、 C_K 为线圈导线单位长度的串联电容、 C 为线圈导线单位长度的对地电容。

由于在实现变压器绕组的局放定位中,人们更关心的是变形究竟发生在哪一个匝数上,所以为了使图1的等效电路能够更好反应变压器绕组的结构特性,作如下的变换:假定一匝线圈导线的长度为 l ,那么可以将图1中的导线长度元 dx 转换为匝数元 dn 的形式,由于 $x = nl$,所以 $dx = ldn$ 。经这样的转换,就可以得到如下的等效电路图(见图2)。

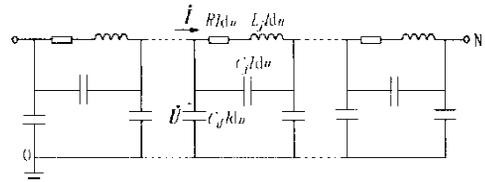


图2 经变换后的变压器绕组等效电路

图中 R 为绕组单位匝数的串联电阻; L_j 为绕组单位匝数的电感; C_d 为绕组单位匝数的对地电容; C_j 为绕组单位匝数的匝间电容。

2.2 绕组的频率特性分析

由均匀传输线的相关知识可以得到图2电路的方程组:

$$\begin{cases} U = A_1 \cosh(nl) + A_2 \sinh(nl) \\ I = 1/Z_c [A_1 \sinh(nl) + A_2 \cosh(nl)] \end{cases} \quad (1)$$

其中, A_1 和 A_2 是积分常数,可以用边界条件来确定; Z_c 和 γ 分别为线圈导线的特性阻抗和传播因数,可以用它们来表征线圈导线的主要特性。

$$\begin{aligned} Z_c &= j \frac{1}{\sqrt{C_d/C_j}} \sqrt{1 + 1/jQ} / \sqrt{1 - {}^2LC_j - 1/jQ} - 1 \\ &= j \sqrt{C_d/C_j} \sqrt{1 + 1/jQ} / \sqrt{1 - {}^2LC_j - 1/jQ} - 1 \end{aligned}$$

式中 $Q = L/R$ 为线圈导线的品质因素。通常变压器绕组的品质因数 Q 在一个较宽的频率范围内很大,这样,就可以简化 Z_c 和 γ :

$$\begin{cases} Z_c = \sqrt{L/C_d} / \sqrt{1 - \omega^2 C_d L} \\ = j \sqrt{L C_d} / \sqrt{1 - \omega^2 C_d L} \end{cases} \quad (2)$$

由此,结合均匀传输线的理论,可以得到如下的结论:

当 $\omega \ll 1/\sqrt{C_d L}$, $Z_c = \sqrt{L/C_d}$, $= j \sqrt{L C_d}$ 可以看作是一般的传输线。

当 $\omega \gg 1/\sqrt{C_d L}$, $Z_c = 1/(j \sqrt{C_d C_j})$, $= \sqrt{C_d/C_j}$ 绕组线圈可等效成一个纯电容的网络。

当 $\omega = 1/\sqrt{C_d L}$, Z_c 和 ω 的值是无穷大,这样在理想的情况下,绕组在这个频率点上呈现开路的特性。

3 绕组发生局部放电故障的定位实现

根据上述的结论,可以利用在 $\omega \gg 1/\sqrt{C_d L}$ 时绕组电路为纯电容电路(见图3)的特性来进行分析。

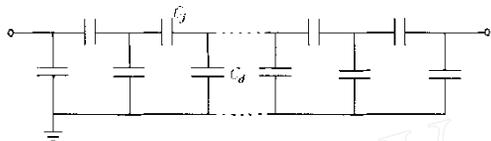


图3 变压器绕组的梯形电容等效回路

假定起始点为绕组的输入端口,绕组的中性点为终点,端电压 U_1 和 U_2 可以测得。为了便于利用二端口网络的理论来分析和推导,再假设输入端口和终点的对地 C_1 和 C_2 电容(如图4)。

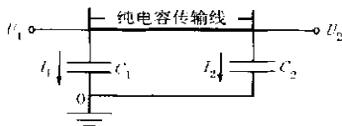


图4 标出端口电容的变压器绕组等效回路

此时图4中的 $I_1 = U_1 j \omega C_1$, $I_2 = U_2 j \omega C_2$, 于是可以得到下面的方程组:

$$\begin{cases} U = U_1 \cosh(\omega n l) + Z_c U_1 j \omega C_1 \sinh(\omega n l) \\ U = U_2 \cosh[\omega l(N_1 - n)] + Z_c U_2 j \omega C_2 \sinh[\omega l(N_1 - n)] \end{cases} \quad (3)$$

其中 $Z_c = \sqrt{L/C_d}$, $Z_c = 1/(j \omega \sqrt{C_d C_j})$; U 为发生故障处的电压; $n l$ 为故障处离绕组起始端口的长度。消去 U 即可以得到匝数 n 和 U_1 、 U_2 之间的关系:

$$U_2/U_1 = \frac{\sqrt{C_d C_j} \cosh[\omega n l \sqrt{C_d/C_j}] + C_1 \sinh[\omega n l \sqrt{C_d/C_j}]}{\sqrt{C_d C_j} \cosh[\omega l(N_1 - n) \sqrt{C_d/C_j}] + C_2 \sinh[\omega l(N_1 - n) \sqrt{C_d/C_j}]} \quad (4)$$

式(3)中 C_2 和 C_1 分别是绕组中性点和端口的对地电容,它们和 C_j 、 C_d 一样在实际的条件下很难测得到,为此可以用一种叫直线内插法的线性插值方法来计算,可以在 C_j 、 C_d 、 C_2 和 C_1 四个常量都未知的情况下,直接算得 n 的值。

4 仿真算例

可以用一个仿真试验来验证上述结论。

假设一个绕组单位长度(m)具有如下的参数: $R = 0.1 \Omega/m$, $L = (1.1e - 3) H/m$, $C_d = (10.24e - 12) F/m$, $C_j = (4e - 8) F/m$, $l = 1.0m$, $N_1 = 100$,以该绕组作为试验对象来进行仿真计算。接线如图5所示。



图5 传递函数频响测量接线图

取描述电压转移的传递函数:

$$H(j \omega) = U_2(j \omega) / U_1(j \omega) \quad (5)$$

可以得到如图6的试验结果。

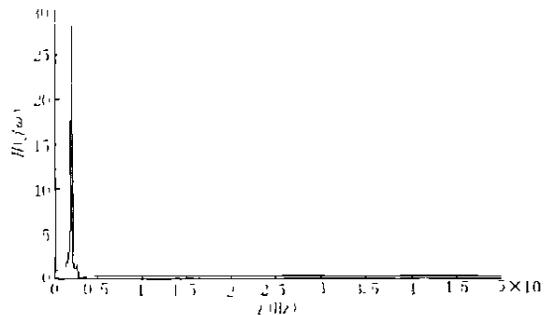


图6 变压器绕组的频率响应曲线

由式(1)的电压方程,可以得到下面的方程组:

$$\begin{cases} U = U_1 \cosh(\omega n l) + Z_c I_1 \sinh(\omega n l) \\ U = U_2 \cosh[\omega l(N_1 - n)] + Z_c I_2 \sinh[\omega l(N_1 - n)] \end{cases} \quad (6)$$

其中 $Z_c = \sqrt{L/C_d}$, $Z_c = 1/(j \omega \sqrt{C_d C_j})$; U 为发生故障处的电压; $n l$ 为故障处离绕组起始端口的长度。对于一个两端开路的绕组(此时的边界条件是可测得的两端口电压,电流为零),消去中间变量 U ,可得

$$H(j \omega) = U_2(j \omega) / U_1(j \omega) = 1/\cosh(\omega l N_1) \quad (7)$$

N_1 为该低压绕组的匝数。

由式(7)可知,当 $\omega \gg 1/\sqrt{C_d L}$ 时, $H(j \omega) = \sqrt{C_d/C_j}$, 此时绕组的传递函数为一恒值,而图6也可以看到,当频率大于50kHz时, $|H(j \omega)|$ 的值几乎不变,而在其它区间, $|H(j \omega)|$ 的值则变化很大。

选取频率为100kHz的电源,分别在绕组的标号为1、2、3、4、5的五个位置上注入故障信号,接线图如

图 7 所示,其中 U_1 为输入端的端电压, U_2 为输出端的响应电压。测量绕组两端的电压,然后利用前述的计算方法,即可得到实验的最终结果(如表 1 所示)。

表 1 仿真实验的结果

实验次数	计算所得故障点	实际故障点	误差 %
1	0.11	0.1	10
2	0.28	0.3	6.7
3	0.48	0.5	4
4	0.74	0.7	5.7
5	0.84	0.9	6.7

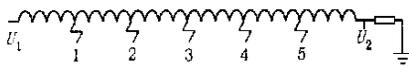


图 7 仿真实验电路图

从表 1 可以知:(1)计算得出的故障点与实际故障点的位置存在误差;(2)绕组故障越是发生在靠近绕组两端的地方,计算所得的结果所产生的误差就越大,不过仍然在可以接受的误差范围之内。

5 结论

利用变压器绕组在一定条件下呈现出纯电容的特性,来进行变压器局部放电故障的定位是变压器绕组故障诊断的非常有效的方法。本文的着重点在于理论上的分析,随着信号处理技术的发展和完善,

利用本文的方法,还可能实现变压器绕组的在线诊断与定位。

参考文献:

- [1] 黄华,周建国,姜益民,等.阻抗法和频响法诊断电力变压器绕组变形[J].高电压技术,1999,25(2):3.
- [2] 朱明林,朱子述.变压器传递函数的系统辨识[J].高电压技术,2002,26(1):46-48.
- [3] 朱建新.电力变压器绕组变形故障的测量分析与判断[J].变压器,2000,37(6):21-24.
- [4] Oguz Soysal A,Adam Semlyen. Practical transfer function estimation and its application to wide frequency range representation of transformers[J]. IEEE Trans on PD,1993,8(3):1627.
- [5] James R E et al. Application of digital filtering techniques to determination of partial discharge location in transformers[J]. IEEE Trans. Electr. Ins,1989,24(4):657-668.

收稿日期:2001-11-07

作者简介:

苏文辉(1976-),男,硕士研究生,主要研究电力变压器的在线故障诊断。

鞠平(1962-),男,博士,教授,副校长,主要研究电力系统模拟与控制。

丁晓群(1956-),男,教授,主要研究电气设备故障诊断以及电网自动化。

Location of partial discharges fault in transformer winding

SU Wen-hui, JU Ping, Ding Xiao-qun

(Institute of Electric Engineering of Hehai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Frequency response analysis can be used to examine distortion fault in transformer windings, but can't perform partial discharge Location. Based on frequency response analysis, the simulative circuit of transformer's winding was analyzed in this paper. According to the pure capacitive characteristic in current frequency range in transformer winding, a new method was given to realize locate the partial discharges fault in transformer winding. The method is proved to be effective by simulative experimentation.

Keywords: transformer windings; partial discharges; location; transfer function

(上接第 13 页)

- (1. Electric Engineering and Automation School, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Xuji Electric Co. Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: Combined with engineering practices, this article proposes that feeder section is regarded as graph, the nodes inside the section are treated as vertexes of graph, and the lines between nodes as arcs. Their directions are load flow's directions in the lines, and the model of feeder section in distribution network is constructed. Based on this model, network-base structure matrix and directional describing matrix are defined, and deeply, they are structured. Therefore, we get the data structure and methodology which are combined with the topology function of GIS closely. Finally, the procedure of calculation based on this method is described, and the problem of incomplete measured datas is discussed.

Keywords: distribution network; distribution automation; section; data structure; topology analysis; loss calculation; GIS (Geography information system)