



# 变压器绕组径向几何电容的测量与估算

白国兴

(常州变压器厂, 江苏 常州 213002)

**摘要:**通过实例介绍了电力变压器绕组径向几何电容的测量及估算,提出了在设计估算中引入修正系数。

**关键词:**变压器;绕组;径向几何电容;测量;估算

中图分类号:TM406

文献标识码:B

文章编号:1001-8425(2007)01-0032-05

## Measurement and Calculation of Radial Capacitance of Transformer Winding

BAI GUO-xing

(Changzhou Transformer Works, Changzhou 213002, China)

**Abstract:**The measurement and calculation of radial capacitance of power transformer winding are introduced based on example. The correction coefficient in design and calculation is presented.

**Key words:**Transformer; Winding; Radial capacitance; Measurement; Calculation

### 1 概述

众所周知,电力变压器绕组存在着径(横)向几何电容和轴(纵)向几何电容。径向几何电容包括绕组间的电容及绕组对地(如铁心、夹件和油箱等结构件)的电容,轴向几何电容包括绕组的匝间电容和饼间电容等。

电力变压器用户在签订变压器采购合同及其附件——技术协议时,往往提出如下要求:合同生效后一个月(或更短时间)内提供合同变压器绕组间及绕组对地的电容值,有时还要求提供变压器高压绕组的人口电容值。

对于新签合同的变压器,若能套用工厂老的产品结构及图纸,则可用相应(相同或类似)产品的实际测量值提供给用户;若需要进行新的设计,则只能提供设计估(计)算值。

除了变压器用户以外,各电力变压器制造厂及试验研究部门,在进行变压器绕组波过程计算或制作电磁模拟时,需要知道变压器绕组的径向几何电容及轴向几何电容值;试验部门在进行变压器工频

耐压、感应耐压等试验及研究时,需要知道绕组的径向几何电容值,以进行容性功率补偿的估算;此外,在进行变压器绕组人口电容的估算时,也需要知道绕组的径向几何电容值。因此,准确地进行变压器绕组几何电容的测量和估算,具有一定的现实意义。

笔者在本文中从变压器绕组径向几何电容的测量与估算两方面,结合实例加以介绍,指出了两种方法所得电容值存在偏差的可能原因,提出了在进行电容估算时引入修正系数的办法。

### 2 变压器绕组径向几何电容的测量

变压器绕组的径向几何电容的测量方法比较简单,主要采用西林电桥法,即在测量变压器绕组介质损耗角正切值(简称介损)时同步测量出(或算出)电容量。20世纪90年代以前测量介损常用的是QS型系列电桥,采用反接法进行测量。到了20世纪90年代中期相继出现了数字式全自动介损测量电桥,使得变压器的介损和径向电容的测量更为方便和准确。

#### 2.1 径向几何电容的测量原理和接线

文献[1]给出的变压器径向几何电容的测量反

http://www.wangd.com 中国电气第一站

接法接线原因如图1所示。

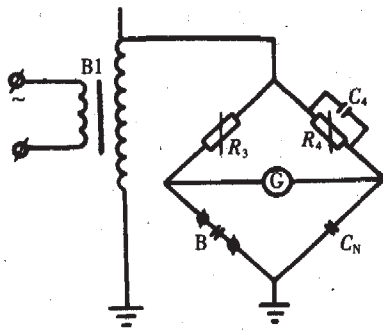


图1 反接法接线原理图

Fig.1 Connection diagram of reverse connection

B——被测变压器 B<sub>1</sub>——电源变压器 C<sub>N</sub>——标准电容  
C<sub>4</sub>——桥臂电容 R<sub>3</sub>、R<sub>4</sub>——桥臂电阻 G——检流计

试验接线时将变压器某侧绕组三相线端连接并与中性点(当有中性点时)并联,非被试侧绕组短接接地。

对于双绕组变压器,其径向几何电容测量有高压绕组对低压及地、低压绕组对高压及地、高低压绕组对地三个。并且所测量出的电容值是变压器三相绕组总的对地电容或绕组间电容。对多绕组变压器其径向几何电容则有更多的组合,可类推。

### 2.2 部分110kV及220kV产品的测量结果

表1、表2是在我厂部分110kV和220kV双绕组变压器产品上进行测量所得到的结果。

## 3 变压器绕组径向几何电容的估算

变压器绕组径向几何电容可按同轴圆柱电容公式进行计算。文献[2]给出了具体的变压器绕组对地和对其它绕组的电容计算公式。由于公式中含有变压器绕组的有关绝缘结构的等效介电常数,故下面结合实例首先进行等效介电常数的计算。

### 3.1 变压器绕组主绝缘的等效介电常数

#### 3.1.1 绕组间主绝缘的等效介电常数

绕组间绝缘是由绕组内侧或外侧匝绝缘、油隙(纯油隙或有撑条的组合油隙)、绝缘纸筒等几种介质串联而成,图2双绕组无载变压器绕组径向主绝缘结构示意图。

对于有撑条的组合油隙,因撑条与油隙是并联的,其等效介电常数按并联电容公式推出如下:

$$\epsilon_{oc} = \epsilon_0 + (\epsilon_{pb} - \epsilon_0)nb / (\pi d_o)$$

式中  $\epsilon_0$ ——油的介电常数

$\epsilon_{pb}$ ——纸筒的介电常数

$n$ ——撑条的根数

$b$ ——撑条的宽度

表1 110kV变压器径向几何电容实测值

Table 1 Measured values of radial capacitance in 110kV transformer

序号	产品型号	实测值/nF		
		高压对低压及地	低压对高压及地	高、低压对地
1	SF9-40000/110	8.134	15.82	11.470
2	SZ10-40000/110	8.116	18.15	13.993
3	SZ9-50000/110	8.322	16.03	12.810
4	SZ9-40000/110	8.529	16.91	12.383
5	SZ10-50000/110	8.182	17.63	13.691
6	SFZ9-20000/110	5.611	11.6	9.798
7	SZ10-50000/110	7.003	15.12	12.339
8	SZ9-40000/110	7.585	15.61	11.905
9	SZ9-50000/110	6.688	15.47	12.938
10	SZ10-50000/110	6.703	15.35	12.834
11	S10-75000/110	8.437	18.48	13.723
12	SF9-40000/110	8.384	14.19	9.431
13	SF10-40000/110	8.69	18.58	13.537
14	SF10-40000/110	8.102	16.45	11.882

注:实测值中已剔除三相高压及中性点电容套管的电容量,下列其它表格亦同。

表2 220kV变压器径向几何电容实测值

Table 2 Measured values of radial capacitance in 220kV transformer

序号	产品型号	实测值/nF		
		高压对低压及地	低压对高压及地	高、低压对地
1	SFP10-170000/220	10.323	27.717	23.620
2	SFP10-180000/220	10.907	26.520	22.587
3	SFP10-180000/220	9.606	22.896	20.862
4	SFP10-180000/220	9.790	24.433	21.003
5	SFP10-180000/220	9.674	24.249	20.943
6	SFP10-180000/220	11.022	25.918	21.740
7	SFP10-180000/220	10.751	25.114	21.125
8	SFP10-170000/220	9.855	23.142	21.027
9	SFP10-180000/220	10.819	24.337	20.316

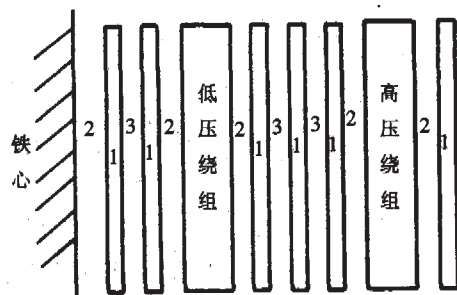


图2 变压器径向主绝缘结构示意图

Fig.2 Structural diagram of radial main insulation in transformer

$d_o$ ——所在油隙的平均直径

文献[2]介绍了绕组间主绝缘空道的等效介电

常数  $\epsilon_{we}$  可按下列公式计算:

$$\epsilon_{we} = \frac{a_w}{d_w \left[ \frac{a_p}{\epsilon_p d_p} + \frac{a_o}{\epsilon_{oc} d_o} + \frac{a_{pb}}{\epsilon_{pb} d_{pb}} + \dots \right]} \quad (1)$$

式中  $\epsilon_p$ ——两绕组间的绝缘纸的介电常数  
 $\epsilon_{pb}$ ——两绕组间的(组合)油隙介电常数  
 $\epsilon_{oc}$ ——两绕组间的绝缘纸板筒的介电常数  
 $\epsilon_w$ ——绕组间的主绝缘(主空道)距离  
 $a_{p1}$ ——外绕组的最内侧的匝绝缘厚度  
 $a_{p2}$ ——内绕组的最外侧导线的匝绝缘厚度  
 $a_o$ ——绕组间各个油隙的尺寸  
 $a_{pb}$ ——绕组间各个围屏纸板的厚度  
 $d_w$ ——绕组间主空道的平均直径  
 $d_p$ ——外绕组的最内侧、内绕组的最外侧导线的匝绝缘的平衡直径

$d_o$ ——绕组间各个油隙的平均直径  
 $d_{pb}$ ——绕组间各个围屏纸板的平均直径

由于含撑条组合油隙的等效介电常数的计算较为繁琐,故笔者在计算绕组间主绝缘的等效介电常数  $\epsilon_{we}$  时,先不考虑撑条的影响,而在最后估算绕组间电容时采用引入修正系数的办法考虑此影响。

**【例1】**某型号为 SF10-40000/110 的双绕组无励磁变压器,其高低压绕组的有关设计参数如下,试求两绕组间绝缘的等效介电常数(取油浸纸的  $\epsilon_p=3.3$ ,油的  $\epsilon_o=2.2$ ,层压纸板的  $\epsilon_{pb}=4.4$ )。

$$\begin{aligned} a_{p1} &= 0.25, a_{p2} = 0.5, a_{o1} = 6.5, a_{o2} = 8, \\ a_{o3} &= 8, a_{o4} = 7.5, a_{b1} = 2, \\ a_{b2} &= 2, a_{b3} = 4, d_w = 793, \\ d_{p1} &= 754, d_{p2} = 831, d_{o1} = 761.5 \\ d_{o2} &= 780, d_{o3} = 800, d_{o4} = 823.5 \\ d_{b1} &= 770, d_{b2} = 790, d_{b3} = 812 \end{aligned}$$

将上述参数代入公式(1)求得:

$$\epsilon_{we} = 2.4208$$

### 3.1.2 绕组对地绝缘的等效介电常数

绕组对地绝缘的等效介电常数可分外绕组对油箱、内绕组对铁心两种情况,分别按上述公式进行计算。

**【例2】**变压器的结构及参数同例1,试求外绕组对油箱、内绕组对铁心的等效介电常数。

(1)外绕组对油箱的等效介电常数查得有关参数如下:

$$\begin{aligned} a_{we} &= 187, d_{we} = 1.213, a_{p1} = 0.5, a_{p2} = 0, d_{p1} = 1.026, \\ d_{p2} &= 1.400, a_{o1} = 6.5, a_{o2} = 178, d_{o1} = 1.032.5, d_{o2} = 1.222.5, \\ a_{b1} &= 3, d_{b1} = 1.042 \end{aligned}$$

代入式(1)得:  $\epsilon_{we} = 2.213$

由此可见,因外绕组与油箱相距较远,其间的绝

缘主要是变压器油,故等效介电常数非常接近变压器油的介电常数 2.2,因此在粗略估算时可直接取外绕组对油箱的等效介电常数为 2.2。

### (2)内绕组对铁心的等效介电常数

产品同例1,其内(低压)绕组与铁心间绝缘构成是:铁心心柱外面包绕若干道环氧玻璃绑带,再包绕一层 1.5mm 厚的纸板筒;在低压绕组套到铁心心柱上时,通常根据松紧情况加塞一层 0.5mm~1mm 厚纸板筒;内绕组绕制在 4mm 厚的硬纸板筒上,纸筒与绕组间有 6.5mm 油隙。试求内绕组对铁心的等效介电常数。可取有关参数如下:

$$\begin{aligned} a_{we} &= 19, d_{we} = 589, a_{p1} = 0, \\ a_{p2} &= 0.25, d_{p1} = 570, d_{p2} = 608, \\ a_{o1} &= 1.5, a_{o2} = 2, a_{o3} = 2.5, \\ a_{o4} &= 6.5, d_{o1} = 571.5, d_{o2} = 578, \\ d_{o3} &= 584.5, d_{o4} = 601.5, a_{b1} = 1.5, \\ a_{b2} &= 1, a_{b3} = 4 \\ d_{b1} &= 574.5, d_{b2} = 581, d_{b3} = 591 \end{aligned}$$

将上述参数代入式(1)求得:

$$\epsilon_{we} = 2.629$$

需要说明的是在估算时忽略了环氧绑带对介电常数的影响。

## 3.2 绕组间电容的估算

绕组间电容可按下式计算:

$$C_{we} = \frac{17.7 \pi \epsilon_{we} H}{\ln \left( \frac{R_{w2}}{R_{w1}} \right)} \times 10^{-3}, \text{ pF} \quad (2)$$

注:用此公式计算出的电容值是三相变压器一相绕组间的电容,以下情况类似。

式中  $\epsilon_{we}$ ——绕组间绝缘介质的等效介电常数

$H$ ——绕组的轴向电抗高度

$R_{w2}$ ——外绕组的内半径

$R_{w1}$ ——内绕组的外半径

**【例3】**代入例1产品的有关设计数据及所求得的等效介电常数:  $H=1.386, R_{w2}=415.5, R_{w1}=377.5$ ,求得高低压绕组间的电容量为:

$$C_{we} = 1.945.22 \text{ pF}$$

## 3.3 绕组对地电容的估算

对于双绕组变压器,当低压绕组位于内侧时,绕组对地电容只要分别计算出高压绕组对油箱、低压绕组对铁心的电容即可。

### 3.3.1 外(高压)绕组对油箱的电容

计算时将外绕组及油箱近似地等效为同轴圆柱,计算公式如下。

$$C_{w0} = \frac{17.7\pi\epsilon_w H}{\ln\left(\frac{R_i}{R_{w1}}\right)} \times 10^{-3}, \text{ pF} \quad (3)$$

式中  $R_w$ ——外绕组的外半径

$R_i$ ——变压器油箱的等效半径, 为方便起见在本文计算时直接取油箱内壁的净宽尺寸

$\epsilon_w$ ——高压绕组与油箱之间绝缘介质的等效介电常数, 可近似地取为 2.2

文献[2]介绍的绕组对油箱的电容计算公式中还要乘以 3/4 系数, 理由是绕组表面只有大约 3/4 对着油箱而其它 1/4 是对着其它相绕组。但经过实际计算, 我们发现实际测量出的外绕组对内绕组及地的电容量要比按实际油箱宽度尺寸估算出的电容量要大一些, 因此笔者认为在估算外绕组对油箱的电容量时不用乘 3/4 的系数。

【例 4】对于上例产品, 试求其高压绕组对油箱的电容量。

查得有关参数为:  $R_w=513, R_i=700, \epsilon_w=2.213$ , 代入式(3)得:

$$C_w=544.42 \text{ pF}$$

故高压绕组对地及对低压绕组的总容量为:

$$C=3 \times (1945.22+544.42)=7469 \text{ pF}$$

### 3.3.2 低压绕组对铁心的电容

计算公式同式(2)。

【例 5】产品同例 1, 试求低压绕组对铁心的电容量。

代入上述产品的有关设计参数:  $R_{w0}=285, R_w=304$ , 求得:

$$C_{w00}=3164.59 \text{ pF}$$

### 3.4 部分变压器绕组径向几何电容估算结果

部分 110kV 及 220kV 变压器径向几何电容的估算结果见表 3、表 4。

## 4 径向几何电容测量与估算结果对比分析

### 4.1 测量值对估算值的倍数

测量值对估算值的倍数见下表 5。

### 4.2 测量与估算结果的对比分析

从表 5 可以看出:

(1) 径向几何电容的估算值比测量值要小。

(2) 对于 110kV 产品, 径向几何电容测量值对估算值的倍数大致在 1.1~1.3 之间, 并且有载变压器高压绕组的电容测量值对估算值的倍数比无励磁变压器的要大一些。

(3) 对于 220kV 大容量变压器产品, 径向几何

表 3 110kV 变压器径向几何电容估算值

Table 3 Calculated values of radial capacitance in 110kV transformer

序号	产品型号	估算值/nF		
		高压对低压及地	低压对高压及地	高、低压对地
1	SZ9-40000/110	6.635	14.133	9.983
2	SZ10-40000/110	6.578	15.917	11.877
3	SZ9-50000/110	6.386	14.313	10.818
4	SZ9-40000/110	6.879	14.780	10.459
5	SZ10-50000/110	6.592	15.923	12.100
6	SFZ9-20000/110	4.492	10.148	8.266
7	SZ10-50000/110	5.480	13.505	10.969
8	SZ9-40000/110	5.875	13.869	10.382
9	SZ9-50000/110	5.214	12.853	10.617
10	SZ10-50000/110	5.209	12.766	10.524
11	S10-75000/110	7.662	16.742	12.026
12	SF-40000/110	7.305	11.685	7.590
13	SF10-40000/110	7.469	15.329	11.130
14	SF10-40000/110	6.965	14.305	10.612

表 4 220kV 变压器径向几何电容估算值

Table 4 Calculated values of radial capacitance in 220kV transformer

序号	产品型号	实测值/nF		
		高压对低压及地	低压对高压及地	高、低压对地
1	SFP10-170000/220	8.409	25.204	20.800
2	SFP10-180000/220	8.399	24.872	20.540
3	SFP10-180000/220	7.246	21.494	18.194
4	SFP10-180000/220	7.804	23.443	19.958
5	SFP10-180000/220	7.804	23.443	19.958
6	SFP10-180000/220	8.399	24.872	20.540
7	SFP10-180000/220	8.422	24.105	19.876
8	SFP10-170000/220	7.393	21.529	18.126
9	SFP10-180000/220	8.422	24.207	19.978

电容测量值对估算值的倍数大致在 1.006~1.33 之间, 并且其外绕组对内绕组及地电容的测量值对计算值的倍数相应地比 110kV 产品大。

### 4.3 测量值与估算值存在偏差的原因分析

#### 4.3.1 径向几何电容的估算值比测量值小的原因

估算值比测量值小的原因有如下几个方面

(1) 在估算绕组对地电容时忽略了绕组上下两端对铁心及夹件所存在的电容。

(2) 在估算绕组间及绕组对铁心的等效介电常数时, 忽略了主绝缘空道内撑条对介电常数的影响, 这将使介电常数估算值偏小。

(3) 此外在估算内绕组对铁心绝缘的等效介电常数时, 忽略了铁心柱外所绑扎的若干道环氧玻璃绑扎带的影响, 故等效介电常数的估算值也偏小。因此, 相应的绕组径向几何电容的估算值就偏小。

表5 测量值对估算值倍数

Table 5 Multiple of calculated values to measured values

序号	产品型号	高压对低压及地	低压对高压及地	高、低压对地
1	SZ9-40000/110	1.226	1.120	1.150
2	SZ10-40000/110	1.234	1.140	1.178
3	SZ9-50000/110	1.240	1.120	1.147
4	SZ9-40000/110	1.240	1.144	1.184
5	SZ10-50000/110	1.241	1.107	1.132
6	SFZ9-20000/110	1.249	1.14	1.185
7	SZ10-50000/110	1.278	1.121	1.125
8	SZ9-40000/110	1.290	1.126	1.147
9	SZ9-50000/110	1.283	1.205	1.217
10	SZ10-50000/110	1.288	1.202	1.220
110 双绕组有载变压器测量值对估算值倍数的平均值		1.257	1.143	1.169
11	S10-75000/110	1.101	1.104	1.141
12	SF9-40000/110	1.148	1.214	1.243
13	SF10-40000/110	1.163	1.212	1.216
14	SF10-40000/110	1.163	1.150	1.120
110 双绕组无励磁变压器测量值对估算值倍数的平均值		1.144	1.170	1.180
15	SFP10-180000/220	1.227	1.100	1.136
16	SFP10-180000/220	1.298	1.066	1.100
17	SFP10-180000/220	1.325	1.065	1.146
18	SFP10-180000/220	1.255	1.042	1.072
19	SFP10-180000/220	1.240	1.035	1.069
20	SFP10-180000/220	1.310	1.043	1.059
21	SFP10-170000/220	1.277	1.042	1.063
22	SFP10-180000/220	1.330	1.074	1.160
23	SFP10-180000/220	1.285	1.006	1.017
220 双绕组无励磁变压器测量值对估算值倍数的平均值		1.276	1.059	1.097

4.3.2 大容量 220kV 变压器外绕组电容测量值对估算值倍数的平均值比 110kV 变压器大的原因

由于为了降低 220kV 大容量变压器运输高度,通常其铁心采用五心柱结构,因此变压器最外侧的绕组不仅存在对油箱的电容,而且两个边的相绕组还存在对旁轭(柱)的电容,故外绕组总的对地电容就比三心柱的要大,因此相应的系数也就大一些。

5 采用修正系数后径向几何电容的估算实例

表 6 给出了采用修正系数后变压器径向几何电容的估算值与测量值对比的实例。

表 6 采用修正系数后变压器径向几何电容的估算值与测量值对比

Table 6 Comparison of calculated values with measured values of radial capacitance in transformer based on correction coefficient

类别	测量组合比较内容	高压对低压及地	低压对高压及地	高、低压对地
		修正系数	1.257	1.143
110 有载变压器	估算值/nF	7.060	14.861	11.236
	测量值/nF	7.062	14.590	11.398
	偏差/%	-0.59%	+1.86%	-1.42%
220 无励磁变压器	修正系数	1.276	1.059	1.097
	估算值/nF	10.560	27.250	23.375
	测量值/nF	10.507	26.813	23.040
	偏差/%	0.5%	1.63%	1.45%

由表 6 列出的两个实例可以看出,采用修正系数后变压器径向几何电容的估算值与测值非常接近,其偏差在±2%以内,这对工程估算来说精度已足够。

6 结论

(1)通常变压器绕组径向几何电容的估算值比测量值小。

(2)通过对同一类型变压器的绕组径向几何电容的估算值与测量值的对比,可求取此类变压器径向几何电容估算用的平均修正系数。

(3)采用修正系数后可提高变压器绕组径向几何电容的估算精度,使估算值与测量值更为接近。

需要注意的是,不同类型的变压器,其修正系数可能不同;不同厂家的产品由于工艺因数等的影响,修正系数也不一定相同,因此不能简单地套用笔者提出的修正系数。

参考文献:

[1] 沈阳变压器厂编.变压器试验(修订本)[M].北京:机械工业出版社,1987.  
[2] 张嘉祥.变压器线圈波过程[M].北京:水利电力出版社,1988.

2006 年特高压输电技术国际会议在京召开

2006 年 11 月 28~29 日,来自世界 19 个国家和地区的电力企业、研究咨询机构、协会组织、大学、金融机构和设备制造企业等 350 多位专家学者共聚北京,参加了在北京举行的“2006 特高压输电技术国际会议”。会议就特高压输电技术的应用与规划、特高压的关键技术等议题展开广泛深入地交流。沈阳变压器研究所副所长刘杰和总工程师朱英浩院士出席了本次会议。