

高压谐振变压器的研究

哈尔滨新生开关厂 程耀中 张月存 陈学东 王德全 (哈尔滨 150030)

摘要：论述了谐振变压器的原理，设计方法及研制中应注意的几个问题，并通过计算值与实测值对比的方法证明了文中计算公式的精确性和实用性。

1 前言

随着电力电子技术的发展，采用高压谐振技术对大容量电气设备进行工频耐压试验已经成为可能，目前已被广泛用于电缆、电容器、发电机等具有大电容的电力设备的交流试验。原理是通过调节铁心磁路的气隙长度，得到连续变化的电感 L ，使其与被试品对地电容 C 发生谐振。本文以一台 150kVA 试验装置为模型，阐述高压谐振变压器的原理与有关参数的计算。

2 谐振变压器原理

2.1 结构特征

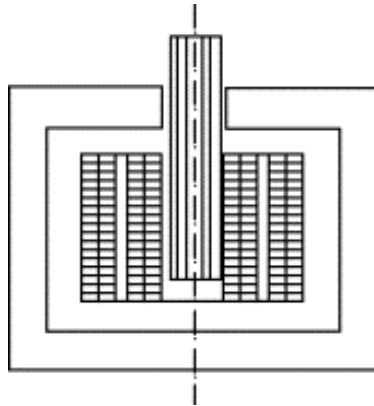


图 1 壳式谐振变压器

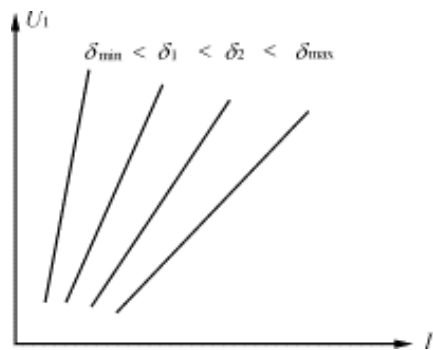


图 2 谐振变压器的伏安特性

谐振变压器的铁心可以做成两种不同的结构：壳式和心式。心式铁心变压器在一系列主要指标方面不如壳式铁心变压器，其重量和外形尺寸较大，调节气隙的传动机构比较复杂。为此，我们研制的试验装置采用壳式结构，见图 1。谐振变压器绕组套装在可移动的中心柱外面。

2 2 特性曲线

谐振变压器的特性曲线如图 2 所示。由图 2 可见，在不同气隙长度 δ 下，谐振变压器的伏安特性具有良好的线性关系，其电感 L 与变压器上的电压值无关。因而这种谐振变压器在用于交流谐振试验时，可先在低压条件下进行调谐（通过传动机构改变动铁心与下轭铁心之间的气隙长度），当调谐到谐振时，再升高试验电压，系统调谐非常方便。

2 3 回路电感 L 与铁心气隙长度 δ 的关系

气隙可调谐振变压器，无论是串联型还是并联型，都是通过调节铁心气隙长度，改变回路电感量 L ，使谐振变压器发生谐振。这就是对于具有一定对地电容的被试器，通过改变铁心气隙长度使谐振变压器发生谐振的机理。但是需要注意的是气隙长度不可过大，过大会使已建立的谐振条件遭到破坏。

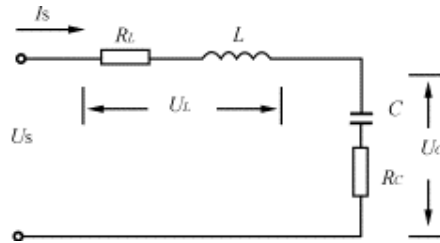


图 3 串联谐振变压器的等值电路

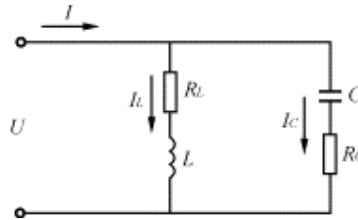


图 4 并联谐振变压器的等值电路

2 4 调谐原理

(1) 串联调谐 $\mathbf{L} = \frac{1}{C}$ 串联谐振变压器的等值电路如图 3 所示。当对谐振变压器施加 $U_S=220V$, $f=50Hz$ 的工频电压后，通过手动或自动调节，使即 $X_L=X_C$ 时，回路发生串联谐振，这里

$$I = I_{max} = \frac{U_S}{\sqrt{(R_L + R_C)^2 + (L - \frac{1}{C})^2}}$$

回路电流 I_S 最大 $= \frac{U_S}{R_L + R_C}$ 因为 $R_C \ll R_L$ ，则有

$$I_S \approx U_S / R_C \quad (1)$$

被试品上的电压 U_C 和调谐电抗器上的电压 U_L 分别为： $U_C = \frac{1}{C} I_S = X_C I_L U_L = L I_S = X_L I_L U_L = U_L = \omega L I_S = \frac{\omega L}{R_C} U_S$

当调谐到谐振时 (2) $\frac{\omega L}{R_C} = \frac{\sqrt{L/C}}{R_C} = Q$ 式 (2) 中比值 (3)

ω_0 为谐振角频率 $\sqrt{1/C} \gg R_L$ Q 称为串联谐振回路的品质因数。因为，所以 $Q \gg 1$ 。从而得出电源容量 $P_s = U_s I_s = \frac{U_s}{Q} I_s = \frac{P_L}{Q}$ (4)

由式 (4) 可知，当谐振变压器调谐到谐振时，电源电压和容量均为被试品对应电压和容量的 $1/Q$ 。所以与一般试验变压器相比，谐振变压器具有重量轻、体积小的优点。

(2) 并联调谐

并联谐振变压器的等值电路如图 4 所示。 $R_L \ll \frac{1}{\omega C}$ 当 $R_L \ll \omega L$ 时，并联谐振的谐振频率 f_0

为：
$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_L^2}{L/C - R_L^2}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (5)$$

并联回路的品质因数 Q 为：
$$Q = \frac{\omega L}{R_L + R_C} = \frac{1}{(R_L + R_C) \omega C} \quad (6)$$

式中 R_L 、 R_C ——电感、电容的等效串联电阻 (Ω)

L ——调谐电抗器电感 (H)

C ——试品对地电容 (F)

当向并联谐振变压器施加 50Hz 交流电压时，随着电压的升高，回路中将产生强迫振荡。当回路的振荡频率等于外施电源频率时，回路的阻抗最大（且呈纯电阻性），因而回路电流最小，但 L 和 C 上的电流 I_L 和 I_C 都是回路电流 I 的 Q 倍，即 $I_L = I_C = QI$ 。

3 谐振变压器主要参数的计算

3.1 电感 L 的计算

(1) 漏感 L_s 的计算
$$L_s = \frac{4\pi N^2 S_s \times 10^{-9}}{l_s} \quad (H) \quad (7)$$

式中 S_s ——漏磁通等值截面积 (cm^2)

l_s ——漏磁通等值长度 (cm)

N ——绕组匝数

(2) 主电感 L_0 的计算
$$L_0 = \frac{4\pi N^2 S_0 \times 10^{-9}}{\delta} \quad (H) \quad (8)$$

式中 δ ——气隙长度 (cm)

S_0 ——间隙磁路等值截面积 (cm^2)

$$L = L_s + L_0 = \frac{4\pi N^2 S_s \times 10^{-9}}{l_s} + \frac{4\pi N^2 S_0 \times 10^{-9}}{\delta}$$

(3) 总电感 L 的计算
$$= 4\pi N^2 \left(\frac{S_s}{l_s} + \frac{S_0}{\delta} \right) \times 10^{-9} \quad (H) \quad (9)$$

3.2 铁心尺寸的计算

(1) 阶梯型铁心外接园直径 $D = K \sqrt{S} \quad (cm) \quad (10)$

式中 S ——铁心单柱容量 (kVA)

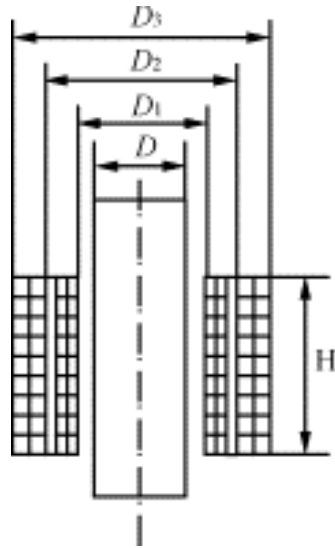


图 5 试验变压器结构示意图

K——比例系数，4.5~5.5（选用冷轧硅钢片时取小值）

$$(2) \text{铁心有效截面积 } S_g = \frac{\pi D^2}{4} K_y K_d K (11)$$

式中 $K_y=0.9$ ——铁心级数利用系数

$K_d=0.93$ ——铁心叠片系数

$$3.3 \text{ 绕组匝数的计算 } N_1 = \frac{U_1}{4.44 f S_g \times 10^{-4}} (12)$$

式中 N_1 ——一次线圈匝数

U_1 ——一次线圈电压（电源电压），可取 220V 或 380V

f ——电源频率，为 50Hz

B ——铁心磁通密度， $(1.5 \sim 1.8) \times 10^4 \text{Gs}$

二次线圈匝数 N_2 的求法同上，只需将式中 U_1 以二次线圈电压代换即可。

3.4 最小气隙 δ_{\min} 和最大气隙 δ_{\max} 的计算

$$(1) \delta_{\min} \text{ 的计算 } \delta_{\min} = \frac{10.2 \sqrt{S}}{K_L K (K_d K)^2} \text{ (cm)} (13)$$

式中 K_L ——电感调节系数，6.5~7.0

$$(2) \delta_{\max} \text{ 的计算 } \delta_{\max} = \frac{10.2 \sqrt{S}}{K_d K} \text{ (cm)} (14)$$

式中 $K_\delta = 2.2 \sim 2.5$

谐振变压器的其它参数与普通电抗器的计算类似。

4150kVA 谐振试验变压器的设计

用上述计算公式对一台电源电压 $U_1=0.22\text{kV}$ ，输出电压 $U_2=15\text{kV}$ ，输出功率 $P_2=150\text{kVA}$ ，且能对最大计算电容为 $2\mu\text{F}$ 的试品进行工频高压试验的谐振变压器进行设计。变压器动铁心柱及套装在外面的一、二次绕组如图 5 所示，其中主要参数的计算结果如下：

$D=12\text{cm}$ ，动铁心外接园直径

$D_1=13.5\text{cm}$ ，一次绕组内径

$D_2=18\text{cm}$ ，二次绕组内径

$D_3=25.5\text{cm}$ ，二次绕组外径

$H=37\text{cm}$ ，绕组高度

$N_1=66$ 匝，一次绕组匝数

$N_2=4464$ 匝，二次绕组匝数

谐振变压器调谐电感参数的计算值与实测值如表 1 所示。

表 1 调谐电感参数的计算值与实测值

$\delta(\text{cm})$	1	2	3	4	5	6	7	8
L 计算值 (H)	31.61	18.96	14.47	12.64	11.37	10.53	9.92	9.47
L 测量值 (H)	29.93	18.12	15.3	13.2	11.8	10.7	10.3	8.95
误差 (%)	5.6	4.6	-5.4	-4.3	-3.6	-1.6	-3.7	5.8

5 结论

(1) 由表 1 可知，计算值与实测值最大误差不超过 6%，说明上述计算公式具有较高精度，足以满足工程计算的要求。

(2) 当试验接近于试品的最大电容计算值时，试品上的电压可能超过按变压比决定的数值，为了降低电压谐振的效应，应使变压器二次线圈的漏抗尽可能小，同时应在输出回路加装防过压装置。

(3) 因电压与气隙 δ 无关，因而应先在较低电压下进行调谐，当谐振发生后，再将输出电压升高到试品的试验值。

(4) 在气隙调节过程中，变压器的铁心和机械传动机构受到很大的电磁力作用，造成较强的振动、噪声，严重时损坏谐振变压器的部件。因此这种装置的机械结构应特殊设计。

作者简介

程耀中 1948 年生，大学文化，高级工程师，主要从事交直流电源设计，对各种特殊变压器、等离子电源有较深入研究。

收稿日期：2000.3.6

定稿日期：2000.5.6