

浅谈自耦变压器设计

Dissuing of Auto transformer's design

聂应发

田村电子(惠州)有限公司

中图分类号: TM4 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517 (2009) 10-3-112

自耦变压器是一种特殊类型变压器,可分为降压和升压变压器两种类型,当一次侧电压 U_H 大于二次侧电压 U_L , 计算 VA 容量系数 $K=(U_H-U_L)/U_H$ 为降压自耦变压器, 当一次侧电压 U_H 小于二次侧电压 U_L , 计算 VA 容量系数 $K=(U_L-U_H)/U_L$ 为升压自耦变压器, 其设计原理是相同的, 本文对使用较多的降压自耦变压器进行探讨, 由于自耦变压器的输入一次侧与输出二次侧不需要绝缘时, 只起变压作用的情况下, 有文章又称之单卷变压器 (英文译为: Auto Transformer), 其特点是: 实效 (计算) 功率比输出功率更小, 所以因容量小, 从而外形尺寸可变小些, 而且其输出效率也很高等。因此本文拟对以上特点作具体深入探讨, 供参考:

自耦变压器的原理是将一次侧 U_H 与二次侧 U_L 共通一部分卷线 N_1 , 然后一次侧串联一部分卷线 N_2 , 共同组成一种卷线方式自耦变压器。在共同卷线中输出负荷电流 I_L , 与一次高压电流 I_H 方向相反, 实际两者电流差为 $I_{LH}=I_H-I_L$, 如图 1 所示。

在自耦变压器中, 当低压带有负荷, 由如下公式所示。

$$V_L = \frac{N_1}{N_1+N_2} \times (1 + \varepsilon/100) V_H \text{ (V)}$$

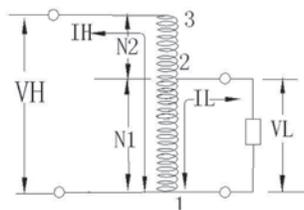


图 1 降压自耦变压器的接线方式

(其中 V_L 为输出电压, V_H 为输入电压, N_1 为共同卷线圈数; N_2 输入串联部分的圈数, 电压变动率)

但是当 I_{LH} 为输出电流与输入电流之差, 当电压变动率忽略情况下

$$\Delta I_{LH} = I_L - I_H = I_L - \frac{N_1}{N_1+N_2} I_L = \frac{N_2}{N_1+N_2} I_L \text{ (A)}$$

进而可引出以下公式:

$$\Delta I_{LH} = \frac{N_1+N_2}{N_1} I_H - I_H = \frac{N_2}{N_1} I_H \text{ (A)}$$

由理论可推断出以下重要公式:(在电压变动率忽略情况下)

$$\frac{\text{自耦变压器等价容量}}{\text{自耦变压器等价容量}} = \frac{U_L \times I_{LH}}{U_L \times I_L} = \frac{N_2}{N_1+N_2} = \frac{V_H - V_L}{V_H}$$

因此变压器已知输入与输出变压比, 以及输出容量时, 我们就知道是实际容量与输出容量下降多少, 而且可得实际容量。进而判定多大变压器。如图 2 所示, 很明显知晓

自耦变压器变压比与实际容量关系

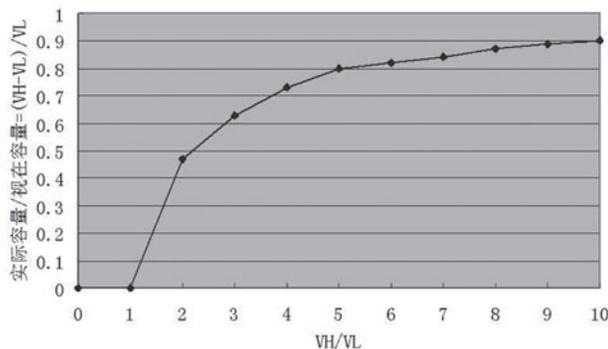


图 2

它们关系：

现举例如下：

规格：输入电压（一次侧）AC100V；频率 50/60Hz；输出（二次侧）AC80V 2A；且温度上升：50K MAX；电压变动率为 5%MAX。

电路图如图 3 所示：

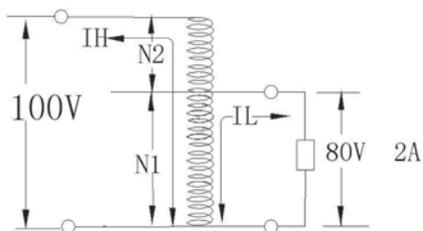


图 3

现计算其输出容量 P 为 $80 \times 2 = 160(\text{VA})$ ，其实效（计算）容量为 $P_e = (100 - 80) / 100 \times 160 = 32(\text{VA})$ ，依据其实际功率可得 EI-66 工字型骨架，积厚为 25mm。

由于绝缘不需要时，所卷线线径可适当加大，相应功率也可加大。

当取磁通密度为 $B_m = 1.42\text{T}$ 时，且由输出功率可查目录表可得 EI66 铁心，厚度为 25mm，铁心一次侧圈数为 T_p ：

$$T_p = \frac{100}{4.44 \times 4.95 \times 14.2 \times 100000} = 640 \text{ T}$$

EI66 铁心厚度为 25mm，我们通过计算很快就可知铁心重量为 0.55Kg，根据铁心面积和磁心的磁通密度，通过铁心磁通密度和绘制的铁心励磁 VA 曲线图，不难得出此时为 18.3VmA/g；进而得出励磁电流（相当于空载电流）为 $I_0 = 18.3 \times 550 / 100 = 101(\text{mA})$

在忽视空载电流情况下，进而得出一次侧负载电流 $I_H = (80 \times 2) / 100 = 1.6\text{A}$ ，共通部分线圈电流 $I_{H-L} = 2 - 1.6 = 0.4\text{A}$ ；由于温度上升为 50K MAX 时，初、次级取电流密度为 $= 3\text{A}/\text{mm}^2$ ，从而可得出一次侧非共通线圈线径为：

$$\Phi_p = \sqrt{(1.273 \times 1.6) / 3} = \text{约 } \Phi 0.85$$

从而可得出一次侧共通线圈线径为：

$$\Phi_s = \sqrt{(1.273 \times 0.4) / 3} = \text{约 } \Phi 0.45$$

根据实效功率、电流密度及温度上升条件可初步设定电压变动率为 5% 左右，从而得出次级无负荷交流电压 E_0 ；

$$E_0 = 80 \times (1 + 4.5\%) = 83(\text{V})$$

从而二次侧卷线 N_2 （设定圈数）：

$$N_2 = (83 \div 100) \times 640 = 532(\text{圈})$$

根据上述骨架形状及计算方法可算出：一次侧平均卷线长 L ：122mm

二次侧平均卷线长 L ：151mm

由线径与电阻曲线对应表：0.45 铜线电阻：114.2 /km；

0.85 铜线电阻：31.8/km

一次侧、二次侧共通直流电阻 $R_1 = \text{平均卷线长} \times \text{圈数} \times (\text{线径所对应的} / \text{km}) / 1000000$

$$R_1 = 122 \times 532 \times 114.2 \times 10^{-6} = 7.4(\quad)$$

一次侧、二次侧未共通线圈直流电阻 $R_2 = \text{平均卷线长} \times \text{圈数} \times (\text{线径所对应的} / \text{km}) / 1000000$

$$R_2 = 151 \times (640 - 532) \times 31.8 \times 10^{-6} = 0.52(\quad)$$

初、次级共通铜线电压降： $E_{2d} = 7.4 \times 0.4 = 2.96(\text{V})$

一次侧、二次侧未共通铜线电压降： $E_{1d} = 0.52 \times 1.6 = 0.83(\text{V})$

二次侧负载电压： $E_2 = (532 / 640) \times (100 - 0.83) - 2.96 = 79.5(\text{V})$

因此通过计算不难得出次级变动率 $= ((83 - 79.5) / 79.5) \times 100\% = 4.4\%$ ；这与之前设定的变动率 4.3% 不一致，必须再次进行调整圈数来达到目的，上述只是一个参考计算式，真正要在直流负荷场里准确计算出来，必须通过直流负载曲线来作进一步调整计算： $N_2 = (80 / 79.5) \times 532 = 535\text{T}$ 。

接下来，由铁心损耗曲线可得：60Hz 时每 kg 损耗 4.8W，又知铁心重量为 0.55kg，所以可得 W_0 铁心损耗为 2.64W，铜损为 $WC = 7.4 \times (0.4^2) + 0.52 \times 1.6^2 = 2.52\text{W}$ 。

进而温升为 $T = 0.8((2.52 + 2.64) / 123) \times 1000 = 34\text{K}$ （其中 123cm^2 为铁心散热面积）。但在三相变压器中，自耦变压器也常有一种设计方法，现举例：Y/y-0 其原理和单相自耦变压器一致，如下所示：

$$I_2 = I_1 + I$$

$$P_{S1} = \sqrt{3} U_1 \times I_1$$

$$P_{S2} = \sqrt{3} U_2 \times I_1$$

（其中 V_1 为一次侧线电压， V_2 为二次侧线电压， I_2 为二次输出线电流； I_1 为一次输入线电流）

变压器计算容量 P_j 为自耦变压器额定容量的 P_s 的 K 倍， $P_j = K P_s$

当一次电压大于 2 次侧电压 U_2 为降压三相变压器。

$$K = (U_1 - U_2) / U_1$$

举例 2：三相自耦变压器

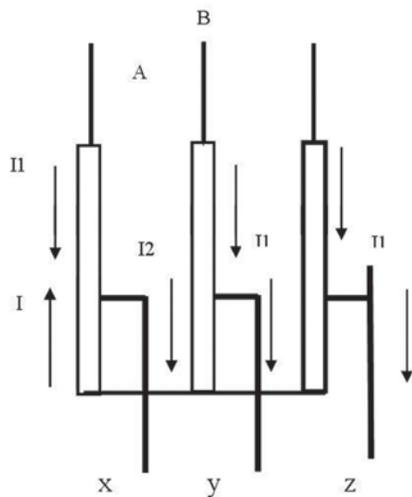


图 4

50Hz, 输出容量为 20kVA, 一次侧为 $U_1=380V$, 二次侧为 $U_2=220V$ 。

变压器计算容量 P_j 为自耦变压器输出容量的 P_s 的 K 倍

$$K=(380-220)/380=0.421$$

$$P_j=k \times P_s=0.421 \times 20=8.42(\text{kVA})$$

$$S_t = 32\sqrt{8.42/3} = 53.6 \text{ 取 } 54\text{cm}^2$$

取铁心, 宽度为 $L_0=50\text{mm}$, 当叠片系数 $K_{pd}=0.93$

$$\text{叠厚 } b=54/(0.93 \times 5)=50\text{mm};$$

当磁通密度为 1T 时, 每匝电压为 $e_t(V)$

$$\text{则通过公式 } e_t=4.44 \times F \times B_m \times S_m/10000=4.44 \times 50 \times 10 \times 54/10000=1.19(V)$$

$$\text{共通部分卷线 } W_2=U_2/(\sqrt{3}) \times (1/e_t)=220/1.732 \times (1/1.2)=106T$$

$$\text{非共通部分卷线 } W_1=(U_1-U_2)/(\sqrt{3}) \times (1/e_t)=(380-220)/1.732 \times (1/1.2)=77T$$

单相输出容量为: $P_{sxa}=P_s/3=20/3=6.67(\text{VA})$

$$1 \text{ 次侧相电压 } U_{xa1} \text{ 应为线电压的 } 1/\sqrt{3} \text{ 倍: } U_{xa1}=U_1/\sqrt{3}=380/1.732=220(V)$$

$$2 \text{ 次侧相电压 } U_{xa2} \text{ 应为线电压的 } 1/\sqrt{3} \text{ 倍: } U_{xa2}=U_1/\sqrt{3}=220/1.732=127(V)$$

$$1 \text{ 次侧相电流 } I_1 \text{ (非共通部分卷线)} = P_{sxa}/U_{xa1}=6670/220=30.3(A)$$

$$2 \text{ 次侧电流 } I_2=P_{sxa}/U_{xa1}=6670/127=52.5(A)$$

$$\text{共通部分卷线 } I=I_2-I_1=52.5-30.3=22.3(A)$$

取电流密度为 2A/mm^2 , 则依其电流, 可知线径如下:

$$\Phi I = \sqrt{(1.273 \times 22.3)/2} = \text{约 } \Phi 3.8$$

$$\Phi I_2 = \sqrt{(1.273 \times 30.3)/2} = \text{约 } \Phi 4.5$$

因此, 自耦变压器的容量计算是关键, 然后依据一般方法进行计算, 能得出满意的结果。

更正启事

在《国际电子变压器》2009年9月刊厂商索引中, 美国磁性材料公司中英文名称出错, 中文: 美国磁性材料有限公司应改成美国磁性材料公司(美磁), 英文: Magnetics Co.,LTD. 应改成Magnetics International, Division of Spang CM, Ltd. 同时误将美国磁性材料公司归类到电子变压器类。特此更正, 并诚挚的向美国磁性材料公司和读者致歉。

《国际电子变压器》

编辑部

2009年10月