

专业：电气工程及其自动化
姓名：潘谷雨
学号：3220102382
日期：2024.11.8
地点：教二 116

浙江大学实验报告

课程名称：电机学 指导老师：史涔激 成绩：
实验名称：单、三相变压器实验

一、实验目的和要求

- 1、通过空载和短路实验测定变压器的变比和参数
- 2、通过负载实验测取变压器的运行特性
- 3、掌握用实验方法测定三相变压器的极性
- 4、掌握用实验方法判别变压器的连接组

二、实验内容和原理

1、单相变压器

①空载实验

计算变比，测取空载特性 $U_0=f(I_0)$ 与 $P_0=f(I_0)$ ，绘出空载特性曲线并计算激磁参数。

②短路实验

测取短路特性 $U_k=f(I_k)$, $P_k=f(I_k)$ ，绘出短路特性曲线并计算短路参数。

③负载实验

绘出纯电阻负载下变压器外特性曲线，并用特性曲线和参数法两种方法计算额定负载下

的电压变化率；绘出纯电阻负载下效率曲线，计算 $\eta=\eta_{\max}$ 时的负载系数 $\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}}$ 。

2、三相变压器

①绕组极性测定（相间极性、原副边极性）。

②校验联接组（Y/Y-12、Y/Δ-11），计算并校验极性和联接组。

三、主要仪器设备（系统、软件或平台）

- 1、DSX-1 电机实验系统
- 2、三相芯式变压器、三相组式变压器
- 3、三相交流可调电源
- 4、DT11/DT12/DT13 交流电压/电流/功率表
- 5、负载电阻

四、操作方法与实验步骤

1、单相变压器

①空载试验

（1）目的：测激磁电阻 R_m 、激磁电抗 X_m 。

（2）方法：

为了便于测量和安全，通常将电源电压加在低压绕组上，高压绕组开路。先将电源电压升高至 $1.2U_N$ ，再逐渐单调下降，依次分别测出空载电流 I_0 和空载损耗 p_0 ，计算参数。

（3）实验线路图：电路连接如图 1.1.1 所示，电压表外接、电流表内接。

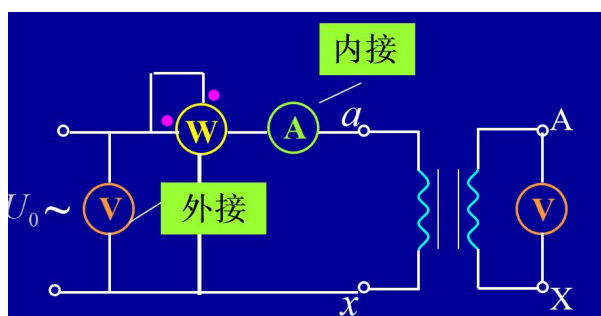


图 1.1.1 单相变压器空载接线图

②短路实验

(1) 目的：测短路电阻 R_k 、短路电抗 X_k

(2) 方法：

将电源电压加在高压绕组上，低压绕组短接。为了避免过大的短路电流，试验应在低电压下进行。调节电源电压使短路电流 I_k 从 $0.3I_N$ 逐渐增加至 $1.1I_N$ ，依次分别测出短路电流 I_k 和短路损耗 p_k ，计算参数。

(3) 实验线路图：电路连接如图 1.2.1 所示，电流表外接、电压表内接。

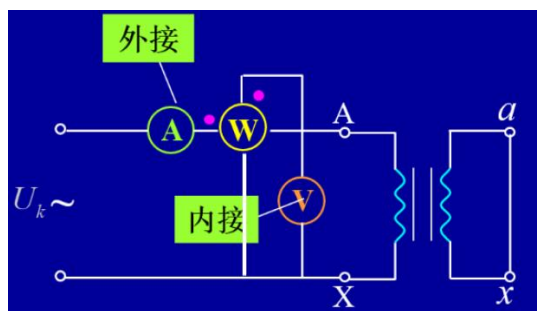


图 1.2.1 单相变压器短路接线图

③负载实验（纯电阻负载实验）

(1) 目的：测定单相变压器运行特性

(2) 方法：

将电源电压加在低压绕组上，高压绕组接负载。保持低压边输入电压为额定值，即 $U_1=U_{1N}$ ，逐渐减小 R_L ，增加负载电流，从 $I_2=0$ 到 $I_2=I_{2N}$ ，测 U_2 和 I_2 ，其中空载和额定负载必测。（注意：为了防止过流，电阻减小的过程中，先减小串联电阻，再减小并联电阻。高压边接负载， $R_{Lmax}=2250\Omega$ ；低压边接负载， $R_{Lmax}=225\Omega$ 。）

(3) 实验线路图：电路连接如图 1.3.1 所示，负载侧电流表外接、电压表内接。

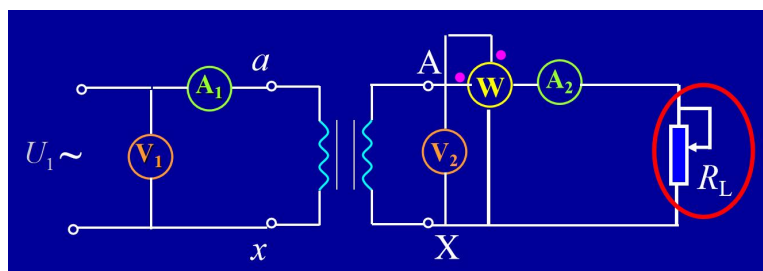


图 1.3.1 单相变压器负载接线图

2、三相变压器

①绕组极性测定（芯式）

（1）测定相间极性（同名端）

接线图如图 2.1.1 所示，用导线把 Y、Z 相连，A 相加 55V 电压。测定 BY、CZ、BC 两端电压，若 $U_{BC} = |U_{BY} - U_{CZ}|$ ，则首末端标记正确，B、C 为同名端；若 $U_{BC} = |U_{BY} + U_{CZ}|$ 则 B、C 为非同名端。

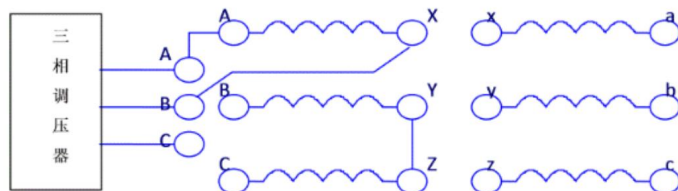


图 2.1.1 三相变压器相间极性测定接线图

（2）测定原、副边极性（同名端）

接线图如图 2.1.2 所示，原副方中点用导线相连，高压端加 55V 电压。测定 AX、ax、Aa 两端电压，若 $U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax}$ ，则 A 相高低压线圈同柱，A、a 同极性（同名端）；若 $U_{Aa} = U_{AX} + U_{ax}$ 则 A、a 异极性（非同名端）。

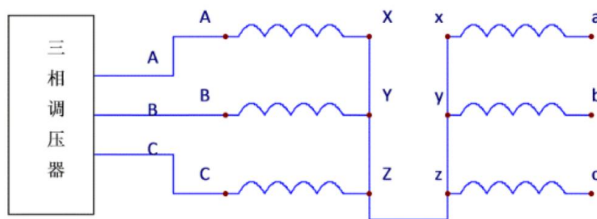


图 2.1.2 三相变压器原副边极性测定接线图

②校验联接组

（1）Y/Y-12

接线图如图 2.2.1 所示，相量图如图 2.2.2 所示。高压端加 55V 电压，分别测定 AB、ab、Bb、Cc、Bc 两端电压，通过 $K_L = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$, $U_{Bb} = U_{Cc} = (K_L - 1)U_{ab}$, $U_{Bc} = U_{ab}\sqrt{K_L^2 - K_L + 1}$

$$U_{Bb} = U_{Cc} = (K_L - 1)U_{ab}, U_{Bc} = U_{ab}\sqrt{K_L^2 - K_L + 1}$$

计算得到 K_L 、 U_{Bb} 、 U_{Cc} 、 U_{Bc} ，并与测得值比较。

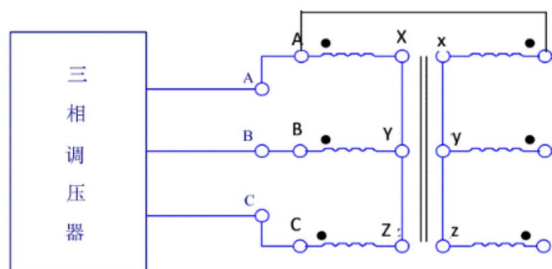


图 2.2.1 三相变压器 Y/Y-12 接线图

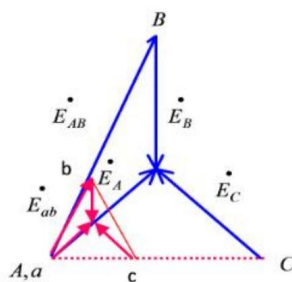


图 2.2.2 三相变压器 Y/Y-12 相量图

(2) Y/Δ-11

接线图如图 2.2.3 所示，相量图如图 2.2.4 所示。高压端加 55V 电压，分别测定 AB、ab、Bb、Cc、Bc 两端电压，通过 $K_L = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$, $U_{Bb} = U_{Cc} = U_{Bc} = U_{ab} \sqrt{K_L^2 - \sqrt{3}K_L + 1}$ 计算得到 K_L 、 U_{Bb} 、 U_{Cc} 、 U_{Bc} ，并与测得值比较。

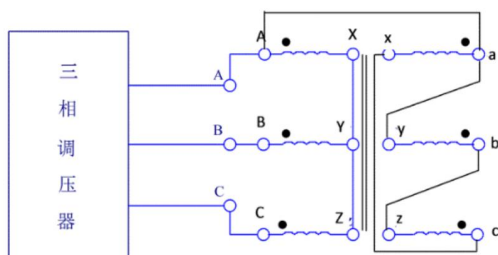


图 2.2.3 三相变压器 Y/Δ-11 接线图

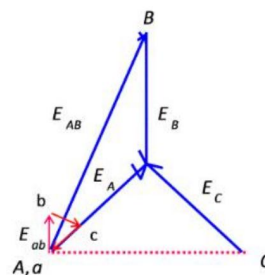


图 2.2.4 三相变压器 Y/Δ-11 相量图

五、实验数据记录和处理

单相组式变压器铭牌数据： $P_N=76W$ ， $U_{1N}/U_{2N}=220V/55V$ ， $I_{1N}/I_{2N}=0.345A/1.38A$

1、单相变压器

①空载试验

数据记录如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 单相变压器空载实验 ($U_N=55V$)

序号	$U_0(V)$	$I_0(A)$	$P_0(W)$	$U_{AX}(V)$	$\cos\theta_0$
1	66.04	0.149	3.626	263.9	36.8%
2	59.50	0.117	2.947	238.1	42.3%
3	55.03	0.099	2.513	219.9	46.1%
4	47.98	0.078	1.939	191.8	51.8%
5	40.14	0.062	1.391	160.4	55.9%
6	29.06	0.046	0.784	116.0	58.6%
7	20.43	0.035	0.418	81.85	58.5%
8	11.18	0.026	0.138	45.38	47.5%

②短路实验

环境温度为 22.2℃，数据记录如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 单相变压器短路实验 ($I_N=0.345A$)

序号	$U_k(V)$	$I_k(A)$	$P_k(W)$	$\cos\theta_k$
1	7.911	0.107	0.364	43.0%
2	13.41	0.180	1.050	43.5%
3	19.60	0.261	2.210	43.2%
4	25.80	0.345	3.802	42.7%
5	28.72	0.382	4.765	43.4%

③负载实验（纯电阻负载实验）

低压侧接电源， $U_{2N}=55V$ ，高压侧接负载，数据记录如表 1.3.1 所示。

表 1.3.1 单相变压器负载实验（纯电阻负载实验）

序号	$U_2(\text{V})$	$I_2(\text{A})$	$P_2(\text{W})$	$\cos\varphi_2$
1	218.5	0	0	—
2	214.8	0.092	19.59	99.1%
3	212.2	0.143	30.26	99.7%
4	208.7	0.213	44.13	99.3%
5	206.3	0.282	58.08	99.8%
6	204.3	0.346	70.39	99.6%

2、三相变压器

①绕组极性测定（芯式）

（1）测定相间极性（同名端）

$U_{AN}=55\text{V}$ ，数据记录如表 2.1.1 所示。

表 2.1.1 相间极性测定

$U_{BY}(\text{V})$	$U_{CZ}(\text{V})$	$U_{BC}(\text{V})$
84.09	11.82	73.48

（2）测定原、副边极性（同名端）

$U_{AN}=55\text{V}$ ，数据记录如表 2.1.2 所示。

表 2.1.2 原副边极性测定

$U_{AX}(\text{V})$	$U_{ax}(\text{V})$	$U_{Aa}(\text{V})$
54.45	13.51	40.58

②校验联接组

（1）Y/Y-12

$U_{AN}=55\text{V}$ ，数据记录如表 2.2.1 所示。

表 2.2.1 三相变压器 Y/Y-12 联接组校验

实验数据					计算数据			
$U_{AB}(\text{V})$	$U_{ab}(\text{V})$	$U_{Bb}(\text{V})$	$U_{Cc}(\text{V})$	$U_{Bc}(\text{V})$	K_L	$U_{Bb}(\text{V})$	$U_{Cc}(\text{V})$	$U_{Bc}(\text{V})$
95.01	23.63	71.50	69.01	85.79	4.021	71.38	71.38	85.67

（2）Y/ Δ -11

$U_{AN}=55\text{V}$ ，数据记录如表 2.2.2 所示。

表 2.2.2 三相变压器 Y/ Δ -11 联接组校验

实验数据					计算数据			
$U_{AB}(\text{V})$	$U_{ab}(\text{V})$	$U_{Bb}(\text{V})$	$U_{Cc}(\text{V})$	$U_{Bc}(\text{V})$	K_L	$U_{Bb}(\text{V})$	$U_{Cc}(\text{V})$	$U_{Bc}(\text{V})$
96.27	13.59	84.44	80.14	84.39	7.084	84.77	84.77	84.77

六、分析与思考

1、计算变比

$$K_L = \frac{U_{AX}}{U_{ax}}$$

单相变压器空载实验每组变比数据如表 1.1.2 所示。

表 1.1.2 单相变压器变比

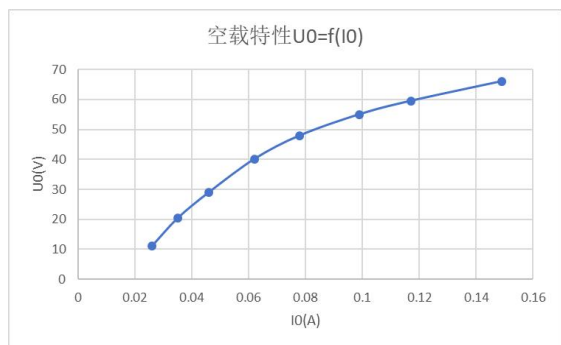
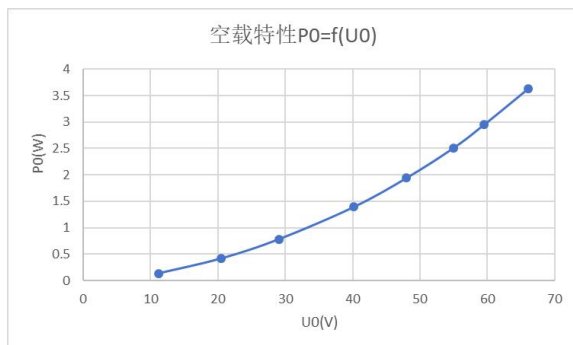
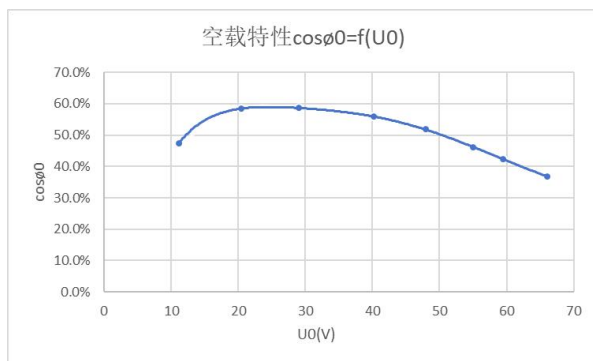
序号	$U_0(\text{V})$	$U_{AX}(\text{V})$	K_L	K_{Lav}
1	66.04	263.9	3.9961	4.0055
2	59.50	238.1	4.0017	
3	55.03	219.9	3.9960	
4	47.98	191.8	3.9975	
5	40.14	160.4	3.9960	
6	29.06	116.0	3.9917	
7	20.43	81.85	4.0064	
8	11.18	45.38	4.0590	

计算得到变压器的变比为 $K=4.055$ ，标称值为 4，误差仅为 0.14%，实验结果较为准确。

2、绘制空载特性曲线和计算激磁参数

(1) 绘制空载特性曲线

根据空载实验数据（表 1.1.1）得到空载特性 $U_0=f(I_0)$ 、 $P_0=f(U_0)$ 和 $\cos\Phi_0=f(U_0)$ 如图 1.1.2-1.1.4 所示。

图 1.1.2 空载特性曲线 ($U_0=f(I_0)$)图 1.1.3 空载特性曲线 ($P_0=f(U_0)$)图 1.1.4 空载特性曲线 ($\cos\Phi_0=f(U_0)$)

空载条件下励磁支路起主导作用，由于磁通的非线性特性，励磁阻抗 Z_m 随电流增大而减小， $U_0=f(I_0)$ 的关系也呈现出非线性特点，电压增幅随电流增大而减小，整体仍有电压随电流增大而增大的趋势。随着端电压增大，功率大致以二次的速率增大，效率先增大后减小，在 30V 左右达到极值 60%。

(2) 计算激磁参数

空载特性曲线上查出对应 $U_0=U_N$ 时的 I_0 和 P_0 ，如表 1.1.3 所示。

表 1.1.3 额定电压下空载运行点

序号	$U_0(\text{V})$	$I_0(\text{A})$	$P_0(\text{W})$
3	55.03	0.099	2.513

计算激磁参数:

$$r_m = \frac{P_0}{I_0^2} = 256.40\Omega, \quad Z_m = \frac{U_0}{I_0} = 555.86\Omega, \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} = 493.19\Omega$$

3、绘制短路特性曲线和计算短路参数

(1) 绘制短路特性曲线

根据短路实验数据(表 1.2.1)得到短路特性 $U_k=f(I_k)$ 、 $P_k=f(I_k)$ 和 $\cos\Phi_k=f(I_k)$ 如图 1.2.2-1.2.4 所示。

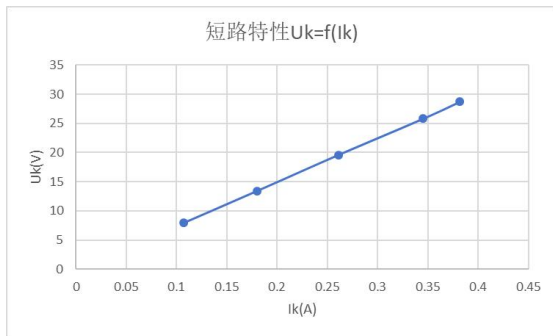


图 1.2.2 短路特性曲线 ($U_k=f(I_k)$)

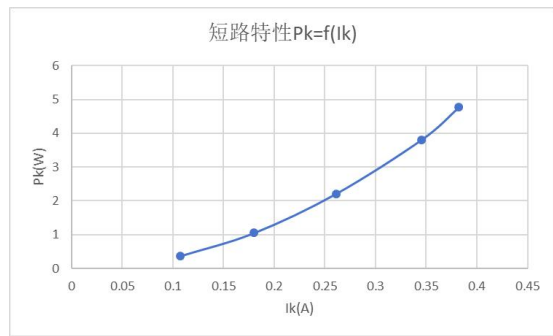


图 1.2.3 短路特性曲线 ($P_k=f(I_k)$)

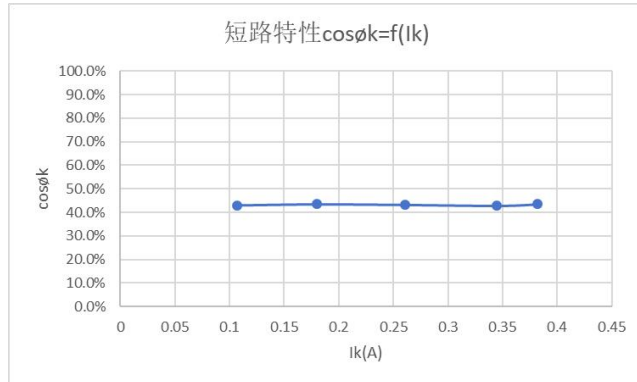


图 1.2.4 短路特性曲线 ($\cos\Phi_k=f(I_k)$)

短路条件下漏磁阻抗起主导作用,电压随电流增大而线性增大,功率以二次的速率增大,效率基本保持在 43%不变。

(2) 计算短路参数

查出 $I_k=I_N$ 时的 U_k 和 P_k 的值, 如表 1.2.2 所示。

序号	$U_k(\text{V})$	$I_k(\text{A})$	$P_k(\text{W})$	$\cos\Phi_k$
4	25.80	0.345	3.802	42.7%

计算 22.2℃ 环境下高压侧的短路参数:

$$r_k' = \frac{P_k}{I_k^2} = 31.94\Omega, \quad Z_k' = \frac{U_k}{I_k} = 74.78\Omega, \quad X_k' = \sqrt{Z_k'^2 - r_k'^2} = 67.62\Omega$$

折算到低压侧得到：

$$r_k' = \frac{r_k}{K^2} = 1.93\Omega, \quad Z_k' = \frac{Z_k}{K^2} = 4.67\Omega, \quad X_k' = \frac{X_k}{K^2} = 4.23\Omega$$

由于短路电阻随温度变化，因此算出的短路电阻应按照国家标准换算到基准工作温度 75℃ 时的阻值（234.5 为铜导线的电阻温度常数）为：

$$r_{k75^\circ\text{C}} = r_{k\theta} \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta} = 2.33\Omega$$

$$Z_{k75^\circ\text{C}} = \sqrt{X_k'^2 + r_{k75^\circ\text{C}}^2} = 4.83\Omega$$

阻抗电压为：

$$U_k = \frac{I_{1N}(K^2 Z_{k75^\circ\text{C}})}{U_{1N}} \times 100\% = 12.12\%$$

$$U_{kr} = \frac{I_{1N}(K^2 r_{k75^\circ\text{C}})}{U_{1N}} \times 100\% = 5.85\%$$

$$U_{Xr} = \frac{I_{1N}(K^2 X_k)}{U_{1N}} \times 100\% = 10.61\%$$

$$I_k = I_{1N} \text{ 时的短路损耗为 } P_{kN} = I_{1N}^2 (K^2 r_{k75^\circ\text{C}}) = 4.44\text{W}$$

4、“T”型等效电路

根据空载和短路实验测定的参数，被试变压器折算到高压方的“T”型等效电路如图 1.2.5 所示。

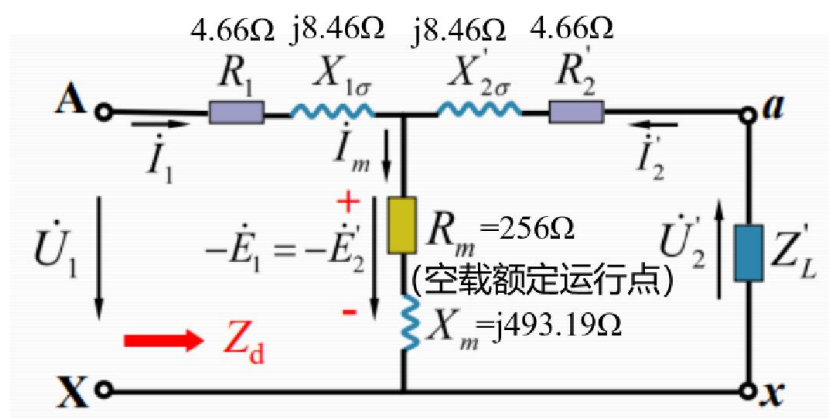
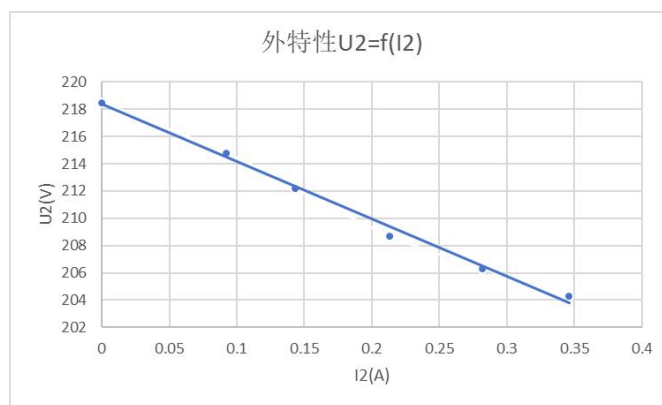


图 1.2.5 变压器“T”型等效电路（折算到高压方）

5、绘制外特性曲线和计算电压变化率

(1) 绘制纯电阻负载下外特性曲线

电压加在低压侧，变压器外特性如图 1.3.2 所示。

图 1.3.2 单相变压器外特性 ($\cos\varphi_2=1$)

(2) 用特性曲线和参数法两种方法计算电压变化率

特性曲线法:

$$U_{20}=218.5\text{V}, I_2=I_{2N} \text{ 时 } U_2=204.3\text{V}, \text{ 此时电压变化率 } \Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% = 6.50\%$$

参数法:

$$I_2=I_{2N}, \cos\varphi_2=1, \text{ 此时的电压变化率 } \Delta u = (U_{kr} \cos\varphi_2 + U_{kX} \sin\varphi_2) \times 100\% = 5.85\%。$$

方法中参数 U_{kr} 已转换为 75°C 环境温度, 且多次换算增大误差, 因此特性曲线法计算结果更可信, 误差在 10% 左右, 说明实验步骤与计算方法正确。

6、绘出纯电阻负载下效率曲线, 计算负载系数

根据纯电阻负载实验数据 (表 1.3.1), 得到每组实验效率如表 1.3.2 所示。

表 2.3.2 纯电阻负载下效率特性数据

$P_0=2.513\text{W}$	$P_{KN}=3.802\text{W}$	
$I_2^*(\text{A})$	$P_2(\text{W})$	η
0.00	0	-
0.27	19.59	87.56%
0.41	30.26	90.53%
0.62	44.13	91.76%
0.82	58.08	92.00%
1.00	70.39	91.74%

绘制效率特性曲线 $\eta=f(I_2^*)$ 如图 1.3.3 所示。

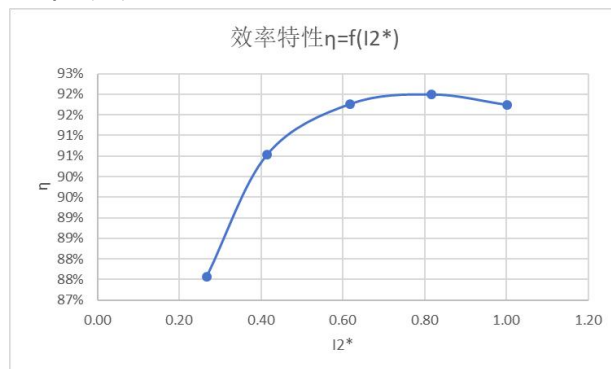


图 1.3.3 效率特性曲线

$$\eta = \eta_{\max} \text{ 时, 负载系数 } \beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}} = 81.30\%。$$

7、计算并校验联接组

(1) 测定相间极性

根据测量数据可得 $U_{BC}' = |U_{BY} - U_{CZ}| = 84.09\text{V} - 11.82\text{V} = 72.27\text{V}$ ，测量得到 $U_{BC} = 73.48\text{V}$ ，误差 $E = |U_{BC}' - U_{BC}| / U_{BC} = 1.65\%$ ，首末端标记正确，B、C 为同名端。

(2) 测定原、副边极性

根据测量数据可得若 $U_{Aa}' = U_{AX} - U_{ax} = 54.45\text{V} - 13.51\text{V} = 40.94\text{V}$ ，测量得到 $U_{Aa} = 40.58\text{V}$ ，误差 $E = |U_{Aa}' - U_{Aa}| / U_{Aa} = 0.89\%$ ，A 相高低压线圈同柱，A、a 同极性（同名端）。

(3) Y/Y-12

根据计算数据和实验数据可知，各电压的计算数值与实验测取的数值基本相同，误差很小，表示线图连接正常，属 Y/Y-12 连接组。

(4) Y/ Δ -11

根据计算数据和实验数据可知，各电压的计算数值与实验测取的数值基本相同，误差很小，表示线圈连接正确，属 Y/ Δ -11 连接组

七、讨论与心得

思考题：

1、通常做变压器的空载实验时在低压边加电源，而做短路实验时在高压边加电源，这是为什么？

在 220V 交流电源下，这样做可以保护实验人员和仪器的安全。空载实验原边加额定电压，因此低压侧加电压较为安全；短路实验原边加额定电流，高压侧的额定电流较小，因此高压边接电源较为安全。

2、在做变压器空载实验与短路实验时，仪表的布置有什么不同？说明理由。

空载实验时，电流表靠近变压器，因空载电流较小，测电流时不能加入电压表电流造成误差，因此需要电流表内接；短路实验时，电压表靠近变压器，因短路电压较小，测量电压时不能加入电流表电压造成误差，因此需要电压表内接。

3、为什么做空载实验时，所测量的数据中一定要包含额定电压点？

空载实验的目的之一是测取励磁阻抗，其大小是随磁路饱和程度变化而变化的。变压器正常运行时，一次侧绕组外施电压是额定电压，主磁通和磁路饱和程度由一次侧额定电压决定，是基本不变的。因此有确定的值。若空载实验不加额定电压，则测得的不是正常运行的值，也就不能用作等效电路参数。

实验心得与体会：

在此次实验中，我深入研究了单相及三相变压器的相关特性。

针对单相变压器，我分别在空载开路、短路以及纯电阻负载三种工况下进行了详细的实验测量，获取了变压器的激磁参数与短路参数，进而绘制出了空载特性曲线、短路特性曲线、外特性曲线以及效率曲线。基于上述实验结果，我成功构建了变压器的等效电路模型，这一过程极大地深化了我对变压器等效电路理论的认识。

对于三相变压器，我的重点在于探索其相间关系、原副边的极性判断以及联接组的验证。利用不同相间的相电压和线电压，我准确地判断了所测试的三相变压器的极性及其联接组类型。这一系列操作不仅强化了我对各种联接组中电压相位关系的理解，还提高了我在实际操作中的技能水平。

得益于实验前的充分准备和团队成员间的默契协作，我们顺利完成了所有线路的搭建与数据的精确测量。整个实验流程顺畅高效，所得数据误差控制在合理范围内，所绘制的各类特性曲线符合预期。通过这次实践，我不仅巩固了理论知识，还增强了动手能力和解决问题的能力。