

变压器实验

3.1 单相变压器

3.1.1 实验目的

- (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。

3.1.2 预习要点

- (1) 变压器的空载和短路实验有什么特点？实验中电源电压一般加在哪一方比较合适？
- (2) 在空载和短路实验中，各种仪表应怎样连接才能使测量误差最小？
- (3) 如何用实验方法测定变压器的铁耗及铜耗？

3.1.3 实验项目

1. 空载实验

测取空载特性 $U_0 = f(I_0)$, $P_0 = f(U_0)$, $\cos\varphi_0 = f(U_0)$ 。

2. 短路实验

测取短路特性 $U_k = f(I_k)$, $P_k = f(I_k)$, $\cos\varphi_k = f(I_k)$ 。

3. 负载实验

1) 纯电阻负载

保持 $U_1 = U_{1N}$, $\cos\varphi_2 = 1$ 的条件下，测取 $U_2 = f(I_2)$ 。

2) 纯感性负载

保持 $U_1 = U_{1N}$, $\cos\varphi_2 = 0$ 的条件下，测取 $U_2 = f(I_2)$ 。

3.1.4 实验设备及仪器

- (1) MCL 系列电机教学实验台主控制屏(含交流电压表、交流电流表)；
- (2) 功率表及功率因数表；
- (3) 单相变压器；
- (4) 三相可调电阻 900Ω (NMEL-03)；
- (5) 开关板(NMEL-05B)；
- (6) 三相可调电抗(NMEL-08A)。

3.1.5 实验方法

1. 空载实验

实验线路如图 3-1 所示。

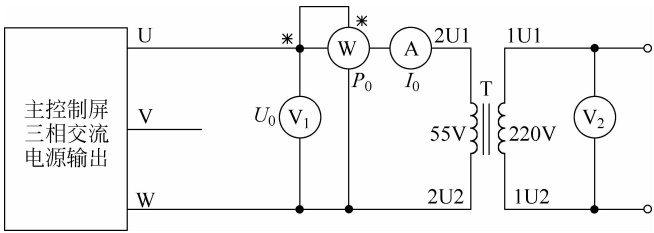


图 3-1 单相变压器空载实验接线图

变压器 T 选用 NMEL-01A 单独的组式变压器。实验时,变压器低压线圈 2U1、2U2 接电源,高压线圈 1U1、1U2 开路。

A、V₁、V₂ 分别为交流电流表、交流电压表。电压表只有一只,则只能交替观察变压器的原、副边电压读数。

W 为功率表,接线时,须注意电压线圈和电流线圈的同名端,避免接错线。

(1) 在三相交流电源断电的条件下,将调压器旋钮沿逆时针方向旋转到底,并合理选择各仪表量程。

变压器 T 额定容量 $P_N=77\text{W}$, $U_{1N}/U_{2N}=220\text{V}/55\text{V}$, $I_{1N}/I_{2N}=0.35\text{A}/1.4\text{A}$ 。

(2) 合上交流电源总开关,即按下绿色“闭合”开关,顺时针调节调压器旋钮,观察电压表指示,使变压器空载电压 $U_0=1.2U_N$ ($U_N=55\text{V}$)。

(3) 然后,逐次降低电源电压,控制在 $1.2U_N\sim0.5U_N$ 的范围内;测取变压器的 U_0 、 I_0 、 P_0 ,共取 6~7 组数据,记录于表 3-1 中。其中 $U=U_N$ 的点必须测,且在该点附近测的点应密些。为了计算变压器的变化,在 U_N 以下测取原方电压的同时测取副方电压,填入表 3-1 中。

(4) 测量数据以后,断开三相电源,以便为下次实验做好准备。

表 3-1 单相变压器空载实验数据

序 号	实 验 数 据				计 算 数 据	
	U_0/V	I_0/A	P_0/W	U_2	$\cos\varphi_k$	K
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

2. 短路实验

实验线路如图 3-2 所示(每次改接线路时,都要关断电源)。

实验时,变压器 T 的高压线圈接电源,低压线圈直接短路。

A、V、W 分别为交流电流表、电压表、功率表,选择方法同空载实验。

(1) 断开三相交流电源,将调压器旋钮沿逆时针方向旋转到底,使输出电压为零。

值,从空载到额定负载范围内,测取变压器的输出电压 U_2 和电流 I_2 。

(4) 测取数据时, $I_2=0$ 和 $I_2=I_{2N}=0.35\text{A}$ 必须测,共取数据 6~7 组,记录于表 3-3 中。

表 3-3 单相变压器纯电阻负载实验数据

$\cos\varphi_2=1 \quad U_1=U_{1N}=55\text{V}$

序 号	1	2	3	4	5	6	7
U_2/V							
I_2/A							

2) 纯感性负载

(1) 用电抗器 X_L 作为变压器的负载,将调压器调节旋钮沿逆时针方向调到底, S_1 、 S_2 断开,负载电抗值调到最大。

(2) 合上交流电源,逐渐升高电源电压,使变压器输入电压 $U_1=U_{1N}=55\text{V}$ 。

(3) 在保持 $U_1=U_{1N}$ 的条件下,合下开关 S_2 ,逐渐增加负载电流,即减小负载电抗 X_L 的值,从空载到额定负载范围内,测取变压器的输出电压 U_2 和电流 I_2 。

(4) 测取数据时, $I_2=0$ 和 $I_2=I_{2N}=0.35\text{A}$ 必须测,共取数据 6~7 组,记录于表 3-4 中。

表 3-4 单相变压器纯电感负载实验数据

$\cos\varphi_2=0 \quad U_1=U_{1N}=55\text{V}$

序 号	1	2	3	4	5	6	7
U_2/V							
I_2/A							

注意事项:

- (1) 在变压器实验中,应注意电压表、电流表、功率表的合理布置。
- (2) 短路实验操作要快,否则线圈发热会引起电阻变化。

3.1.6 实验报告

1. 计算变比

由空载实验测取变压器的原、副方电压,分别计算出变比,然后取其平均值作为变压器的变比 K 。

$$K = U_0/U_2$$

2. 绘出空载特性曲线和计算励磁参数

(1) 绘出空载特性曲线 $U_0=f(I_0)$, $P_0=f(U_0)$, $\cos\varphi_0=f(U_0)$ 。式中 $\cos\varphi_0=\frac{P_0}{U_0I_0}$ 。

(2) 计算励磁参数。

从空载特性曲线上查出对应于 $U_0=U_{1N}$ 时的 I_0 和 P_0 值,并由下式算出励磁参数:

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

3. 绘出短路特性曲线和计算短路参数

(1) 绘出短路特性曲线 $U_k=f(I_k)$, $P_k=f(I_k)$, $\cos\varphi_k=f(I_k)$ 。

(2) 计算短路参数。

从短路特性曲线上查出对应于短路电流 $I_k = I_N$ 时的 U_k 和 P_k 值,由下式算出实验环境温度 $\theta(^{\circ}\text{C})$ 时的短路参数:

$$Z'_k = \frac{U_k}{I_k}, \quad r'_k = \frac{P_k}{I_k^2}, \quad X'_k = \sqrt{Z_k'^2 - r_k'^2}$$

$$\text{折算到低压方: } Z_k = \frac{Z'_k}{K^2}, r_k = \frac{r'_k}{K^2}, X_k = \frac{X'_k}{K^2}$$

由于短路电阻 r_k 随温度而变化,因此,算出的短路电阻应按国家标准换算到基准工作温度 75°C 时的阻值。

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

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

式中,234.5 为铜导线的常数,若用铝导线常数应改为 228。

计算阻抗电压(短路电压)百分数:

$$U_k = \frac{I_N Z_{k75^{\circ}\text{C}}}{U_N} \times 100\%$$

$$U_{kr} = \frac{I_N r_{k75^{\circ}\text{C}}}{U_N} \times 100\%$$

$$U_{kx} = \frac{I_N X_k}{U_N} \times 100\%$$

$I_k = I_N$ 时的短路损耗 $p_{kN} = I_N^2 r_{k75^{\circ}\text{C}}$ 。

4. 画 T 型等效电路

利用空载和短路实验测定的参数,画出被试变压器折算到低压侧的 T 型等效电路。

5. 变压器的电压变化率 Δu

(1) 绘出 $\cos\varphi_2 = 1$ 和 $\cos\varphi_2 = 0$ 两条外特性曲线 $U_2 = f(I_2)$,由特性曲线计算出 $I_2 = I_{2N}$ 时的电压变化率 Δu 。

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

(2) 根据实验求出的参数,算出 $I_2 = I_{2N}$ 、 $\cos\varphi_2 = 1$ 和 $I_2 = I_{2N}$ 、 $\cos\varphi_2 = 0$ 时的电压变化率 Δu 。

$$\Delta u = u_{kr} \cos\varphi_2 + u_{kx} \sin\varphi_2$$

将两种计算结果进行比较,并分析不同性质的负载对输出电压的影响。

3.2 三相变压器

3.2.1 实验目的

- (1) 通过空载和短路实验,测定三相变压器的变比和参数。
- (2) 通过负载实验,测取三相变压器的运行特性。

3.2.2 预习要点

- (1) 如何用双瓦特计法测三相功率? 空载和短路实验应如何合理布置仪表?
- (2) 三相芯式变压器的三相空载电流是否对称? 为什么?

(3) 如何测定三相变压器的铁耗和铜耗?

(4) 变压器空载和短路实验应注意哪些问题? 电源应加在哪一方比较合适?

3.2.3 实验项目

1. 测定变比

2. 空载实验

测取空载特性 $U_0 = f(I_0)$, $P_0 = f(U_0)$, $\cos\varphi_0 = f(U_0)$ 。

3. 短路实验

测取短路特性 $U_k = f(I_k)$, $P_k = f(I_k)$, $\cos\varphi_k = f(I_k)$ 。

4. 纯电感负载实验

保持 $U_1 = U_{1N}$, $\cos\varphi_2 = 0$ 的条件下, 测取 $U_2 = f(I_2)$ 。

3.2.4 实验设备及仪器

(1) MCL 系列电机教学实验台主控制屏(含交流电压表、交流电流表);

(2) 功率表及功率因数表;

(3) 三相芯式变压器(NMEL-02);

(4) 开关板(NMEL-05B);

(5) 三相可调电抗(NMEL-08A)。

3.2.5 实验方法

1. 测定变比

实验线路如图 3-4 所示, 被试变压器选用 NMEL-02 三相三线圈芯式变压器, 额定容量 $P_N = 152\text{W}/152\text{W}/152\text{W}$, $U_N = 220\text{V}/63.5\text{V}/55\text{V}$, $I_N = 0.4\text{A}/1.38\text{A}/1.6\text{A}$, $\text{Y}/\Delta/\text{Y}$ 接法。实验时只用高、低压两组线圈, 中压线圈不用。

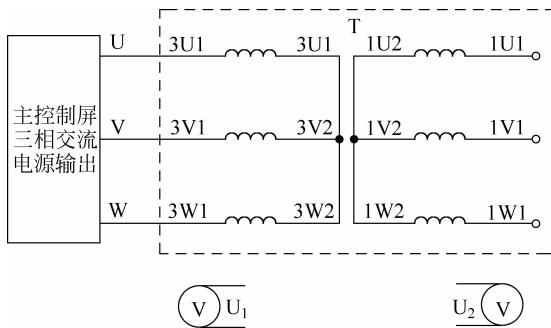


图 3-4 三相变压器变比实验接线图

(1) 在三相交流电源断电的条件下, 将调压器旋钮沿逆时针方向旋转到底, 并合理选择各仪表量程。

(2) 合上交流电源总开关, 即按下绿色“闭合”开关, 沿顺时针方向调节调压器旋钮, 使变压器空载电压 $U_0 = 0.5U_N = 27.5\text{V}$, 测取高、低压线圈的线电压 $U_{1U1 \cdot 1V1}$, $U_{1V1 \cdot 1W1}$, $U_{1W1 \cdot 1U1}$, $U_{3U1 \cdot 3V1}$, $U_{3V1 \cdot 3W1}$, $U_{3W1 \cdot 3U1}$, 记录于表 3-5 中。

表 3-5 变比测量数据

U/V		K_{UV}	U/V		K_{VW}	U/V		K_{WU}	$K = \frac{1}{3(K_{UV} + K_{VW} + K_{WU})}$
$U_{1U1 \cdot 1V1}$	$U_{3U1 \cdot 3V1}$		$U_{1V1 \cdot 1W1}$	$U_{3V1 \cdot 3W1}$		$U_{1W1 \cdot 1U1}$	$U_{3W1 \cdot 3U1}$		

$$K_{UV} = U_{1U1} \cdot {}_{1V1} / U_{3U1} \cdot {}_{3V1}$$

$$K_{\text{vw}} = U_{1\text{V1} \cdot 1\text{W1}} / U_{3\text{V1} \cdot 3\text{W1}}$$

$$K_{WU} = U_{1W1 \cdot 1U1} / U_{3W1 \cdot 3U1}$$

2. 空载实验

实验线路如图 3-5 所示,变压器 T 选用 NMEL-02 三相芯式变压器。实验时,变压器低压线圈接电源,高压线圈开路。

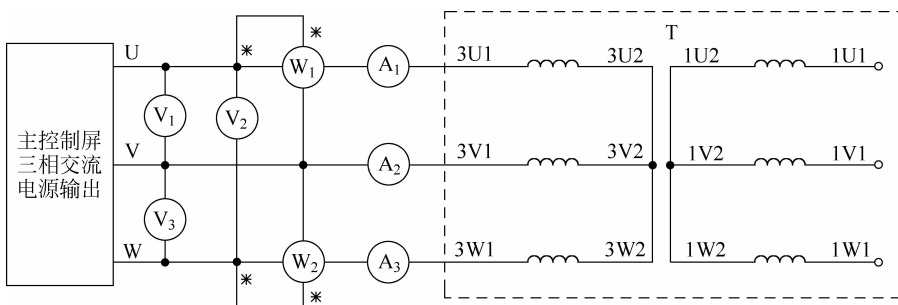


图 3-5 三相变压器空载实验接线图

A、V、W 分别为交流电流表、交流电压表、功率表。由于三相对称,交流电流表、交流电压表只要接入一只即可。

(1) 接通电源前,先将交流电源调到输出电压为零的位置。合上交流电源总开关,即按下绿色“闭合”开关,沿顺时针方向调节调压器旋钮,使变压器空载电压 $U_0 = 1.2U_N$ ($U_N = 55\text{V}$)。

(2) 逐次降低电源电压, 在 $1.2U_N \sim 0.5U_N$ 的范围内; 测取变压器的三相线电压、电流和功率, 共取 6~7 组数据, 记录于表 3-6 中。其中 $U=U_N$ 的点必须测, 且在该点附近测的点应密些。

(3) 测量数据以后,断开三相电源,以便为下次实验做好准备。

表 3-6 三相变压器空载实验数据

[illegible]

3. 短路实验

实验线路如图 3-6 所示,变压器高压线圈接电源,低压线圈直接短路。

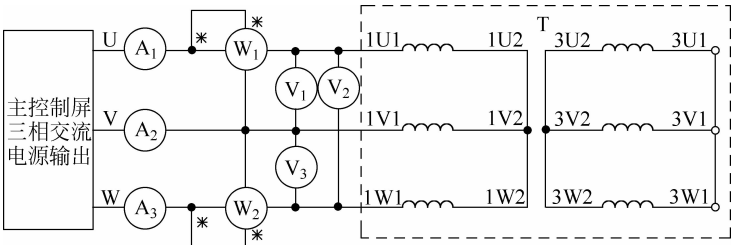


图 3-6 三相变压器短路实验接线图

接通电源前,将交流电压调到输出电压为零的位置,接通电源后,逐渐增大电源电压,使变压器的短路电流 $I_k = 1.1 I_N$ ($I_N = 0.4 A$)。然后逐次降低电源电压,在 $1.1 I_N \sim 0.5 I_N$ 范围内,测取变压器的三相输入电压、电流及功率,共取 4~5 组数据,记录于表 3-7 中。其中 $I_k = I_N$ 点必须测。实验时,记下周围环境温度($^{\circ}C$),作为线圈的实际温度。

表 3-7 三相变压器短路实验数据(室温 $\theta =$ $^{\circ}C$)

序 号	实 验 数 据							计 算 数 据	
	U_k / V			I_k / A			P_k / W		$\cos \varphi_k = P_k / \sqrt{3} U_k I_k$
	$U_{1U1 \cdot 1V1}$	$U_{1V1 \cdot 1W1}$	$U_{1W1 \cdot 1U1}$	I_{1U1k}	I_{1V1k}	I_{1W1k}	P_{k1}	P_{k2}	
1									
2									
3									
4									
5									

4. 纯电感负载实验

实验线路如图 3-7 所示,变压器低压线圈接电源,高压线圈经开关 S(NMEL-05B)接负载电抗器 X_L , X_L 选用 NMEL-08 中的三相电抗器。

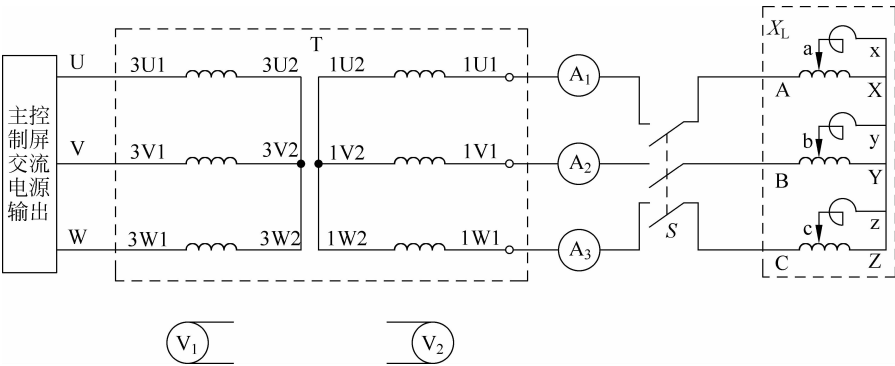


图 3-7 三相变压器负载实验接线图

22 电机与拖动控制实验及其 MATLAB 仿真

(1) 将负载电抗 X_L 调至最大,合上开关 S 接通电源,调节交流电压,使变压器的输入电压 $U_1=U_{1N}$ 。

(2) 在保持 $U_1=U_{1N}$ 的条件下,逐次增加负载电流,从空载到额定负载范围内,测取变压器三相输出线电压和相电流,共取 5~6 组数据,记录于表 3-8 中。其中 $I_2=0$ 和 $I_2=I_N$ 两点必须测。

表 3-8 三相变压器纯电感负载实验数据

序 号	U/V				I/A			
	$U_{1U1 \cdot 1V1}$	$U_{1V1 \cdot 1W1}$	$U_{1W1 \cdot 1U1}$	U_2	I_{1U1}	I_{1V1}	I_{1W1}	I_2
1								
2								
3								
4								
5								
6								

注意事项:

- (1) 在三相变压器实验中,应注意电压表、电流表和功率表的合理布置。
- (2) 做短路实验时操作要快,否则线圈发热会引起电阻变化。

3.2.6 实验报告

1. 计算变压器的变比

根据实验数据,计算出各线电压之比,然后取其平均值作为变压器的变比。

$$K_{UV} = \frac{U_{1U1 \cdot 1V1}}{U_{3U1 \cdot 3V1}}, \quad K_{VW} = \frac{U_{1V1 \cdot 1W1}}{U_{3V1 \cdot 3W1}}, \quad K_{WU} = \frac{U_{1W1 \cdot 1U1}}{U_{3W1 \cdot 3U1}}$$

2. 根据空载实验数据作空载特性曲线并计算励磁参数

(1) 绘出空载特性曲线 $U_0=f(I_0)$, $P_0=f(U_0)$, $\cos\varphi_0=f(U_0)$ 。

式中

$$P_0 = P_{01} + P_{02}$$

(2) 计算励磁参数

从空载特性曲线查出对应于 $U_0=U_N$ 时的 I_0 和 P_0 值,并由下式求取励磁参数:

$$r_m = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad Z_m = \frac{U_0}{\sqrt{3}I_0}, \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}$$

3. 绘出短路特性曲线和计算短路参数

(1) 绘出短路特性曲线 $U_k=f(I_k)$, $P_k=f(I_k)$, $\cos\varphi_k=f(I_k)$ 。

式中

$$P_k = P_{k1} + P_{k2}$$

(2) 计算短路参数

从短路特性曲线查出对应于 $I_k=I_N$ 时的 U_k 和 P_k 值,并由下式算出实验环境温度 $\theta(^{\circ}\text{C})$ 时的短路参数:

$$r'_k = \frac{P_k}{3I_N^2}, \quad Z'_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}I_N}, \quad X'_k = \sqrt{Z_k'^2 - r_k'^2}$$

折算到低压方

$$Z_k = \frac{Z'_k}{K^2}, \quad r_k = \frac{r'_k}{K^2}, \quad X_k = \frac{X'_k}{K^2}$$

换算到基准工作温度的短路参数为 $r_{k75^\circ\text{C}}$ 和 $Z_{k75^\circ\text{C}}$, 计算出阻抗电压。

$$U_k = \frac{\sqrt{3} I_N Z_{k75^\circ\text{C}}}{U_N} \times 100\%$$

$$U_{kr} = \frac{\sqrt{3} I_N r_{k75^\circ\text{C}}}{U_N} \times 100\%$$

$$U_{kx} = \frac{\sqrt{3} I_N X_k}{U_N} \times 100\%$$

$I_k = I_N$ 时的短路损耗 $P_{kN} = 3 I_N^2 r_{k75^\circ\text{C}}$

4. 绘制等效电路

利用由空载和短路实验测定的参数, 画出被试变压器的 T 型等效电路。

3.3 三相变压器的连接组和不称短路

3.3.1 实验目的

- (1) 掌握用实验方法测定三相变压器的同名端。
- (2) 掌握用实验方法判别变压器的连接组。
- (3) 研究三相变压器不对称短路。

3.3.2 预习要点

- (1) 连接组的定义。为什么要研究连接组? 国家规定的标准连接组有哪几种?
- (2) 如何把 Y/Y-12 连接组改成 Y/Y-6 连接组以及把 Y/△-11 改为 Y/△-5 连接组?
- (3) 在不对称短路情况下, 哪种连接的三相变压器电压中点偏移较大?

3.3.3 实验项目

1. 测定极性

- (1) 测定相间极性;
- (2) 测定原、副方极性。

2. 检验联接组

- (1) Yy0;
- (2) Yy6;
- (3) Yd11;
- (4) Yd5。

3. 不对称短路

- (1) Yyn 连接单相短路;
- (2) Yy 连接两相短路。

4. 测定变压器的零序阻抗

3.3.4 实验设备及仪器

- (1) MCL 系列电机教学实验台主控制屏(含交流电压表、交流电流表);
- (2) 功率表及功率因数表;
- (3) 三相芯式变压器(NMEL-02)。

3.3.5 实验方法

1. 测定极性

1) 测定相间极性

被试变压器选用 NMEL-02 三相芯式变压器,用其中高压和低压两组绕组,额定容量 $P_N=152/152\text{W}$, $U_N=220/55\text{V}$, $I_N=0.4/1.6\text{A}$, Y/Y 接法。阻值大为高压绕组,用 1U1、1V1、1W1、1U2、1V2、1W2 标记。低压绕组用 3U1、3V1、3W1、3U2、3V2、3W2 标记。

(1) 按照图 3-8 接线,将 1U1、1U2 和电源 U、V 相连,1V2、1W2 两端点用导线相连。

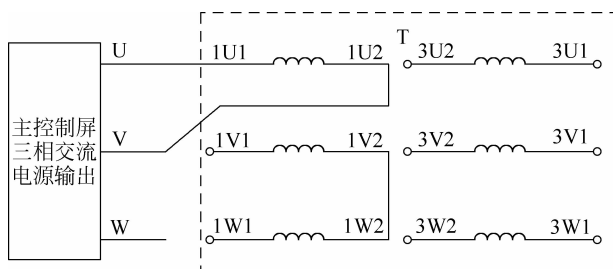


图 3-8 测定相间极性接线图

(2) 合上交流电源总开关,即按下绿色“闭合”开关,沿顺时针方向调节调压器旋钮,在 U、V 间施加约 50% 的额定电压。

(3) 测出电压 $U_{1V1 \cdot 1V2}$ 、 $U_{1W1 \cdot 1W2}$ 、 $U_{1V1 \cdot 1W1}$,若 $U_{1V1 \cdot 1W1} = |U_{1V1 \cdot 1V2} - U_{1W1 \cdot 1W2}|$,则首末端标记正确;若 $U_{1V1 \cdot 1W1} = |U_{1V1 \cdot 1V2} + U_{1W1 \cdot 1W2}|$,则标记不对。需将 V、W 两相任一相绕组的首末端标记对调。然后用同样方法,将 V、W 两相中的任一相施加电压,另外两相末端相连,确定出每相首、末端正确的标记。

2) 测定原、副方极性

(1) 暂时标出三相低压绕组的标记 3U1、3V1、3W1、3U2、3V2、3W2,然后按照图 3-9 接线。原、副方中点用导线相连。

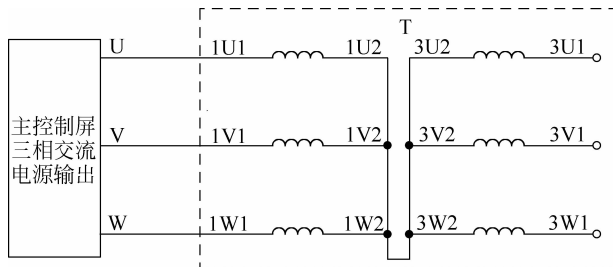


图 3-9 测定原、副方极性接线图

(2) 高压三相绕组施加约 50% 的额定电压,测出电压 $U_{1U1 \cdot 1U2}$ 、 $U_{1V1 \cdot 1V2}$ 、 $U_{1W1 \cdot 1W2}$ 、 $U_{3U1 \cdot 3U2}$ 、 $U_{3V1 \cdot 3V2}$ 、 $U_{3W1 \cdot 3W2}$ 、 $U_{1U1 \cdot 3U1}$ 、 $U_{1V1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{3W1 \cdot 3W1}$,若 $U_{1U1 \cdot 3U1} = U_{1U1 \cdot 1U2} - U_{3U1 \cdot 3U2}$,则 U 相高、低压绕组同柱,并且首端 1U1 与 3U1 点为同极性;若 $U_{1U1 \cdot 3U1} = U_{1U1 \cdot 1U2} + U_{3U1 \cdot 3U2}$,则 1U1 与 3U1 端点为异极性。

(3) 用同样的方法判别出 1V1、1W1 两相原、副方的极性。高低压三相绕组的极性确定后,根据要求连接出不同的连接组。

2. 检验连接组

1) Yy0

按照图 3-10 接线。1U1、3U1 两端点用导线连接,在高压方施加三相对称的额定电压,测出 $U_{1U1 \cdot 1V1}$ 、 $U_{3U1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1V1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1W1 \cdot 3W1}$ 及 $U_{1V1 \cdot 3W1}$,将数字记录于表 3-9 中。

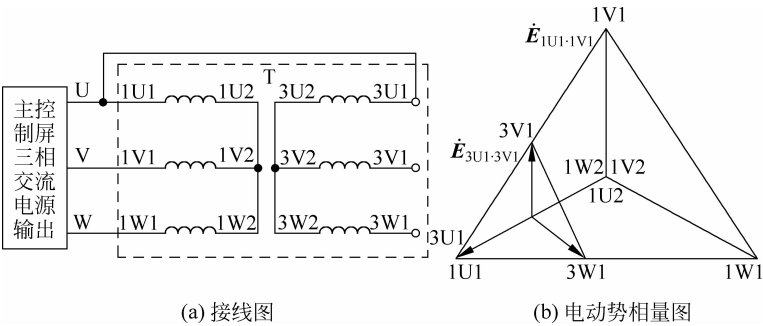


图 3-10 Yy0 连接组

表 3-9 Yy0 连接组实验数据

实 验 数 据					计 算 数 据			
$U_{1U1 \cdot 1V1} / V$	$U_{3U1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1W1 \cdot 3W1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3W1} / V$	K_L	$U_{1V1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1W1 \cdot 3W1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3W1} / V$

根据 Yy0 连接组的电动势相量图可知:

$$\begin{aligned}U_{1V1 \cdot 3V1} &= U_{1W1 \cdot 3W1} = (K_L - 1)U_{3U1 \cdot 3V1} \\U_{1V1 \cdot 3W1} &= U_{3U1 \cdot 3V1} / \sqrt{(K_L^2 - K_L + 1)} \\K_L &= \frac{U_{1U1 \cdot 1V1}}{U_{3U1 \cdot 3V1}}\end{aligned}$$

若用两式计算出的电压 $U_{1V1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1W1 \cdot 3W1}$ 、 $U_{1V1 \cdot 3W1}$ 的数值与实验测取的数值相同,则表示连线图连接正常,属于 Yy0 连接组。

2) Yy6

将 Yy0 连接组的副方绕组首、末端标记对调,1U1、3U1 两点用导线相连,如图 3-11 所示。

按照前面方法测出电压 $U_{1U1 \cdot 1V1}$ 、 $U_{3U1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1V1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1W1 \cdot 3W1}$ 及 $U_{1V1 \cdot 3W1}$,将数据记录于表 3-10 中。

根据 Yy6 连接组的电动势相量图可得

$$\begin{aligned}U_{1V1 \cdot 3V1} &= U_{1W1 \cdot 3W1} = (K_L + 1)U_{3U1 \cdot 3V1} \\U_{1V1 \cdot 3W1} &= U_{3U1 \cdot 3V1} / \sqrt{(K_L^2 - K_L + 1)}\end{aligned}$$

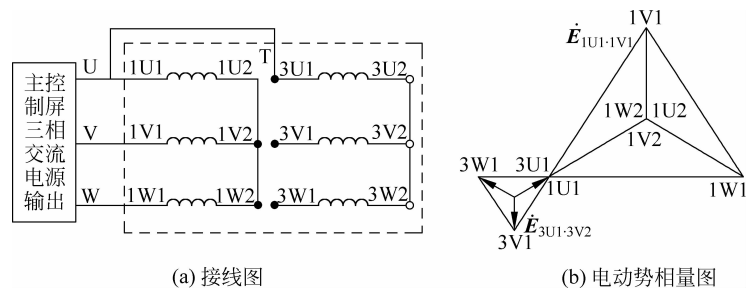


图 3-11 Yy6 连接组

若由上两式计算出电压 $U_{1V1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1W1 \cdot 3W1}$ 、 $U_{1V1 \cdot 3W1}$ 的数值与实测相同,则线圈连接正确,属于 Yy6 连接组。

表 3-10 Yy6 连接组实验数据

实 验 数 据					计 算 数 据			
$U_{1U1 \cdot 1V1} / V$	$U_{3U1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1W1 \cdot 3W1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3W1} / V$	K_L	$U_{1V1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1W1 \cdot 3W1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3W1} / V$

3) Yd11

按图 3-12 接线。1U1、3U1 两端点用导线相连,高压方施加对称额定电压,测取 $U_{1U1 \cdot 1V1}$ 、 $U_{3U1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1V1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1W1 \cdot 3W1}$ 及 $U_{1V1 \cdot 3W1}$,将数据记录于表 3-11 中。

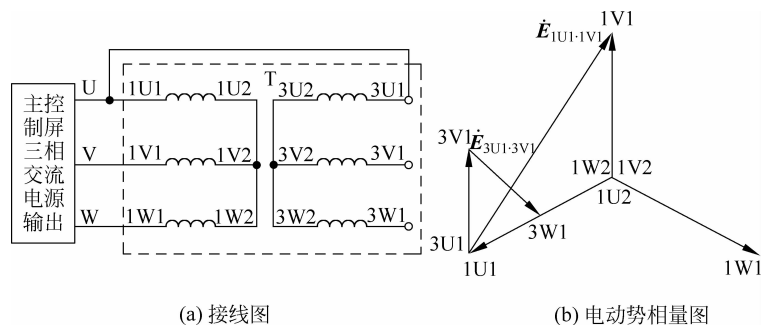


图 3-12 Yd11 连接组

表 3-11 Yd11 连接组实验数据

实 验 数 据					计 算 数 据			
$U_{1U1 \cdot 1V1} / V$	$U_{3U1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1W1 \cdot 3W1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3W1} / V$	K_L	$U_{1V1 \cdot 3V1} / V$	$U_{1W1 \cdot 3W1} / V$	$U_{1V1 \cdot 3W1} / V$

根据 Yd11 连接组的电动势相量可得

$$U_{1U1 \cdot 3V1} = U_{1W1 \cdot 3W1} = U_{1V1 \cdot 3W1} = U_{3U1 \cdot 3V1} \sqrt{K_L^2 + \sqrt{3}K_L + 1}$$

若由上式计算出的电压 $U_{1V1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1W1 \cdot 3W1}$ 、 $U_{1V1 \cdot 3W1}$ 的数值与实测值相同,则线圈连接正确,属于 Yd11 连接组。

4) Yd5

将 Yd11 连接组的副方线圈首、末端的标记对调,如图 3-13 所示。

表 3-13 Yyn 连接单相短路实验数据

I_{2k}/A	U_{3U1}/V	U_{3V1}/V	U_{3W1}/V	I_{1U1}/A	I_{1V1}/A	I_{1W1}/A
U_{1U1}/V	U_{1V1}/V	U_{1W1}/V	$U_{1U1 \cdot 1V1}/V$	$U_{1V1 \cdot 1W1}/V$	$U_{1W1 \cdot 1U1}/V$	

2) Y/Y连接两相短路

实验线路如图 3-15 所示。接通三相芯式变压器电源前,先将电压调至零;然后接通电源,逐渐增加外施电压,直至 $I_{2k} \approx I_{2N}$ 为止。测取变压器原、副方电流和相电压 I_{2k} 、 U_{3U1} 、 U_{3V1} 、 U_{3W1} 、 I_{1U1} 、 I_{1V1} 、 I_{1W1} 、 U_{1U1} 、 U_{1V1} 、 U_{1W1} ,将数据记录于表 3-14 中。

表 3-14 Yy 连接两相短路实验数据

I_{2k}/A	U_{3U1}/V	U_{3V1}/V	U_{3W1}/V	I_{1U1}/A
I_{1V1}/A	I_{1W1}/A	U_{1U1}/V	U_{1V1}/V	U_{1W1}/V

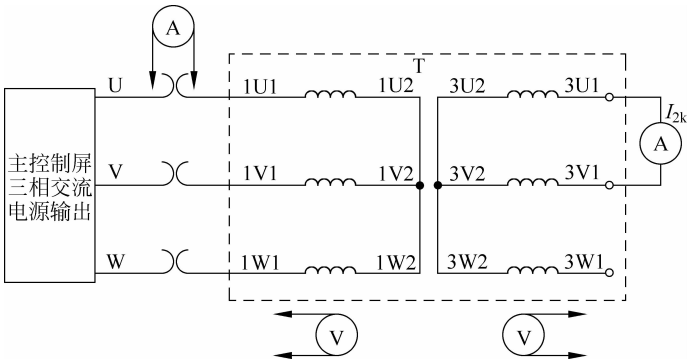


图 3-15 Yy 连接两相短路接线图

4. 测定变压器的零序阻抗

实验线路如图 3-16 所示。三相芯式变压器的高压绕组开路,三相低压绕组首、末端串联后接到电源。接通电源前,将电压调至零;接通电源后,逐渐增加外施电压,在输入电流 $I_0 = 0.25I_N$ 和 $I_0 = 0.5I_N$ 的两种情况下,测取变压器的 I_0 、 U_0 和 P_0 ,将数据记录于表 3-15 中。

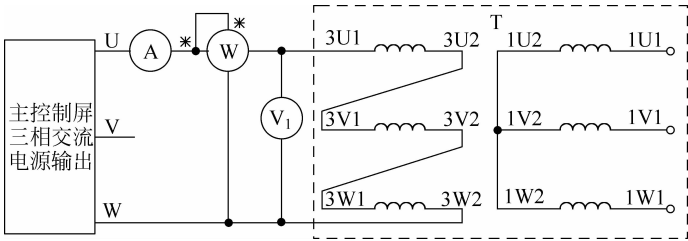


图 3-16 测定变压器零序阻抗接线图

表 3-15 测定变压器零序阻抗实验数据

I_0/A	U_0/V	P_0/W
$0.25I_N=$		
$0.5I_N=$		

3.3.6 实验报告

(1) 计算出不同连接组时的 $U_{1U1 \cdot 3V1}$ 、 $U_{1W1 \cdot 3W1}$ 、 $U_{1V1 \cdot 3W1}$ 的数值,并与实测值进行比较,判别绕组连接是否正确。

(2) 计算零序阻抗。

Yyn 三相芯式变压器的零序参数由下式求得:

$$Z_0 = \frac{U_0}{3I_0}, \quad r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$$

分别算出 $I_0=0.25I_N$ 和 $I_0=0.5I_N$ 时的 Z_0 、 R_0 、 X_0 ,取其平均值作为零序阻抗、零序电阻和零序电抗,并按下式算出标准值:

$$Z'_0 = \frac{I_{N\phi} Z_0}{U_{N\phi}}, \quad r'_0 = \frac{I_{N\phi} r_0}{U_{N\phi}}, \quad X'_0 = \frac{I_{N\phi} X_0}{U_{N\phi}}$$

式中 $I_{N\phi}$ 和 $U_{N\phi}$ 为变压器低压绕组的额定相电流和额定相电压。

(3) 计算短路情况下的原方电流。

① Yyn 单相短路。

副方电流 $\dot{I}_{3U1} = \dot{I}_{2k}$, $\dot{I}_{3V1} = \dot{I}_{2W1} = 0$

原方电流,设略去励磁电流不计,则

$$\dot{I}_{1U1} = -\frac{2}{3K} \dot{I}_{2k}, \quad \dot{I}_{1V1} = \dot{I}_{1W1} = \frac{\dot{I}_{2k}}{3K}$$

式中 K 为变压器的变比。

将 I_{1U1} 、 I_{1V1} 、 I_{1W1} 计算值与实测值进行比较,分析产生误差的原因,并讨论 Yyn 三相组式变压器带单相负载的能力以及中点移动的原因。

② Yy 两相短路。

副方电流 $\dot{I}_{3U1} = -\dot{I}_{3V1} = \dot{I}_{2k}$, $\dot{I}_{3W1} = 0$

原方电流 $\dot{I}_{1U1} = -\dot{I}_{1V1} = -\frac{\dot{I}_{2k}}{K}$, $\dot{I}_{1W1} = 0$

将 I_{1U1} 、 I_{1V1} 、 I_{1W1} 计算值与实测值进行比较,分析产生误差的原因,并讨论 Yy 带单相负载是否有中点移动的现象?为什么?

3.3.7 附录

变压器连接组校核公式

(设: $U_{3U1 \cdot 3V1} = 1$, $U_{1U1 \cdot 1V1} = K_L U_{3U1 \cdot 3V1} = K_L$)

组 别	$U_{1V1 \cdot 3V1} = U_{1W1 \cdot 3W1}$	$U_{1V1 \cdot 3W1}$	$U_{1V1 \cdot 3W1} / U_{1V1 \cdot 3V1}$
0	$K_L - 1$	$\sqrt{K_L^2 - K_L + 1}$	> 1
1	$\sqrt{K_L^2 - \sqrt{3} K_L + 1}$	$\sqrt{K_L^2 + 1}$	> 1
2	$\sqrt{K_L^2 - K_L + 1}$	$\sqrt{K_L^2 + K_L + 1}$	> 1
3	$\sqrt{K_L^2 + 1}$	$\sqrt{K_L^2 + \sqrt{3} K_L + 1}$	> 1
4	$\sqrt{K_L^2 + K_L + 1}$	$K_L + 1$	> 1
5	$\sqrt{K_L^2 + \sqrt{3} K_L + 1}$	$\sqrt{K_L^2 + \sqrt{3} K_L + 1}$	$= 1$
6	$K_L + 1$	$\sqrt{K_L^2 + K_L + 1}$	< 1
7	$\sqrt{K_L^2 - \sqrt{3} K_L + 1}$	$\sqrt{K_L^2 + 1}$	< 1
8	$\sqrt{K_L^2 + K_L + 1}$	$\sqrt{K_L^2 - K_L + 1}$	< 1
9	$\sqrt{K_L^2 + 1}$	$\sqrt{K_L^2 - \sqrt{3} K_L + 1}$	< 1
10	$\sqrt{K_L^2 - K_L + 1}$	$K_L - 1$	< 1
11	$\sqrt{K_L^2 - \sqrt{3} K_L + 1}$	$\sqrt{K_L^2 - \sqrt{3} K_L + 1}$	$= 1$

3.4 三相变压器的并联运行

3.4.1 实验目的

- (1) 学习和掌握三相变压器投入并联运行的方法。
- (2) 分析和研究并联运行时阻抗电压对负载分配的影响。

3.4.2 预习要点

- (1) 三相变压器并联运行的条件。不同连接组并联后会出现什么后果？
- (2) 阻抗电压对负载分配的影响。

3.4.3 实验项目

1. 将两台三相变压器空载投入并联运行
2. 阻抗电压相等的两台三相变压器并联运行
3. 阻抗电压不相等的两台三相变压器并联运行

3.4.4 实验设备及仪器

- (1) MCL 系列电机教学实验台主控制屏(含交流电压表、交流电流表)；
- (2) 功率表及功率因数表；
- (3) 三相芯式变压器(NMEL-02)；
- (4) 三相可调电阻 90Ω (NMEL-04)；
- (5) 开关板(NMEL-05B)；
- (6) 三相可调电抗(NMEL-08A)。

3.4.5 实验方法

实验线路如图 3-17 所示。

图中变压器 I 和 II 选用两台 NMEL-02 三相芯式变压器,其中不用低压线圈。根据实验 3.3 方法确定三相变压器原、副方极性后,根据变压器的铭牌接成 Yy 接法。

将两台变压器的高压绕组并连接电源,中压绕组经开关 S_1 并联后,再由开关 S_2 接负载电阻 R_L 。 R_L 选用 NMEL-04 的 180Ω 阻值。

为了人为地改变变压器 II 的阻抗电压,在变压器 II 的副方串入电抗 X_L (或电阻 R)。 X_L 选用 NMEL-08,要注意选用 R_L 和 X_L (或 R) 的允许电流应大于实验时实际流过的电流。

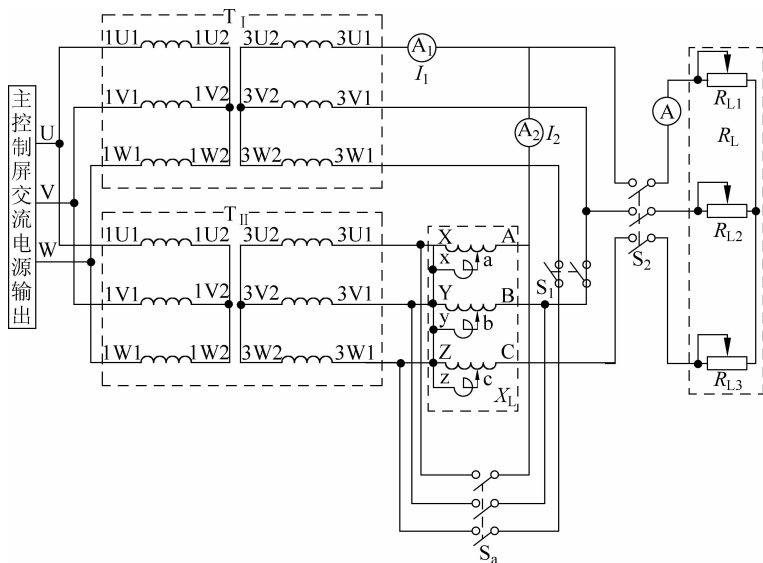


图 3-17 三相变压器并联运行实验接线图

1. 两台三相变压器空载投入并联运行的步骤

(1) 检查变比和连接组。

接通电源前,先打开 S_1 、 S_2 ,合上 S_a 。

然后接通电源,调节变压器输入电压至额定电压。

测出变压器副方电压,若电压相等,则变比相同;测出副方对应相的两端点间的电压,若电压均为零,则连接组相同。

(2) 投入并联运行。

在满足变比相等和连接组相同的条件后,合上开关 S_1 ,即投入并联运行。

2. 阻抗电压相等的两台三相变压器并联运行

投入并联后,合上负载开关 S_2 。

在保持 $U_1 = U_{1N}$ 不变的条件下,逐次增加负载电流,直至其中一台输出电流达到额定值为止。测取 I 、 I_I 、 I_{II} ,共取 5~6 组数据,记录于表 3-16 中。

表 3-16 三相变压器并联运行实验数据(阻抗电压相等)

序 号	I_I / A	I_{II} / A	I / A
1			
2			
3			
4			
5			
6			

3. 阻抗电压不相等的两台三相变压器并联运行

打开短路开关 S_a , 在变压器 T_{II} 的副方串入电抗 X_L (或电阻 R), X_L 的数值可根据需要调节。重复前面实验, 测取 I 、 I_I 、 I_{II} , 共取 5~6 组数据, 记录于表 3-17 中。

表 3-17 三相变压器并联运行实验数据(阻抗电压不相等)

序 号	I_I / A	I_{II} / A	I / A
1			
2			
3			
4			
5			
6			

3.4.6 实验报告

- (1) 根据实验(2)的数据, 画出负载分配曲线 $I_I = f(I)$ 及 $I_{II} = f(I)$ 。
- (2) 根据实验(3)的数据, 画出负载分配曲线 $I_I = f(I)$ 及 $I_{II} = f(I)$ 。
- (3) 分析实验中阻抗电压对负载分配的影响。