

# 《电机学》 实验指导书

电气工程学院  
电力工程实验中心

# 目 录

第一章	实验前的准备	1
第二章	实验项目	3
实验一	三相变压器参数测定 .....	1
	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. 纯电阻负载实验: 保持 $U_1=U_{1N}$ , $\cos\varphi_2=1$ 的条件下, 测取 $U_2=f(I_2)$	
实验二	三相变压器的联接组和不称短路 .....	8
	1. 测定三相变压器的极性	
	2. 连接并判定联接组	
	3. 不对称短路	
	4. 测定 Y, y0 联接的三相变压器的零序阻抗	
	5. 观察不同连接法和不同铁心结构对空载电流、电动势波形的影响	
实验三	三相鼠笼异步电动机的参数测定 .....	19
	1. 用伏安法测量定子绕组的冷态电阻	
	2. 异步电动机的空载试验: 测空载特性曲线 $U_{10}=f(I_1)$ 、 $P_{10}=f(U_{10}^2)$	
	3. 异步电动机的短路试验: 测短路特性曲线 $I_k=f(U_k)$ 、 $P_k=f(U_k)$	
实验四	三相鼠笼异步电动机的工作特性 .....	26
	1. 测量定子绕组的极性	
	2. 异步电动机的负载试验	
实验五	三相同步发电机的对称运行 .....	32
	1. 用伏安法测量电枢绕组的实际冷态直流电阻	
	2. 测定同步发电机的空载特性: 测空载特性曲线 $U_0=f(I_f)$ , 同时检查三相电压的对称性	
	3. 测定同步发电机的短路特性: 测三相短路特性曲线 $I_k=f(I_f)$ , 同时检查三相电流的对称性	

## 实验六 三相同步电机的并联运行 .....38

1. 用准确同步法将三相同步发电机投入电网并联运行
2. 用自同步法将三相同步发电机投入电网并联运行
3. 三相同步发电机并网运行时有功功率的调节
4. 三相同步发电机并网运行时无功功率的调节：测取当发电机输出有功功率等于 0、和 0.25 倍额定功率时的 U 形曲线  $I=f(I_f)$

## 实验七 直流发电机 .....44

1. 他励直流发电机
  - (1) 空载特性：测取  $U_0=f(I_f)$
  - (2) 外特性：测取  $U=f(I)$
  - (3) 调节特性：测取  $I_f=f(I)$
2. 并励直流发电机
  - (1) 自励电压建立过程
  - (2) 外特性：测取  $U=f(I)$

## 实验八 他励直流电动机 .....51

1. 他励电动机启动和改变旋转方向
2. 他励直流电动机的工作特性和机械特性：测取  $n$ 、 $T_2$ 、 $n=f(I_a)$ 、 $n=f(T_2)$
3. 他励直流电动机的调速特性
  - (1) 改变电枢电压调速
  - (2) 改变电枢回路串联电阻  $R$  调速
  - (3) 改变励磁电流调速

# 第一章

## 一. 实验前的准备

经验证明, 实验质量的好坏, 实验能否顺利进行在很大程度上决定于学生事先准备是否充分。为此在实验前学生应进行认真的准备。

1、 了解和复习本实验有关的理论知识, 认真研读实验指导书, 明确本实验的目的, 了解本实验的内容、方法步骤和实验过程中应注意的问题。

2、 根据实验内容和要求自拟实验接线图, 确定实验步骤和需要记录的数据, 并预先作好记录表格。

学生准备的情况如何, 实验前教师要进行抽查。如认为不充分可令其重新准备, 推迟进行实验。

## 二. 实验的进行

### (一) 建立小组、合理分工

每次实验以小组为单位进行, 每组由 3-4 人组成, 每组推选组长一人, 组长负责组织实验的进行, 安排实验时的分工。例如: 记录、接线、调节负载等, 务求在实验过程中操作协调读数准确, 并尽可能使每人都得到全面锻炼。

### (二) 按图接线, 力求简明

开始接线前首先熟悉实验机组, 记录电机及所用其它设备的铭牌, 合理的选择仪表及量程。

### (三) 按图接线, 力求简明

开始接线前首先应考虑设备和仪表如何放置, 其原则为:

- 1、使整个电路最简单, 最清楚而且安全。
- 2、使调节和读数最方便。

设备摆好后接线的原则是:

a、先接主要电路, 再接次要电路, 也就是说, 由电源开关向下, 先接主要的串联电路, 如系三机, 则三根线一起往下接, 如系单机, 则从一级出发, 经主要电路后最后返回到另一极。

b、联接线主回路用粗线, 并联回路用细线。因主回路电流大且这样接线也最清楚。联接线的长短要适当, 所有的接头要拧紧。

c、仪表不接死在电路中, 只在需要读数时才通过电流插头和电压触笔把表计引入电路。

d、全部线接好后, 必须全组作一次检查, 检查内容包括: 接线是否正确、设备的规范是否配合、调节设备是否在正确的位置、所有仪表量程是否正确、指针是否在零位、实验台上不能有多余的导线, 全组取得一致意见后再请指导教师检查。

### (四) 进行实验

1、每个同学对实验内容有清楚了解, 现在做那一部分实验、应调节什么、保持什么? 读取那些数据? 各种数据变化大致情况怎样? 经仔细考虑, 明确分工后才能合上总电源开关。

2、合上电源开关后应注意各部分的情况是否正常, 引入表计看读数是否合理, 如有不正常现象应立即关闭总电源开关, 检查原因, 待一切情况正常才能开始实验。

3、开始进行实验首先应按步骤要求调节, 观察得到的工作状态及变化规律, 如全部正常才逐点读数进行记录。

### 4、读数

- a、先熟悉表计的量程、刻度。
  - b、各仪表的读数应同时读取，当表计指示值变动较快时应由一人发令，大家一起读，如果来不及读出数来可先记下指针位置再慢慢读数。
  - c、读数力求准确，不要硬凑整数。
  - d、读取数据的多少？每组数据的间隔，应根据实验要求决定，数据太多浪费时间，数据太少则达不到要求，一般在曲线的直线部分可少取几点，弯曲部分多取几点。
  - e、随时校正数据正确性，如发现数据不合理，则应检查原因重新读取。
- 5、整个实验进行中应经常密切注意各设备的运转情况，如有问题应迅速报告指导教师，情况紧急则应立即关闭电源开关，再进行处理。
- 6、实验完毕应将数据交指导教师审阅，经同意后方可拆线（拆线前先要关闭电源）然后把设备和导线整理好后才能离开实验室。

### 三、实验报告

实验报告应根据实验目的，实测数据及在实验中观察发现的问题进行分析研究，得出结论或通过讨论分析写出的心得体会。

实验报告的写法和要求是：简明扼要、字迹清楚、图标整洁、结论明确，其内容包括：

- 1、实验名称、专业班级、组别、姓名、同组同学姓名、实验日期、室温℃。
  - 2、列出被试电机和使用设备仪表的编号，规格，铭牌数据。
  - 3、扼要写出实验目的。
  - 4、给出实验时所用的接线图，并注明仪表量程。
  - 5、数据的整理和计算，列出数据表格，各数据的单位和测试条件应在表上注明。
- 各项计算所得数据，应列出计算公式并以一组数据为例进行计算，其他用相同方法计算所得结果可直接列入表内。
- 6、曲线
- a、曲线必须用方格纸画，图的大小不得小于 80cm\*80cm。
  - b、比列的选择看曲线的性质而定，原则应使作图和应用最为方便，坐标习惯由 0 值开始，避免不应有的夸大作用。
  - c、曲线要用曲线尺或由线板连成光滑曲线，但不一定包括所有点子，每条曲线须注明其名称及获得该曲线的条件。
  - d、不同电机的相同曲线或同一电机的不同曲线可画在同一纸上，以便比较，但要妥善安排，避免相切，最好用不同的记号画各曲线的点子，用不同颜色画不同曲线。
- 7、讨论

讨论是实验报告中重要的部分，根据实验结果，进行计算分析，看那些理论被验证了，那些实验结果和理论有出入，具体原因何在，对所试电机的性能作出结论或评价；根据不同实验方法所得的结果进行比较，讨论各种实验方法的优缺点，提出改进实验内容、方法、设备的建议。

### 四、电机实验安全注意事项

为确保电机实验时人身和设备的安全，按时顺利完成电机实验，特提出以下几点注意事项：

- 1、在实验进行中人体的任何部分不可接触带电部分。
- 2、电源必须经开关、保险丝之后接入负载，接线或拆线都必须在断开电源的情况下进行。
- 3、同学完成接线或改接线路后，必须经指导教师检查允许后方可合上电源。
- 4、合上或拉断开关时必须考虑成熟，快合快断，以免产生电弧烧坏闸刀。合闸时应使刀片全部投入刀座，以保持接触良好。

5、实验时应注意衣服、围巾、发辫及所用导线等不卷入电机的旋转部分，更不允许用身体去碰电机的旋转部分。

6、保持手部干燥，在线路有电时进行操作尽可能只用单手。

7、实验进行中发现不正常现象，如设备冒烟、焦味、声音异常应立即断开电源，然后进行检查处理。如发生重大事故如人身触电，设备着火而来不及断开电源开关时，立即拉掉总开关，整个实验室则断电。

8、正常情况需要停机，应先将负载减小，然后关闭电源开关。

## 实验一 三相变压器参数测定

### 一. 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. 通过空载、短路及负载实验，测取三相变压器的参数和运行特性。

### 二. 预习要点

1. 如何用两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. 三相心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？电源应加在哪一方较合适？

### 三. 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. 纯电阻负载实验：保持  $U_1=U_{1N}$ ， $\cos\varphi_2=1$  的条件下，测取  $U_2=f(I_2)$ 。

### 四. 实验设备及仪器

1. 电机教学实验台主控制屏 BMEL-II
2. 交流电压、电流表（BMEL-33A）
3. 功率、功率因数表（BMEL-33F）
4. 三相变压器（在主控制屏的右下方）
5. 三相调压器（在主控制屏的左下方）

### 五. 实验线路及步骤

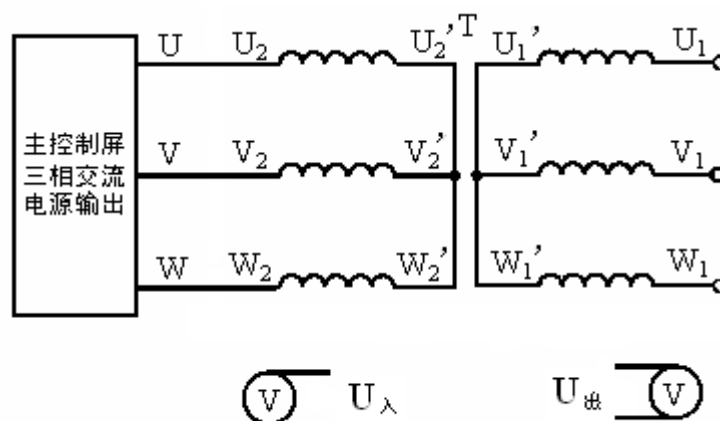


图1-1 三相变压器变比实验接线图

### (一). 测定变比

实验线路如图 1-1 所示，实验时，**变压器低压线圈接电源，高压线圈开路**。被试三相变压器，额定容量  $S_N=2\text{KVA}$ ， $U_N=380/220\text{V}$ ， $I_N=3.04/5.25\text{A}$ ，Y/ $\Delta$ /Y 接法。实验时只用高、低压两组线圈，高压绕组标记用  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ 、 $U_1'$ 、 $V_1'$ 、 $W_1'$ 。低压绕组标记用  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ 、 $U_2'$ 、 $V_2'$ 、 $W_2'$ 。

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

b. 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，使变压器空载电压  $U_\lambda=U_N=220\text{V}$ ，使用数字万用表测取高、低压线圈的线电压  $U_{U1.V1}$ 、 $U_{V1.W1}$ 、 $U_{W1.U1}$ 、 $U_{U2.V2}$ 、 $U_{V2.W2}$ 、 $U_{W2.U2}$ ，记录于表 1-1 中。

表 1-1

U (V)		$K_{UV}$	U (V)		$K_{VW}$	U (V)		$K_{WU}$	$K=1/3(K_{UV}+K_{VW}+K_{WU})$
$U_{U1.V1}$	$U_{U2.V2}$		$U_{V1.W1}$	$U_{V2.W2}$		$U_{W1.U1}$	$U_{W2.U2}$		

表中： $K_{UV}=U_{U1.V1}/U_{U2.V2}$ 、 $K_{VW}=U_{V1.W1}/U_{V2.W2}$ 、 $K_{WU}=U_{W1.U1}/U_{W2.U2}$

### (二). 空载实验

实验线路如图 1-2 所示。实验时，**变压器低压线圈接电源，高压线圈开路**。

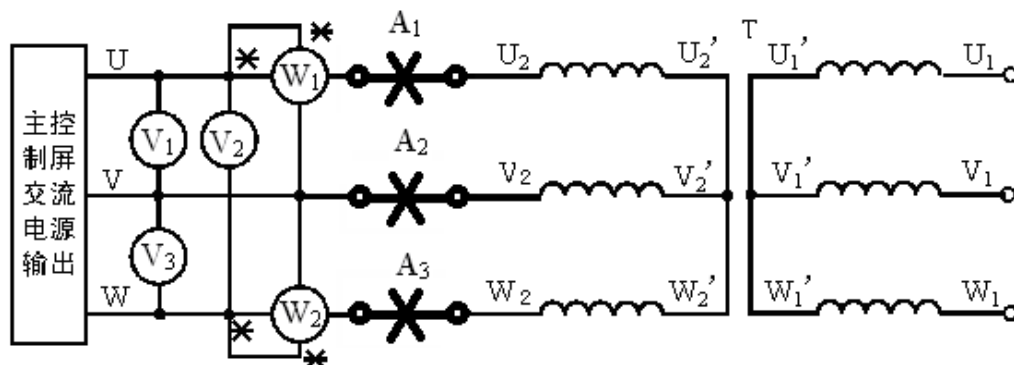


图 1-2 三相变压器空载实验接线图

A、V、W 分别为交流电流表、交流电压表、功率表。上述仪表为智能型数字仪表，量程可自动也可手动选择。

功率表接线时，需注意电压线圈和电流线圈的同名端，避免接错线。

a. 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，顺时针调节调压器旋钮，使变压器空载电压  $U_\lambda=1.2U_N=264\text{V}$ 。

b. 然后，逐次降低电源电压，在  $1.2U_N\sim 0$  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 1-2 中。**其中  $U_\lambda=U_N$  的点必须测**，并在该点附近测的点应密些。

c. 数据测量完成以后，断开三相电源，以便为下次实验作做好准备。



表 1-2

序号	实 验 数 据								计 算 数 据			
	$U_0$ (V)			$I_0$ (A)			$P_0$ (W)		$U_0$	$I_0$	$P_0$	$\cos\varphi_0$
	$U_{U2, V2}$	$U_{V2, W2}$	$U_{W2, U2}$	$I_{U2}$	$I_{V2}$	$I_{W2}$	$P_{01}$	$P_{02}$	(V)	(A)	(W)	
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												

### (三) 短路实验

实验线路如图 1-3 所示，变压器高压线圈接电源，低压线圈直接短路。其短路导线联接要牢。变压器的短路电压值约为  $(3-15)\% U_N$ 、短路电流  $I_K=1.1I_N$ ，依此范围来选择电压表、电流表和功率表量程。

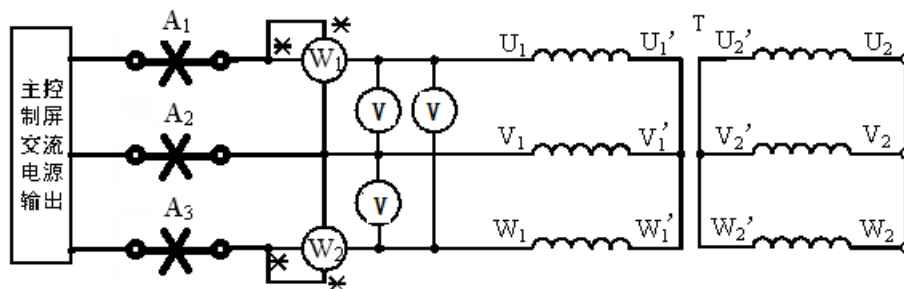


图 1-3 三相变压器短路实验接线图

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  $I_K=1.1I_N$ 。然后逐次降低电源电压，在  $1.1I_N \sim 0$  的范围内，测取变压器的三相输入电压、电流及功率，共取 6~7 组数据，记录于表 1-3 中，其中  $I_K=I_N$  点必测。实验时，记下实验室环境温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )，作为线圈的实际温度。

表 1-3

 $\theta =$   $^{\circ}\text{C}$ 

序号	实 验 数 据								计 算 数 据			
	$U_K$ (V)			$I_K$ (A)			$P_K$ (W)		$U_K$	$I_K$	$P_K$	$\cos\varphi_K$
	$U_{U1, V1}$	$U_{V1, W1}$	$U_{W1, U1}$	$I_{U1}$	$I_{V1}$	$I_{W1}$	$P_{K1}$	$P_{K2}$	(V)	(A)	(W)	
1												
2												
3												
4												

表中： $I_K=1/3 (I_{U1}+I_{V1}+I_{W1})$

$$U_k = 1/3 (U_{u1v1} + U_{v1w1} + U_{u1w1})$$

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

#### (四)．纯电阻负载实验

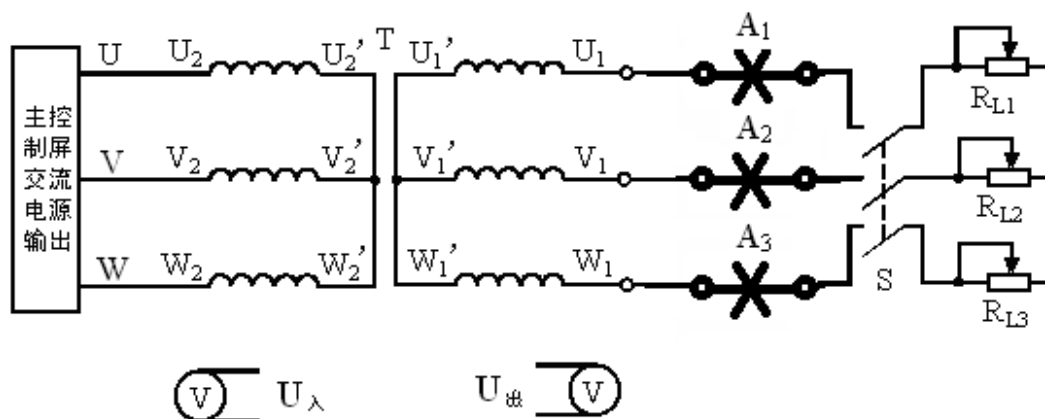


图1-4 三相变压器负载实验接线图

实验线路如图 1-4 所示，变压器低压线圈接电源，高压线圈经开关 S 接负载电阻  $R_L$ ， $R_L$  选用三只 1800  $\Omega$  电阻。

a. 将负载电阻  $R_L$  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  $U_1 = U_N$ 。

b. 在保持  $U_1 = U_N$  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 1-4 中，其中  $I_2 = 0$  和  $I_2 = I_N$  两点必测。

表 1-4

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

序号	U (V)				I (A)			
	$U_{U1.V1}$	$U_{V1.W1}$	$U_{W1.U1}$	$U_2$	$I_{U1}$	$I_{V1}$	$I_{W1}$	$I_2$
1								
2								
3								
4								
5								
6								

## 六. 注意事项

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（为什么？）。做短路实验时操作要快，否则线圈发热会引起电阻变化。

## 七. 实验报告

### 1. 计算变压器的变比

根据实验数据，计算出各项的变比，然后取其平均值作为变压器的变比。

$$K_{UV} = \frac{U_{U1.V1}}{U_{U2.V2}}, K_{VW} = \frac{U_{V1.W1}}{U_{V2.W2}}, K_{WU} = \frac{U_{W1.U1}}{U_{W2.U2}}$$

### 2. 根据空载实验数据作空载特性曲线并计算激磁参数

(1) 绘出空载特性曲线  $U_0=f(I_0)$ ， $P_0=f(U_0)$ ， $\cos\phi_0=f(U_0)$ 。

式中

$$U_0 = (U_{U2.V2} + U_{V2.W2} + U_{W2.U2})/3$$

$$I_0 = (I_{U2O} + I_{V2O} + I_{W2O})/3$$

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

$$\cos\phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0I_0}$$

#### (2) 计算激磁参数

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

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

### 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  $U_K=f(I_K)$ ， $P_K=f(I_K)$ ， $\cos\phi_K=f(I_K)$ 。

式中

$$U_K = (U_{U1.V1} + U_{V1.W1} + U_{W1.U1})/3$$

$$I_K = (I_{U1} + I_{V1} + I_{W1})/3$$

$$P_K = P_{K1} + P_{K2}$$

$$\cos\phi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3}U_KI_K}$$

#### (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

$$r'_K = \frac{P_K}{3I_N^2}, Z_K = \frac{U_K}{\sqrt{3}I_N}, X'_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K'^2}$$

折算到低压方

$$Z_K = \frac{Z'_K}{K^2}, r_K = \frac{r'_K}{K^2}, X_K = \frac{X'_K}{K^2}$$

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。

$$U_K = \frac{\sqrt{3}I_N Z_{K75^{\circ}C}}{U_N} \times 100\%$$

$$U_{Kr} = \frac{\sqrt{3}I_N r_{K75^{\circ}C}}{U_N} \times 100\%$$

$$U_{KX} = \frac{\sqrt{3}I_N X_K}{U_N} \times 100\%$$

$I_K=I_N$  时的短路损耗  $P_{KN}=3I_N^2 r_{K75^{\circ}C}$

4. 利用由空载和短路实验测定的参数，画出被试变压器的“Γ”型等效电路。

5. 变压器的电压变化率  $\Delta U$

(1) 根据实验数据绘出  $\cos\varphi=1$  时的特性曲线  $U_2=f(I_2)$ ，由特性曲线计算出  $I_2=I_{2N}$  时的电压变化率  $\Delta U$ 。

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

(2) 根据实验求出的参数，算出  $I_2=I_N$ ， $\cos\varphi=1$  时的电压变化率  $\Delta U$

$$\Delta U = \beta(U_{Kr} \cos\varphi_2 + U_{KX} \sin\varphi_2)$$

6. 绘出被试变压器的效率特性曲线

(1) 用间接法算出在  $\cos\varphi=0.8$  时，不同负载电流时的变压器效率，记录于表 1-5 中。

表 1-5

$\cos\varphi=0.8$ ,  $P_0=$  W,  $P_{KN}=$  W

$I_2$	$P_2$ (W)	$\eta$
0.2		
0.4		
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		

$$\eta = (1 - \frac{P_0 + I_2^2 P_{KN}}{I_2^2 P_N \cos\varphi_2 + P_0 + I_2^2 P_{KN}}) \times 100\%$$

式中  $I_2^2 P_N \cos\varphi_2 = P_2$

$P_N$  为变压器的额定容量

$P_{KN}$  为变压器  $I_K=I_N$  时的短路损耗

$P_0$  为变压器的  $U_0=U_N$  时的空载损耗

(2) 计算被试变压器  $\eta = \eta_{\max}$  时的负载系数  $\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KN}}}$ 。

## 八、分析讨论

1. 本实验中空载实验在低压边加电源，短路实验在高压边加电源，为何要这样做？
2. 为何空载实验时，所测量的数据中一定要包含额定电压点。

3. 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。
4. 为什么空载损耗可代表变压器的铁损耗，短路损耗可代表变压器的铜损耗？

## 实验二 三相变压器的联接组和不平衡短路

### 一. 实验目的

1. 掌握用实验方法测定三相变压器绕组的极性。
2. 掌握用实验方法判别变压器的联接组别。
3. 研究三相变压器不平衡短路。
4. 观察三相变压器不同绕组连接法和不同铁心结构对空载电流、电动势波形的影响。

### 二. 预习要点

1. 联接组的定义。为什么要研究联接组。国家规定的标准联接组有哪几种。
2. 如何把 Y, y0 联接组改成 Y, y6 联接组以及把 Y, d11 改为 Y, d5 联接组。
3. 在不平衡短路情况下, 哪种联接的三相变压器电压中点偏移较大。
4. 三相变压器绕组的连接法和磁路系统对空载电流和电动势波形的影响。

### 三. 实验项目

- (一). 测定三相变压器的极性
- (二). 连接并判定以下联接组
  - (1) Y, y0
  - (2) Y, y6
  - (3) Y, d11
  - (4) Y, d5
- (三). 不平衡短路
  - (1) Y, yn0 联接单相短路
  - (2) Y, y0 联接二相短路
  - (3) D, yn11 联接单相短路
- (四). 测定 Y, y0 联接的三相变压器的零序阻抗。
- (五). 观察不同连接法和不同铁心结构对空载电流、电动势波形的影响。

### 四. 实验设备及仪器

1. 电机教学实验台主控制屏 BMEL-II
2. 交流电压、电流表 (BMEL-33A)
3. 功率、功率因数表 (BMEL-33F)
4. 三相变压器 (在主控制屏的右下方)
5. 三相调压器 (在主控制屏的左下方)
6. 示波器 (自配)

## 五. 实验方法

### (一). 测定极性

#### 1. 测定相间极性

被试变压器额定容量  $S_N=2\text{KVA}$ ,  $U_N=380 / 220\text{V}$ ,  $I_N=3.04 / 5.25\text{A}$ , Y / Y 接法。我们知道当铁芯式三相变压器原绕组各相间极性连接正确时, 各相磁通在会合处相加等于零, 即  $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$  磁通全部走铁芯闭路。如果有一相绕组 (例如 U 相) 极性接反了, 此时三相磁通在会合处合成不等于零。即  $-\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C \neq 0$  合成磁通只能通过空气隙形成回路, 磁阻大大增加, 激磁电流会超过额定电流很多而烧坏变压器, 因此相间极性绝对不能接错。测定各绕组相间极性的方法如下:

首先用万用表的电阻挡测出高、低压线圈 12 个出线之间哪两个相通, 并观察其阻值。阻值大为高压绕组, 用  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ 、 $U_1'$ 、 $V_1'$ 、 $W_1'$ 、标记。低压绕组标记用  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ 、 $U_2'$ 、 $V_2'$ 、 $W_2'$ 。

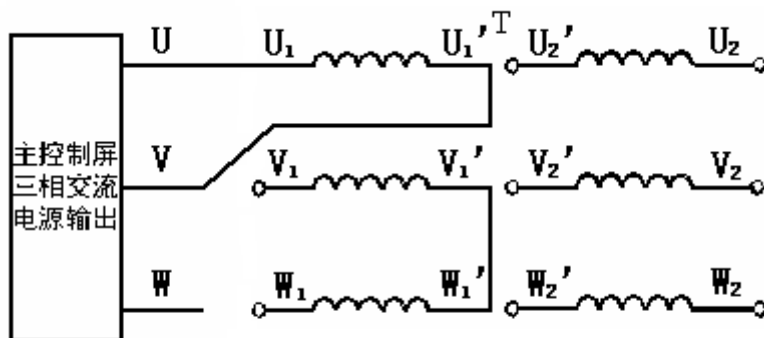


图 2-1 测定相间极性接线图

- 按照图 2-1 接线, 将  $U_1$ 、 $U_1'$  和电源 U、V 相连,  $V_1'$ 、 $W_1'$  两端点用导线相联。
- 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, 在 U、V 间施加约 50% $U_N$  的电压 (190V)。
- 测出电压  $U_{V_1V_1'}$ 、 $U_{W_1W_1'}$ ,  $U_{V_1W_1}$ , 若  $U_{V_1W_1} = |U_{V_1V_1'} - U_{W_1W_1'}|$ , 则首末端标记正确; 若  $U_{V_1W_1} = |U_{V_1V_1'} + U_{W_1W_1'}|$ , 则标记不对。须将 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, 另外两相末端相联, 定出每相首、末端正确的标记

#### 2. 测定原、付方极性

- 暂时标出三相低压绕组的标记  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ 、 $U_2'$ 、 $V_2'$ 、 $W_2'$ , 然后按照图 2-2 接线。原、付方中点用导线相连。
- 高压三相绕组施加约 50% 的额定电压 (190V), 测出电压  $U_{U_1U_2}$ 、 $U_{V_1V_2}$ 、 $U_{W_1W_2}$ 、 $U_{U_2U_2'}$ 、 $U_{V_2V_2'}$ 、 $U_{W_2W_2'}$ 、 $U_{U_1U_1'}$ 、 $U_{V_1V_1'}$ 、 $U_{W_1W_1'}$ , 若  $U_{U_1U_2} = U_{U_1U_1'} - U_{U_2U_2'}$ , 则 U 相高、低压绕组同柱, 并且首端  $U_1$  与  $U_2$  点极性相同或称减极性;  $U_{U_1U_2} = U_{U_1U_1'} + U_{U_2U_2'}$ , 则  $U_1$  与  $U_2$  端点极性相反或称加极性。

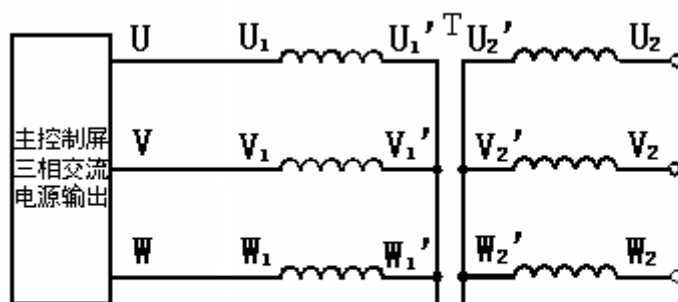


图2-2 测定付方极性接线图

c. 用同样的方法判别出 V、W 两相原、付方的极性。高低压三相绕组的极性确定后，把各相首末端作正式标记（国标规定：变压器一律采用减极性）。然后根据要求连接出不同的联接组。

## （二）. 检验联接组

### 1. Y, y0

按照图 2-3 接线。U1、U2 两端点用导线联接，在高压方施加三相对称的额定电压  $U_N=380V$ ，用电压表测出  $U_{U1.V1}$ 、 $U_{U2.V2}$ 、 $U_{V1.V2}$ 、 $U_{W1.W2}$  及  $U_{V1.W2}$ ，将数字记录于表 2-1 中。

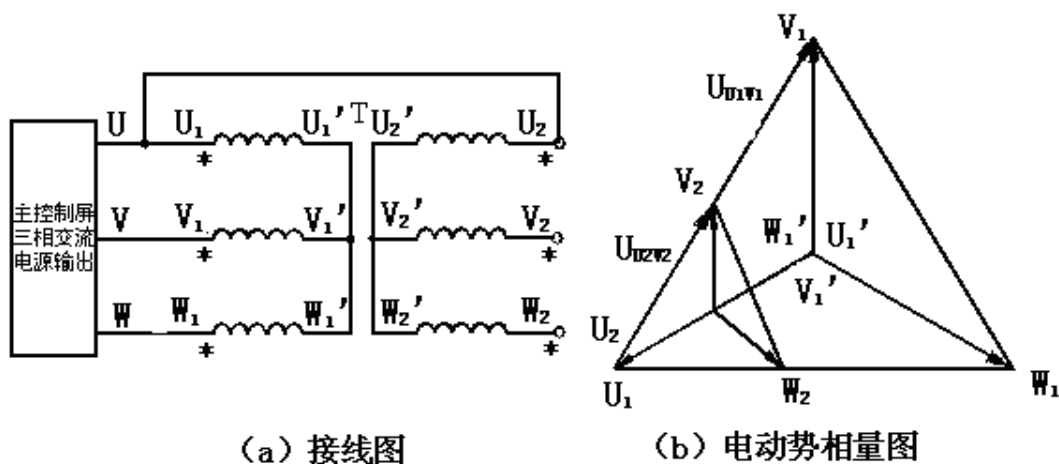


图2-3 Y, y0 联接组

表 2-1

实 验 数 据					计 算 数 据			
$U_{U1.V1}$ (V)	$U_{U2.V2}$ (V)	$U_{V1.V2}$ (V)	$U_{W1.W2}$ (V)	$U_{V1.W2}$ (V)	$K_L$	$U_{V1.V2}$ (V)	$U_{W1.W2}$ (V)	$U_{V1.W2}$ (V)

根据 Y, y0 联接组的电动势相量图可知：

$$U_{V1.V2} = U_{W1.W2} = (K_L - 1)U_{U2.V2}$$



$$U_{V1.W2} = U_{U2.V2} \sqrt{(K_L^2 - K_L + 1)}$$

$$K_L = \frac{U_{U1.V1}}{U_{U2.V2}} \quad K_L = \frac{380V}{220V} = \sqrt{3}$$

若用两式计算出的电压  $U_{V1.V2}$ ,  $U_{W1.W2}$ ,  $U_{V1.W2}$  的数值与实验测取的数值相同, 则表示绕组连接正常, 属 Y, y0 联接组。

## 2. Y, y6

将 Y, y0 联接组的付方绕组首、末端对调,  $U1$ 、 $U2'$  两点用导线相连, 如图 2-4 所示。

按前面方法用电压表测出电压  $U_{U1.V1}$ 、 $U_{U2'.V2'}$ 、 $U_{V1.V2'}$ 、 $U_{W1.W2'}$  及  $U_{V1.W2'}$ , 将数据记录于表 2-2 中。

根据 Y, y6 联接组的电动势相量图可得

$$U_{V1.V2'} = U_{W1.W2'} = (K_L + 1)U_{U2'.V2'}$$

$$U_{V1.W2'} = U_{U2'.V2'} \sqrt{(K_L^2 + K_L + 1)}$$

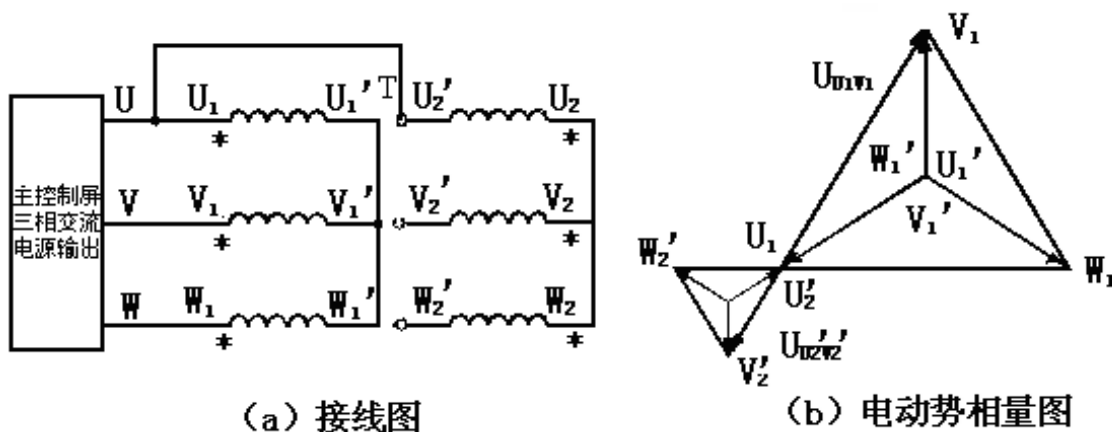


图 2-4 Y, y6 联接组

若由上两式计算出电压  $U_{V1.V2'}$ 、 $U_{W1.W2'}$ 、 $U_{V1.W2'}$  的数值与实测相同, 则线圈连接正确, 属于 Y, y6 联接组。

表 2-2

实 验 数 据					计 算 数 据			
$U_{U1.V1}$ (V)	$U_{U2'.V2'}$ (V)	$U_{V1.V2'}$ (V)	$U_{W1.W2'}$ (V)	$U_{V1.W2'}$ (V)	$K_L$	$U_{V1.V2'}$ (V)	$U_{W1.W2'}$ (V)	$U_{V1.W2'}$ (V)

## 3. Y, d11

按图 2-5 (a) 接线, 高压方施加对称额定电压 380V, 测量低压绕组开口电压, 若电压为零或接近零, 则表示联接正确, 可把开口闭合。若电压为两倍的线电压, 则肯定有一相接错, 如果闭合开口将引起短路, 这时就要找出接错的一相, 并将其改正, 重新测量开口电压, 只有开口电压为零, 才能把开口闭合。当付方开口电压为零后, 闭合三角形按图 2-5 (b)

接线，三相变压器接成 Y，d11，把  $U_1$ 、 $U_2$  两端点用导线相连，

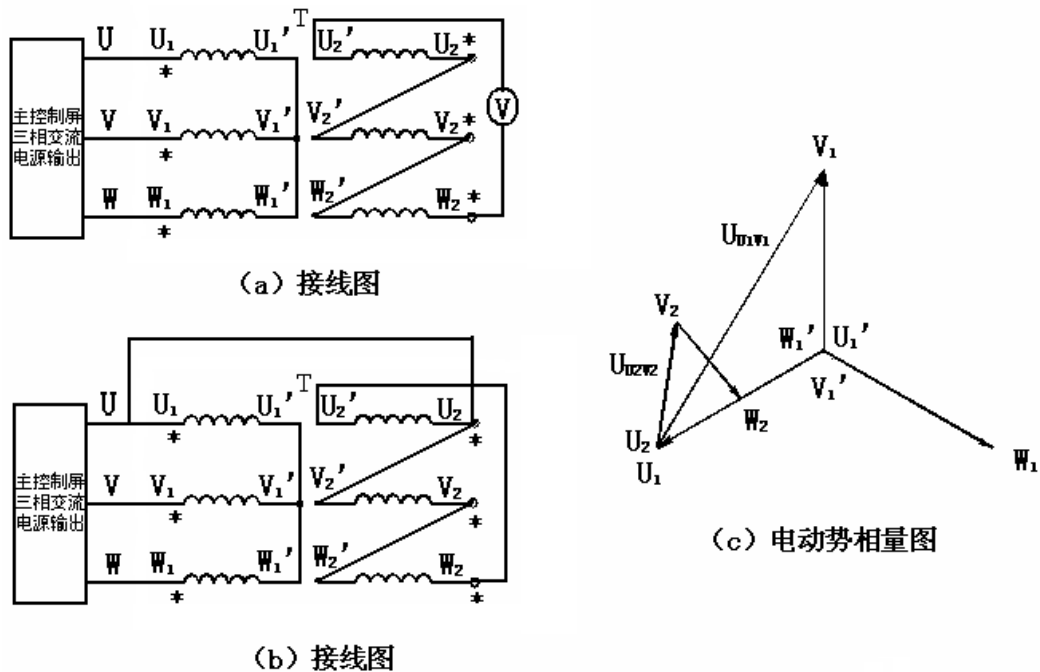


图 2-5 Y，d11 联接组

用电压表测取  $U_{U1V1}$ 、 $U_{U1V2}$ 、 $U_{V1V2}$ 、 $U_{W1W2}$  及  $U_{V1W2}$ ，将数据记录于表 2-3 中

表 2-3

实 验 数 据					计 算 数 据			
$U_{U1V1}$ (V)	$U_{U2V2}$ (V)	$U_{V1V2}$ (V)	$U_{W1W2}$ (V)	$U_{V1W2}$ (V)	$K_L$	$U_{V1V2}$ (V)	$U_{W1W2}$ (V)	$U_{V1W2}$ (V)

根据 Y，d11 联接组的电动势相量可得

$$U_{V1V2} = U_{W1W2} = U_{V1W2} = U_{U2V2} \sqrt{K_L^2 - \sqrt{3}K_L + 1}$$

注：线电压之比  $K_L = \frac{U_{U1V1}}{U_{U2V2}}$  数值和 Y，y 联接时不同。  $K_L = \frac{380V}{127V} \approx 3$

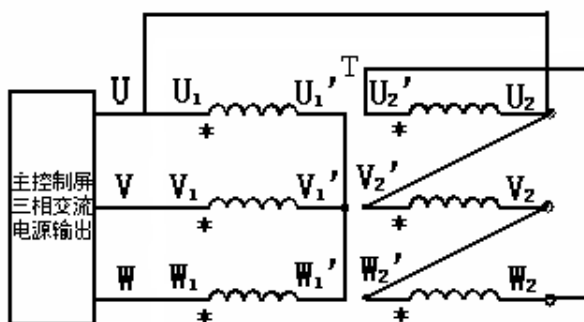
若由上式计算出的电压  $U_{V1V2}$ 、 $U_{W1W2}$ 、 $U_{V1W2}$  的数值与实测值相同，则线圈连接正确，属 Y，d11 联接组。

#### 4. Y，d5

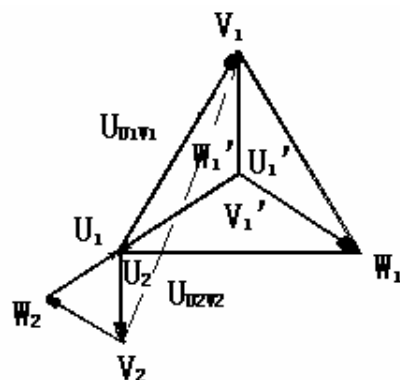
将 Y，d5 联接组的付方线圈首、末端的标记对调，如图 2-6 所示。实验方法同前，高压方施加对称额定电压 380V，用电压表测取  $U_{U1V1}$ 、 $U_{U2V2}$ 、 $U_{V1V2}$ 、 $U_{W1W2}$ 、 $U_{V1W2}$ ，将数据记录于表 2-4 中。

根据 Y, d5 联接组的电动势相量图可得

$$U_{V1.V2} = U_{W1.W2} = U_{V1.W2} = U_{U2.V2} \sqrt{K_L^2 + \sqrt{3}K_L + 1}$$



(a) 接线图



(b) 电动势相量图

图2-6 Y, d5 联接组

若由上式计算出的电压  $U_{V1.V2}$ 、 $U_{W1.W2}$ 、 $U_{V1.W2}$  的数值与实测值相同，则线圈连接正确，属于 Y, d5 联接组。

表 2-4

实 验 数 据					计 算 数 据			
$U_{U1.V1}$ (V)	$U_{U2.V2}$ (V)	$U_{V1.V2}$ (V)	$U_{W1.W2}$ (V)	$U_{V1.W2}$ (V)	$K_L$	$U_{V1.V2}$ (V)	$U_{W1.W2}$ (V)	$U_{V1.W2}$ (V)

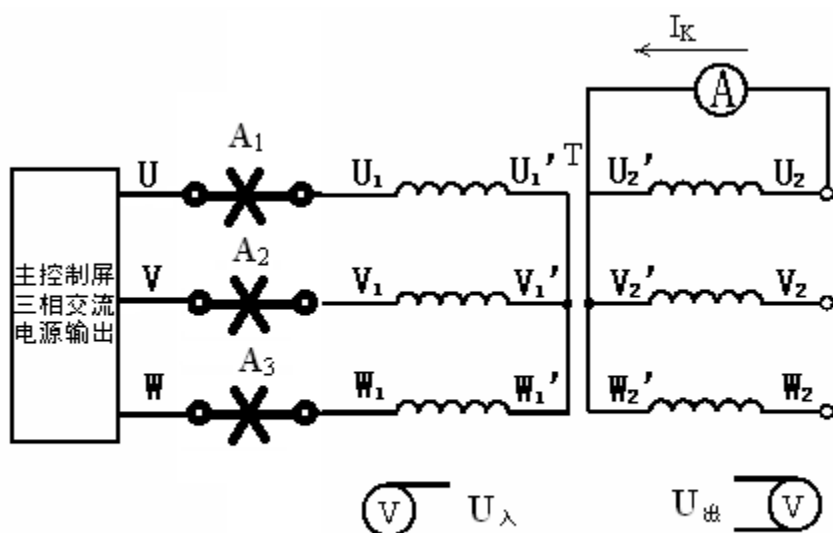
### (三) . 不对称短路

#### 1 . Y, y0 联接单相短路

实验线路如图 2-7 所示。被试变压器选用三相芯式变压器。接通电源前，先将交流电压调到输出电压为零的位置，然后接通电源，逐渐增加电压，直至付方短路电流等于额定值为止，即  $I_k \approx I_N$  为止，测量此时付方的短路电流  $I_k$  和原方各相电流  $I_{U1}$ 、 $I_{V1}$ 、 $I_{W1}$ ，原方线电压  $U_{U1V1}$ 、 $U_{V1W1}$ 、 $U_{W1U1}$  和相电压  $U_{U1.O}$ 、 $U_{V1.O}$ 、 $U_{W1.O}$ ，将数据记录于表 2-5 中。

表 2-5

$I_k$ (A)	$U_{U1.O}$ (V)	$U_{V1.O}$ (V)	$U_{W1.O}$ (V)	$I_{U1}$ (A)	$I_{V1}$ (A)	$I_{W1}$ (A)	$U_{U1.V1}$ (V)	$U_{V1.W1}$ (V)	$U_{W1.U1}$ (V)

图2-7 Y, y<sub>0</sub> 单相短路接线图

## 2. Y, y<sub>0</sub> 联接二相短路

实验线路如图 2-8 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，逐渐增加输入电压，直至  $I_k \approx I_N$  为止，测量二相短路电流  $I_k$  和原方电流  $I_{U1}$ 、 $I_{V1}$ 、 $I_{W1}$ ，将数据记录于表 2-6 中。

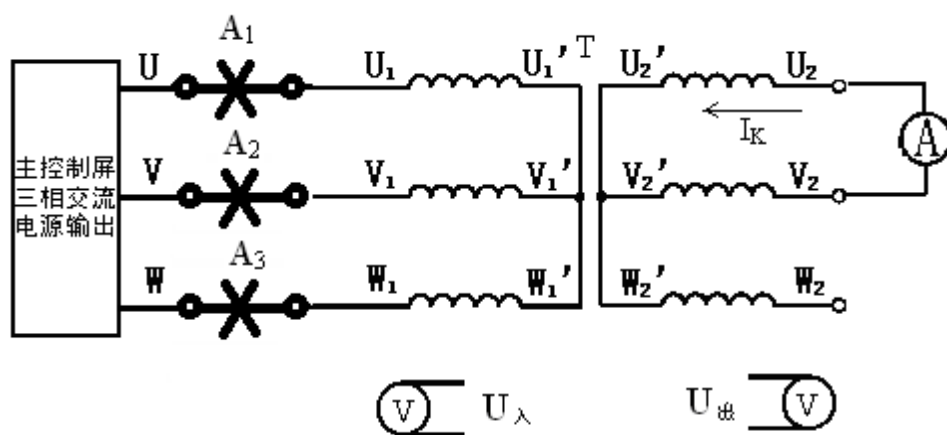
图2-8 Y, y<sub>0</sub> 二相短路接线图

表 2-6

$I_k$ (A)	$I_{U1}$ (A)	$I_{V1}$ (A)	$I_{W1}$ (A)

## 3. D, yn11 联接单相短路

实验线路如图 2-9 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，逐渐增加外输入电压，直至  $I_K \approx I_N$  为止，测量单相短路电流  $I_K$  和原方线电流  $I_{U1}$ 、 $I_{V1}$ 、 $I_{W1}$  和原方相电流  $I_{U1U1'}$ 、 $I_{V1V1'}$ 、 $I_{W1W1'}$ ，将数据记录于表 2-7 中。（注：原方线电流  $I_{U1}$ 、 $I_{V1}$ 、 $I_{W1}$  和原方相电流  $I_{U1U1'}$ 、 $I_{V1V1'}$ 、 $I_{W1W1'}$ ，二组数据要改接线分二次来测量。）

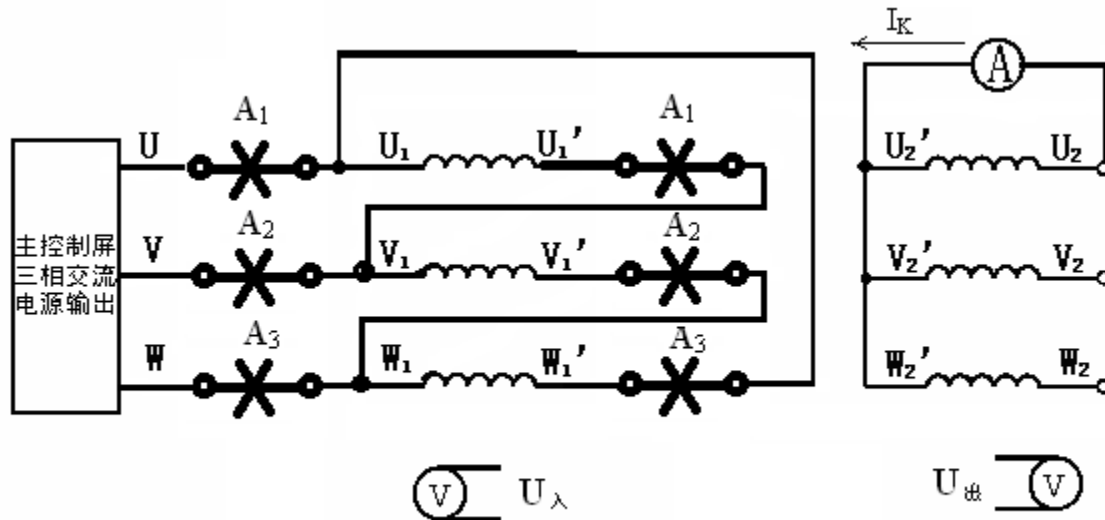


图2-9 D, yn11 单相短路接线图

表 2-7

$I_K$ (A)	$I_{U1}$ (A)	$I_{V1}$ (A)	$I_{W1}$ (A)	$I_{U1U1'}$ (A)	$I_{V1V1'}$ (A)	$I_{W1W1'}$ (A)

#### (四) . 测定 Y, y0 联接的三相变压器的零序阻抗。

实验线路如图 2-10 所示。三相零序电流大小相等。相位相同，故测量零序阻抗时，三相芯式变压器的原方绕组开路，三相付方绕组首末端串联后接到单相交流电源。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  $I_0=0.5I_N$  和  $I_N$  的两种情况下，测取变压器的  $I_0$ 、 $U_0$  和  $P_0$ ，将数据记录表 2-8 中。

表 2-8

$I_0$ (A)	$U_0$ (V)	$P_0$ (W)
$0.5I_N=5.2A$		
$I_N=2.6A$		

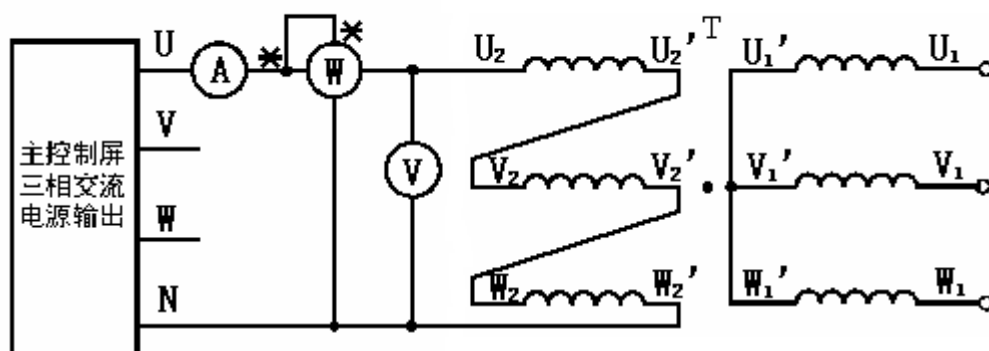


图 2-10 测零序阻抗线路图

(五). 分别观察三相心式变压器不同连接方法时的空载电流和电动势的波形。

### 1 .Y, y 联接

实验接线如图 2-11 所示, 三相组式变压器作 Y, y 联接, 不带中线, 把 K 打开。接通电源后, 调节变压器在输入电压为  $0.5U_N$  和  $U_N$  两种情况下通过示波器观察空载电流  $I_0$ , 付方相电动势  $E_\phi$  和线电动势  $E_c$  的波形, 空载电流信号从串联电阻 R 上取出, 相电动势  $E_\phi$  信号可以从付方任一相引出, 线电动势  $E_c$  信号可以从付方任二相引出。

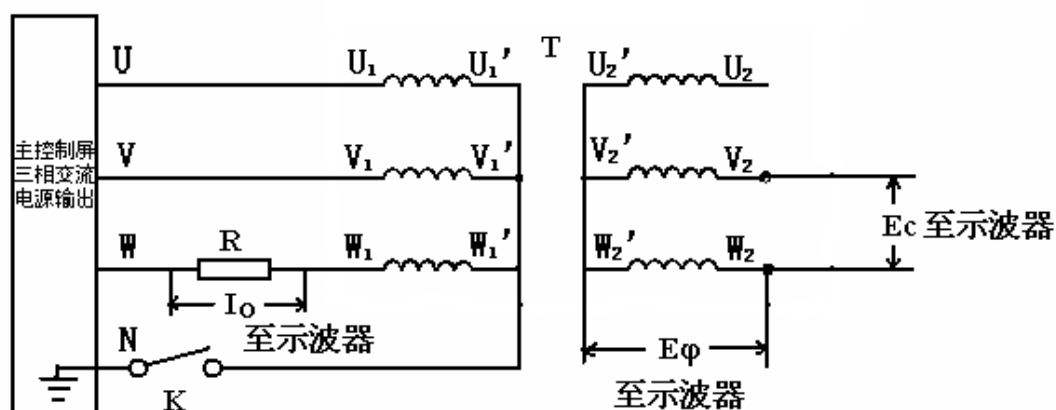


图2-11 观察 Y, y 联接三相变压器空载电流和电动势波形接线图

在变压器输入电压为额定值时，用电压表测取原方线电压  $U_{U1.V1}$  和相电压  $U_{U1}$ ，将数据记录于表 2-9

表 2-9

实 验 数 据		计 算 数 据
$U_{U1.V1}$ (V)	$U_{U1}$ (V)	$U_{U1.V1}/U_{U1}$

## 2. $Y_N, y$ 连接

接线与  $Y, y$  连接相同，合上开关  $K$ ，即为  $Y_0, y$  接法。重复前面实验步骤，观察  $I_0$ ， $E_\phi$ ， $E_c$  波形，并在  $U_1=U_{1N}$  时测取  $U_{U1V1}$  和  $U_{U1}$ ，将数据记录于表 2-10 中。

表 2-10

实 验 数 据		计 算 数 据
$U_{U1V1}$ (V)	$U_{U1}$ (V)	$U_{U1V1}/U_{U1}$

## 3. $Y, d$ 联接

实验线路如图 2-12 所示，开关  $K$  不合上，使付方绕组不构成封闭三角形。接通电源后，调节变压器输入电压至额定值，通过示波器观察原、付方相电势波形，测量和观察三角形开口即开关  $K_0$  二端谐波电压。

开关  $K_0$  闭合，变压器付方绕组构成闭合三角形，调节变压器输入电压至额定值，通过示波器观察原、付方相电势波形，测量和观察三角形内部电流。

更换三相组式变压器，重复前面 (1) (2) (3) 波形实验，将不同铁心结构所得的结果作分析比较。

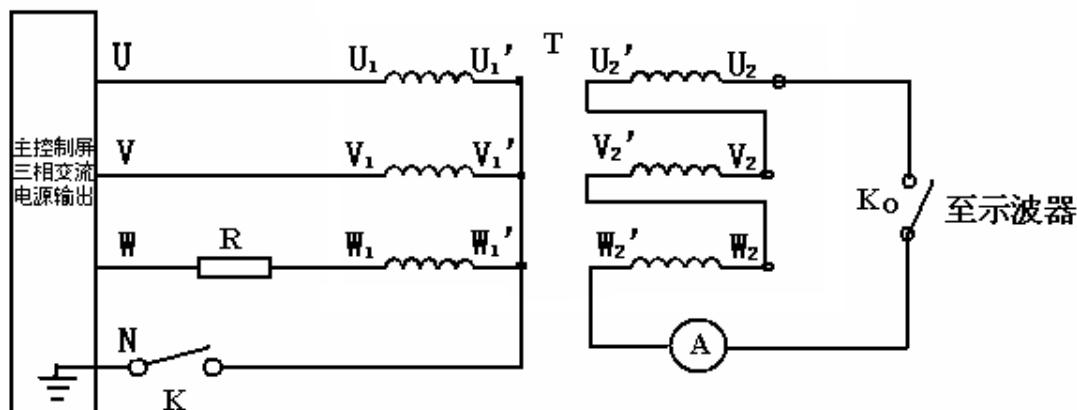


图2-12 观察  $Y, d$  联接三相变压器电流电势波形接线图

## 六. 实验报告

(一). 将校核公式的计算结果与实验测量结果列表比较，并作简要的分析和结。

(二). 计算  $Y, y$  联接三相芯式变压器的零序阻抗

1. 三相心式变压器的零序参数由下式求得：

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

由实验数据分别算出  $I_0=0.5I_N$  和  $I_0=I$  二种情况下的零序阻抗，零序电阻和零序电抗，

2. 由  $Y, yn0$  联接单相短路实验求

$Y, yn0$  联接时，原方无中线，零序电流不通，付方的零序电流在各铁芯柱中产生大小相等相位同的零序磁通  $\phi_0$ ，这磁通在各相绕组内感应电势  $E_0=I_0Z_0$ ，由于  $E_0$  的存在使原来对

称的三相电势系统发生奇变，中点位移，中点位移的程度和零序磁通的大小有关，根据测得的原方线电压和相电压作向量图。找出线电压三角形的重心 0，图中相电压的中点 0' 离开 0 就是中点位移，位移的大小按作图比例折成外移电势  $E'_0$ ，将  $E'_0$  折算到付方后就等于零序电抗所产生的电压降，则零序电抗为：

$$E_o = \frac{E'_o}{k} = I_0 Z_0 = \frac{1}{3} I_k Z_0$$

$$Z_0 = \frac{3E'_o}{kI_k}$$

式中： $I_0=1/3I_k$ ， $Z_0$ ——零序电抗，把二种方法得到的零序电抗值进行简单分析比较。

(三). 分析不同铁芯结构和不同联接方法时三相变压器的空载电流和电势波形。

(四). 根据实验观察分析三相组式变压器不能采用 Y, yn0 与 Y, y0 联接方法的原因。



## 实验三 三相鼠笼异步电动机的参数测定

### 一. 实验目的

1. 掌握三相异步电机的空载、堵转的方法。
2. 测定三相鼠笼型异步电动机的参数。

### 二. 预习要点

1. 异步电动机的等效电路有哪些参数？它们的物理意义是什么？
2. 工作特性和参数的测定方法。

### 三. 实验项目

1. 用伏安法测量定子绕组的冷态电阻。
2. 异步电动机的空载试验。

测空载特性曲线： $U_{10}=f(I_1)$ ； $P_{10}=f(U_{10}^2)$ 。其中  $P_{10}$  为已除去空载时定子铜耗的空载损耗。

3. 异步电动机的短路试验。

测短路特性曲线： $I_k=f(U_k)$ ； $P_k=f(U_k)$

### 四. 实验设备及仪器

1. 电机教学实验台主控制屏 BMEL-II
2. 交流电压、电流表 (BMEL-33A)
3. 功率、功率因数表 (BMEL-33F)
4. 三相调压器 (在主控制屏的左下方)
5. 直流电压、安培表 (BMEL-34A)
6. 三相鼠笼式异步电动机

### 五. 实验方法及步骤

#### (一) . 伏安法测量定子绕组的冷态电阻。

选用的三相鼠笼式异步电动机，其额定数据为： $P_N=2.2kW$ 、 $U_N=380V$  (Y)、 $I_N=5A$ 、 $n_N=1420r/min$ 。三相鼠笼式异步电机定子绕组一般有 6 个引出端头，可把三个绕组串联后一起测量电阻。如定子绕组固定的接成星形或三角形，且只有三个可供测量电阻的引出端时，则要经几次测量并进行计算才能得到每相电阻值。

### 1. 当各相绕组头尾都引出时绕组电阻的测定

测量线路如图 3-1。把可调直流电源输出放在最小位置，合上电源开关，逐步增大电压，使电流在  $20\%I_N(<1A)$  的范围内变化三次，把每次的电流和电压值记入下表 3-1，取三次测量值的算术平均值作为该电阻的实际值。

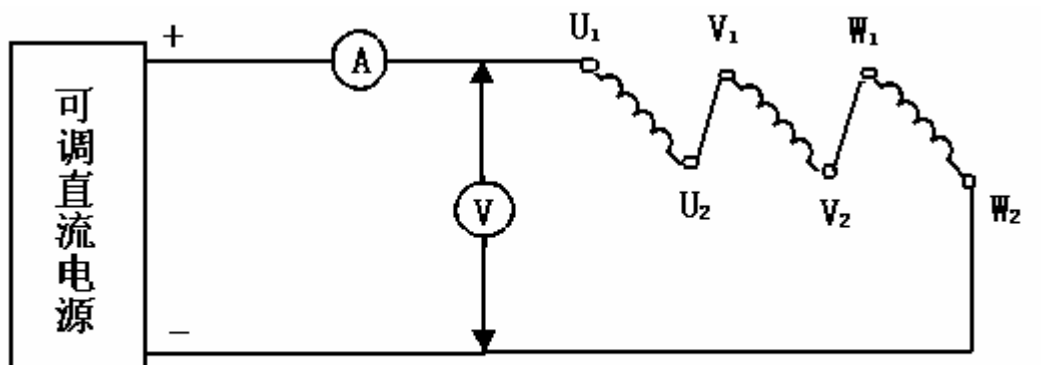


图 3-1 测定绕组三相总电阻值接线图

表 3-1

次数 测量值	I	II	III
电流 (A)			
电压 (V)			
总电阻 ( $\Omega$ )			
每项电阻 ( $\Omega$ )			

### 2. 当电机绕组固定接成星形时绕组电阻的测定

测量线路如图 3-2。用上述同样的方法测得  $r_{U1V1}$ ， $r_{U1V1}$  是  $U_1$ 、 $V_1$  二相的电阻之和，用同样的方法测量电阻  $r_{V1W1}$  和  $r_{W1U1}$ ，把每次测得的数据记入表 3-2

表 3-2

$U_{U1V1}$ (V)		$U_{V1W1}$ (V)		$U_{W1U1}$ (V)	
$I_U$ (A)		$I_V$ (A)		$I_W$ (A)	
$r_{U1V1}$ ( $\Omega$ )		$r_{V1W1}$ ( $\Omega$ )		$r_{W1U1}$ ( $\Omega$ )	

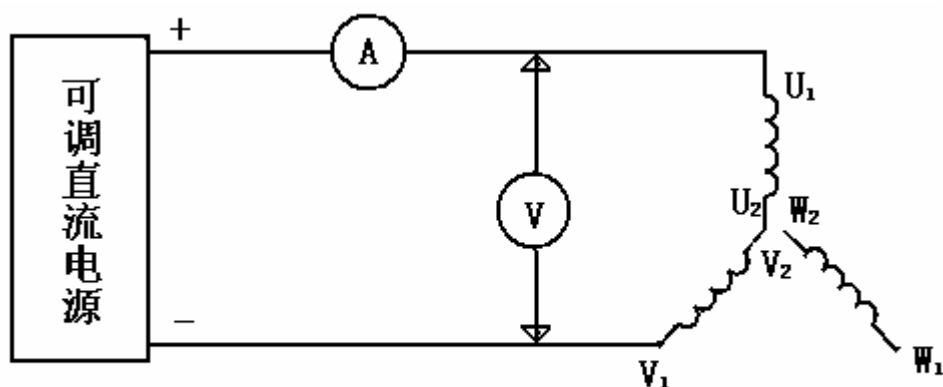


图3-2 固定Y形接法定子绕组电阻值测定接线图

因为  $r_{u1v1}=r_{u1}+r_{v1}$ ,  $r_{v1w1}=r_{v1}+r_{w1}$ ,  $r_{w1u1}=r_{w1}+r_{u1}$ , 所以每相电阻值可按下面的公式计算而得:

$$r_u = \frac{r_{w1u1} + r_{u1v1} - r_{v1w1}}{2}$$

$$r_v = \frac{r_{u1v1} + r_{v1w1} - r_{w1u1}}{2}$$

$$r_w = \frac{r_{v1w1} + r_{w1u1} - r_{u1v1}}{2}$$

作为特例, 如果测量值,  $r_{u1v1} = r_{v1w1} = r_{w1u1}$ , 则每相电阻可简单的用下式计算

$$r_u = r_v = r_w = r_{u1v1} / 2$$

### 3. 当电机绕组固定接成三角形时绕组电阻的测定

测量线路如图 3-3。用上述同样的方法测得  $r_{UU}$ ,  $r_{UU}$  是 V、W 二相串联后和 U 相并联的电阻值, 用同样的方法测量电阻  $r_{VV}$  和  $r_{WW}$ , 把每次测得的数据记入表 3-3

表 3-3

$U_{UU}(V)$		$U_{VV}(V)$		$U_{WW}(V)$	
$I_U(A)$		$I_V(A)$		$I_W(A)$	
$r_{UU}(\Omega)$		$r_{VV}(\Omega)$		$r_{WW}(\Omega)$	

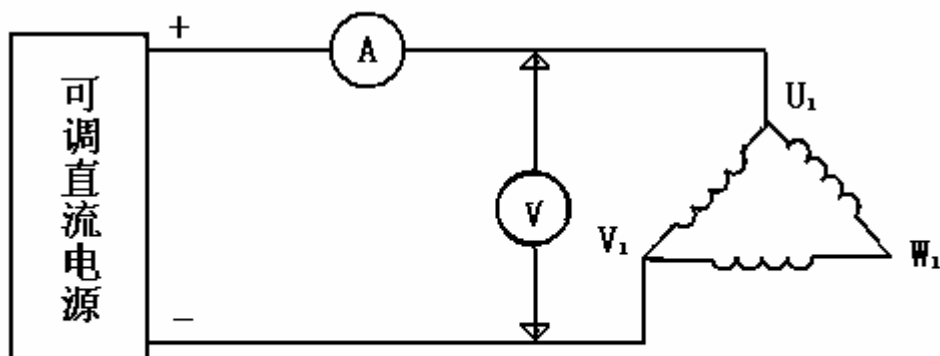


图3-3 固定Δ形接法定子绕组电阻值测定接线图

因为

$$r_{uu} = \frac{r_u(r_v + r_w)}{r_u + r_v + r_w} \quad r_{vv} = \frac{r_v(r_u + r_w)}{r_u + r_v + r_w} \quad r_{ww} = \frac{r_w(r_u + r_v)}{r_u + r_v + r_w}$$

则每项电阻值可按式计算而得

$$r_u = \frac{1}{2} \left[ \frac{4r_{vv}r_{ww}}{r_{vv} + r_{ww} - r_{uu}} - (r_{vv} + r_{ww} - r_{uu}) \right]$$

$$r_v = \frac{1}{2} \left[ \frac{4r_{ww}r_{uu}}{r_{ww} + r_{uu} - r_{vv}} - (r_{ww} + r_{uu} - r_{vv}) \right]$$

$$r_w = \frac{1}{2} \left[ \frac{4r_{uu}r_{vv}}{r_{uu} + r_{vv} - r_{ww}} - (r_{uu} + r_{vv} - r_{ww}) \right]$$

作为特例，如果  $r_{uu} = r_{vv} = r_{ww}$

则

$$r_u = r_v = r_w = \frac{3}{2} r_{uu}$$

电阻测好后记录当时室温  $t = \underline{\hspace{2cm}}$  °C

## (二) . 异步电动机的空载试验

测量电路如图 3-4 所示。电机绕组根据额定电压 ( $U_N=380$  伏) 接成 Y 或 Δ 形，转子三相短路。

实验步骤：

a. 起动前，把交流电压调节旋钮退至零位，然后接通电源，逐渐升高电压，使电机起动旋转，保持电动机在额定电压下空载运行数分钟，使机械损耗达到稳定后再进行试验。

b. 调节电压至  $U=1.2U_N$ ，开始测空载特性，再逐渐降低电压至 0，在这范围内读取空载电压、空载电流、空载功率。

c. 在测取空载实验数据时，在额定电压附近多测几点， $U=U_N$  点必测，共取 7 组数据记录于表 3-4 中。

表 3—4

序号	$U_{OC}$ (V)				$I_{OL}$ (A)				$P_O$ (W)		
	$U_{U1V1}$	$U_{V1W1}$	$U_{W1U1}$	$U_O$	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_O$	$P_1$	$P_2$	$P_O$
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											

表中： $U_O = (U_{u1v1} + U_{v1w1} + U_{w1u1}) / 3$ 、 $I_O = (I_u + I_v + I_w) / 3$ 、 $P_O = | P_1 + P_2 |$

### (三) . 异步电动机的短路试验

测量线路如图 3-4，实验步骤：

a. 将起子插入异步电动机堵转孔中，使异步电动机转子堵住。将三相调压器退至零位。

b. 合上交流电源，缓缓地增加电压，使短路电流  $I_k$  升到  $1.2I_N$ ，再逐渐降低电压直至短路电流  $I_k=0$ 。

a. 在这范围内读取短路电压、短路电流及短路功率， $I_k=I_N$  点必测，共取 5 组数据，填入表 3-5 中。做完实验后，注意取出堵转孔中的起子。

表 3-5

序号	$U_{OC}$ (V)				$I_{OL}$ (A)				$P_O$ (W)		
	$U_{u1v1}$	$U_{v1w1}$	$U_{w1u1}$	$U_K$	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_K$	$P_{k1}$	$P_{k2}$	$P_K$
1											
2											
3											
4											
5											

表中： $U_K = (U_{u1v1} + U_{v1w1} + U_{w1u1}) / 3$ 、 $I_K = (I_u + I_v + I_w) / 3$ 、 $P_K = | P_{k1} + P_{k2} |$

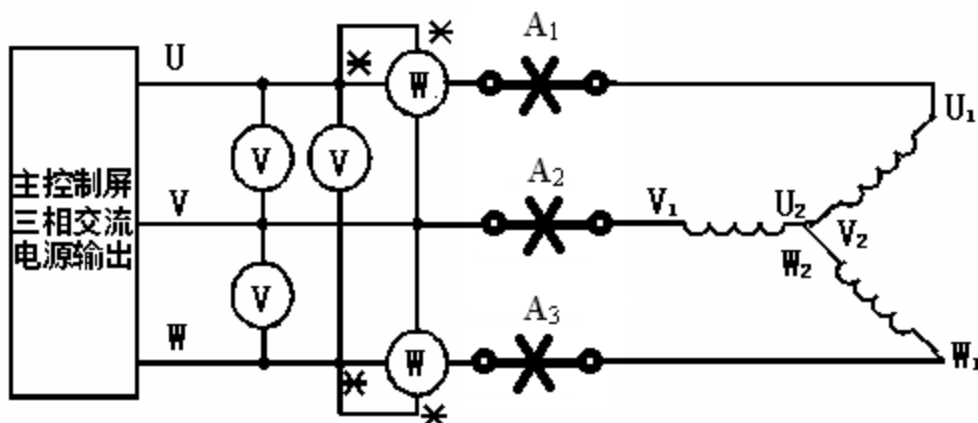


图 3-4 异步电动机空载实验接线图

## 六. 实验报告

### 1. 计算基准工作温度时的相电阻

由实验直接测得每相电阻值，此值为实际冷态电阻值。冷态温度为室温。按下式换算到基准工作温度时的定子绕组相电阻：

$$r_{lref} = r_{lc} \frac{235 + \theta_{ref}}{235 + \theta_c}$$

式中  $r_{lref}$ ——换算到基准工作温度时定子绕组的相电阻， $\Omega$ ；

$r_{lc}$ ——定子绕组的实际冷态相电阻， $\Omega$ ；

$\theta_{ref}$ ——基准工作温度，对于 E 级绝缘为  $75^{\circ}\text{C}$ ；

$\theta_c$ ——实际冷态时定子绕组的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2. 作空载特性曲线： $I_0$ 、 $P_0=f(U_0)$

### 3. 作短路特性曲线： $I_k$ 、 $P_k=f(U_k)$

### 4. 由空载、短路试验的数据求异步电机等效电路的参数。

(1) 由短路试验数据求短路参数

$$\text{短路阻抗} \quad Z_K = \frac{U_K}{I_K}$$

$$\text{短路电阻} \quad r_K = \frac{P_K}{3I_K^2}$$

$$\text{短路电抗} \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}$$

式中  $U_K$ 、 $I_K$ 、 $P_K$ ——由短路特性曲线上查得，相应于  $I_K$  为额定电流时的相电压、相电流、三相短路功率。

$$\text{转子电阻的折合值} \quad r_2' \approx r_K - r_1$$

$$\text{定、转子漏抗} \quad X_{1\sigma}' \approx X_{2\sigma}' \approx \frac{X_K}{2}$$

(2) 由空载试验数据求激磁回路参数

$$\text{空载阻抗} \quad Z_O = \frac{U_O}{I_O}$$

$$\text{空载电阻} \quad r_O = \frac{P_O}{3I_O^2}$$

$$\text{空载电抗} \quad X_O = \sqrt{Z_O^2 - r_O^2}$$

式中  $U_O$ 、 $I_O$ 、 $P_O$ ——相应于  $U_O$  为额定电压时的相电压、相电流、三相空载功率。

$$\text{激磁电抗} \quad X_m = X_O - X_{1\sigma}$$

$$\text{激磁电阻} \quad r_m = \frac{P_{Fe}}{3I_O^2}$$

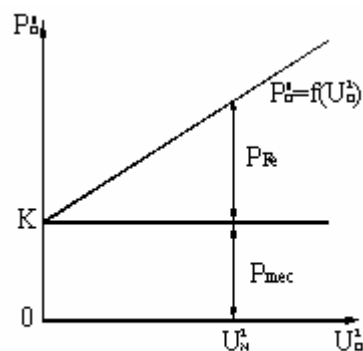


图3-5电机中的铁耗和机械耗

式中  $P_{Fe}$  为额定电压时的铁耗，由图 1-5 确定。

(3) 画出“T”型等效值电路，标明阻抗的欧姆值。

## 七. 思考题

1. 为何做空载实验时，电压降得太低的点没有意义？
2. 短路特性曲线  $P_k=f(U_k)$  是什么形状？为什么？
3. 由空载、短路实验所得的数据求取异步电动机的等效电路参数时，有哪些因数会引起误差？

## 实验四 三相鼠笼异步电动机的工作特性

### 一. 实验目的

1. 用直接负载法测取三相鼠笼异步电动机的工作特性。

### 二. 预习要点

1. 异步电动机的工作特性指哪些？
2. 用两只单相功率表测量三相功率的原理和方法。

### 三. 实验项目

1. 测量定子绕组的极性
2. 异步电动机的负载试验

### 四. 实验设备及仪器

1. 电机教学实验台主控制屏 BMEL-II
2. 交流电压、电流表 (BMEL-33A)
3. 功率、功率因数表 (BMEL-33F)
4. 三相调压器 (在主控制屏的左下方)
5. 直流电压、安培表 (BMEL-34A)
6. 三相鼠笼式异步电动机
7. 扭矩、转速测量仪 (JW-2A)
8. 直流发电机励磁电源 (BMEL-008)
9. 直流发电机电枢电源 (专用直流柜)

### 五. 实验方法及步骤

#### (一) . 测量定子绕组的极性

##### 1. 交流法

先用万用表找出那两个端点属于同一绕组，然后任意标上端线字母， $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$ 、 $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$ 。接线如图 4-1，将标上  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  的三个端头连在一起，然后在  $U$  相绕组上施加低电压，缓慢增加电压，并监视绕组电流，使之不超过额定值 ( $I_N=5A$ )。测量电压  $U_{u1u2}$ 、 $U_{u1v1}$ 、 $U_{u1w1}$ 、 $U_{v1w1}$  记入表 4-1。

对测量结果进行下列分析：

- (1) 若  $U_{u1v1}=U_{u1w1} > U_{u1u2}$ ， $U_{v1w1}=0$

此种情况说明开始的端头标号正确即极性正确。

- (2) 若  $U_{u1v1} > U_{u1u2} > U_{u1w1}$ ， $U_{v1w1} \neq 0$

此种情况说明极性不正确。现  $U_{u1w1} < U_{u1u2}$ ，故需将  $W$  相绕组端头标号对调，若为  $U_{u1v1} < U_{u1u2}$ ，则应将  $V$  相绕组端头标号对调。



(3) 若  $U_{u1v1}=U_{u1w1} < U_{u1u2}$ ,  $U_{v1w1}=0$

此种情况说明 U 相极性不正确, 应将 U 相绕组的端头标号对调。

注:对于绕线式转子电机, 在测定极性时, 转子绕组应开路; 而 U 相绕组可直接加额定的电压。

表 4-1

室温\_\_\_\_\_℃

电压 绕组	$U_{u1u2}$	$U_{u1v1}$	$U_{u1w1}$	$U_{v1w1}$
绕组 I				
绕组 II				
绕组 III				

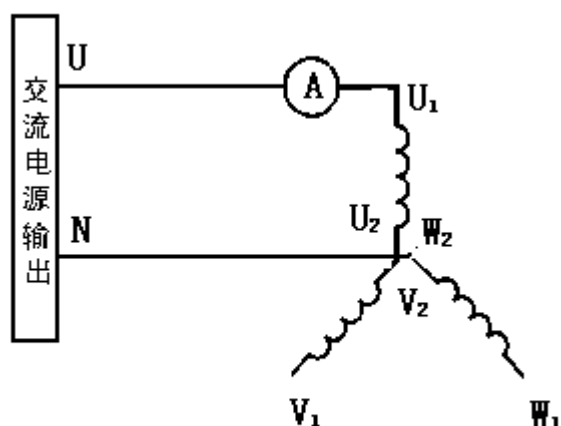


图 4-1 三相交流绕组首末端的测定

## 2. 万用表法

和交流法一样, 首先找出  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  三相绕组并标上标号。然后将  $U_1$ 、 $V_1$ 、 $W_1$  三个头连在一起, 再将  $U_2$ 、 $V_2$ 、 $W_2$  三个头连在一起, 将万用表的毫安档或微安档跨接在这二个连接端之间, 接线如图 4-2。用手转动转子, 因为转子有剩磁, 在转动时, 犹如一个旋转磁场扫过定子线圈, 如果均匀转动异步电机的转子, 对称的定子绕组中便感应出对称的三相电势。观察万用表的反应并对万用表上所反应的现象可作如下分析:

- (1) 如果所标极性正确, 则二联接点等电位, 万用表中没有电流即表针不动, 但因绕组不可能完全对称, 所以指针可能略有摆动。
- (2) 如果发现表的指针摆动比较大, 则说明某一相极性标错, 就要找出标错的一相, 并将其标对。

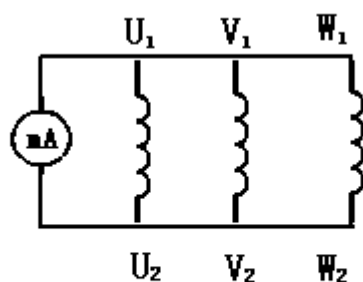


图 4-2 万用表毫安挡测定三相绕组首末端

## (二) . 负载实验

实验选用的三相异步电动机，其额定数据为： $P_N=2.2\text{kW}$ ， $U_N=380\text{V}$ （Y）， $I_N=5\text{A}$ ， $n_N=1420\text{r/min}$ ，在实验室里异步电动机常用的负载有三种：校正过的直流发电机、制动测功器和涡流测功器。该实验我们用直流发电机作负载。接线如图 4-3。实验开始前，打开“扭矩、转速仪”电源。直流发电机额定参数： $P_N=1.5\text{KW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=6.8\text{A}$ ， $n_N=1450\text{r/min}$

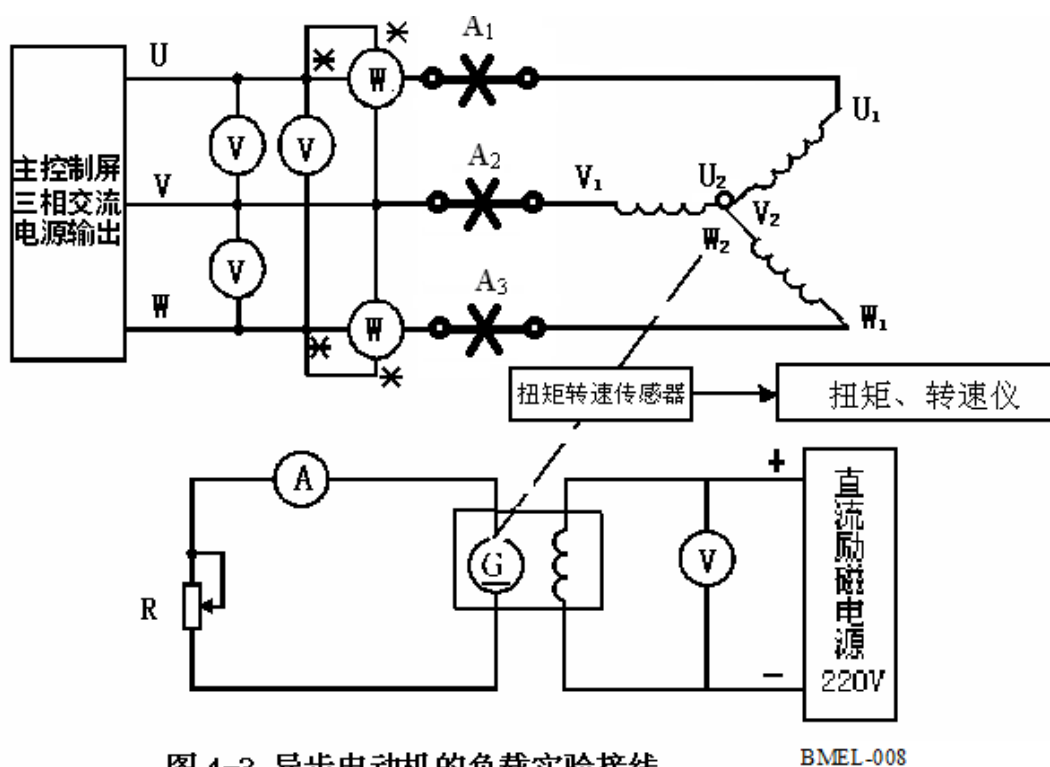


图 4-3 异步电动机的负载实验接线

BMEL-008

### 实验步骤：

- 按图 4-3 接线。电阻  $R$  调在最大，合上交流电源，调节调压器使之逐渐升至额定电压（380V），起动异步电动机，并在试验中保持此额定电压不变。
- 打开直流励磁电源 BMEL-008（在打开该电源前，先读取  $M_0$ （空载转矩）），调节直

流电机的励磁电压，逐渐升到 220V，然后调节（即减小）直流发电机的负载电阻 R，给异步电动机加载，使异步电动机的定子电流逐渐上升，直至电流上升到 1.2 倍额定电流（ $I_{OL}=1.2I_N=6A$ ）。

c. 从此负载开始，逐渐减小负载（即增大 R）直至空载（即关闭直流励磁电源），在这范围内读取异步电动机的定子电流、输入功率，转速、转矩等数据，共读取 6 组数据，记录于表 4-2 中。

d. 实验完毕，先调节直流励磁电源（BMEL-008）回零，关闭电源，再把调压器回零，最后关闭总电源。

表 4-2  $M_0$ （空载转矩）=  $U_N=380$  伏（Y）

序号	异步电动机输入							$M_2$ (N.m)	n (r/min)	$P_2$ (W)
	$I_{OL}$ (A)				$P_O$ (W)					
	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_l$	$P_I$	$P_{II}$	$P_I$			
1										
2										
3										
4										
5										
6										

## 六. 实验报告

### 1. 根据实验数据计算各点的 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $I_1$ 、 $S$ 、 $\eta$ 和 $\cos\varphi_1$

工作特性和机械特性需根据实验结果经一定计算才能得到。按下面的计算公式，将各点的计算结果填入表 4-3。

计算公式为：

$$\text{定子绕组相电流: } I_1 = \frac{I_u + I_v + I_w}{3}$$

$$\text{转差率: } S = \frac{1500 - n}{1500} \times 100\%$$

$$\text{功率因数: } \cos\varphi_1 = \frac{P_1}{3U_1 I_1}$$

$$\text{输出功率: } P_2 = 0.105nM_2$$

$$\text{效率: } \eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

$$\text{输入功率: } P_1 = P_I + P_{II}$$

式中  $I_1$ ——定子绕组相电流 (A)；

$U_1$ ——定子绕组相电压(V)；  
 $S$ ——输入功率为  $P_1$  是的转差率；  
 $\eta$ ——效率。

表 4-3

序号	电动机输入		电动机输出		计 算 值			
	$I_1$ (A)	$P_1$ (W)	$M_2$ (N·m)	$n$ (r / min)	$P_2$ (W)	$S$ (%)	$\eta$ (%)	$\cos\varphi_1$
1								
2								
3								
4								
5								
6								

## 2. 用损耗分析法求额定负载时的效率

异步电动机的效率除从扭矩转速仪上直接读出  $M_2$  来计算外。还能用扣除各项损耗的办法来计算。

异步电动机的总损耗为： $\sum P = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m + P_{\Delta}$

其中：铁损耗  $P_{Fe}$ 、机械损耗  $P_m$  由空载损耗分析得

定子铜耗  $P_{Cu1} = 3I_1^2 r_{75}$ ，式中  $I_1$  为相电流， $r_{75}$  为折算到 75℃ 时的绕组相电阻

转子铜耗  $P_{Cu2} = SP_M$

式中  $P_M$ ——电磁功率，W；

$$P_M = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe}$$

附加损耗  $P_{\Delta}$ ，在额定负载时的附加损耗通常取输入功率的 0.5%，即  $P_{\Delta} = 0.005P_N$

非额定输出功率的各点可按下式换算：

$$P_{\Delta} = 0.005P_N \left( \frac{I}{I_N} \right)^2$$

上述各项损耗算出后，即可求出  $P_2$  与  $\eta$

$$P_2 = P_1 - \sum P = P_1 - (P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_m + P_{\Delta}) \quad ; \quad \eta = P_2 / P_1 \times 100\%$$

将负载实验的数据用损耗分析法重计算，把计算结果填入表 4-4

表 4-4

序号	$P_1$	$I_1$	$n$ (转/分)	$P_{cr1}$	$P_{Fe} + P_m$	$P_m$	$S$	$P_{cu2}$	$P_{\Delta}$	$P_2$	$\eta$ (%)
1											
2											
3											
4											
5											
6											

3. 根据“扭矩转速仪”直接读数和计算数据，在同一张坐标纸上画出三相异步电动机的工作特性曲线。

- (1) 转速特性  $n=f(P_2)$
- (2) 定子电流特性  $I_1=f(P_2)$
- (3) 功率因数特性  $\cos\varphi_1=f(P_2)$
- (4) 电磁转矩特性  $M=f(P_2)$
- (5) 效率特性  $\eta=f(P_2)$

4. 在直角坐标纸上画机械特性曲线  $n=f(M)$

## 七. 思考题

1. 由直接负载法测得的电机效率和用损耗分析法求得的电机效率各有哪些因素会引起误差？

## 实验五 三相同步发电机的对称运行

### 一. 实验目的

1. 掌握测定三相同步发电机空载、短路特性的方法。
2. 测定三相同步发电机在对称运行状态下的稳态参数。

### 二. 预习要点

1. 同步发电机等效电路有哪些参数？各参数对应的物理意义是什么？
2. 对称运行时的稳态参数的测定方法。
3. 同步发电机分别处于空载、短路时内部磁路的工作状态。

### 三. 实验项目

1. 用伏安法测量电枢绕组的实际冷态支流电阻。
2. 测定同步发电机的空载特性，同时检查三相电压的对称性。  
在  $n=n_N$ 、 $I=0$  的情况下，测空载特性曲线： $U_0=f(I_f)$
3. 测定同步发电机的短路特性，同时检查三相电流的对称性。  
在  $n=n_N$ 、 $U=0$  的情况下，测三相短路特性曲线： $I_k=f(I_f)$

### 四. 实验设备及仪器

1. 电机教学实验台主控制屏（BMEL-II）
2. 交流电压、电流、功率表（MEL-33A、33F）
3. 直流电压、电流表（MEL-34A）
4. 同步电机励磁电源（BMEL-008）
5. 直流电动机励磁电源（BMEL-008G）
6. 直流电动机电枢电源（专用直流柜）
7. 三相调压器（MEL-）
8. 三相同步电机（M08）
9. 直流他励电动机（M03）

### 五. 实验方法及步骤

#### （一）伏安法测量电枢绕组的实际冷态支流电阻。

选用三相同步电机，其额定数据为： $P_N=2.5\text{kW}$ 、 $U_N=400\text{V}$ （Y）、 $I_N=3.6\text{A}$ 、 $n_N=1500\text{r/min}$ 、励磁可调。

三相同步电机电枢绕组一般有 6 个引出端头，两两对应测量三相绕组直流电阻。如电枢绕组固定地接成星形或三角形，且只有三个可供测量电阻的引出端时，则要经几次测量并进行计算才能得到每相直流电阻值。

## 1. 当各相绕组头尾都引出时绕组电阻的测定

测量线路如图 5-1。分别连接  $U_1U_2$ 、 $V_1V_2$ 、 $W_1W_2$  依次测量 A、B、C 相直流电阻。

每相测量时，先把可调直流电源(BMEL-008G)输出放在最小位置，然后合上电源开关，逐步增大电压，使电流在  $20\%I_N$  ( $0.8A$ ) 的范围内变化三次，把每次的电流和电压值记入表 5-1，取三次测量值的算术平均值作为该相电阻的实际值。

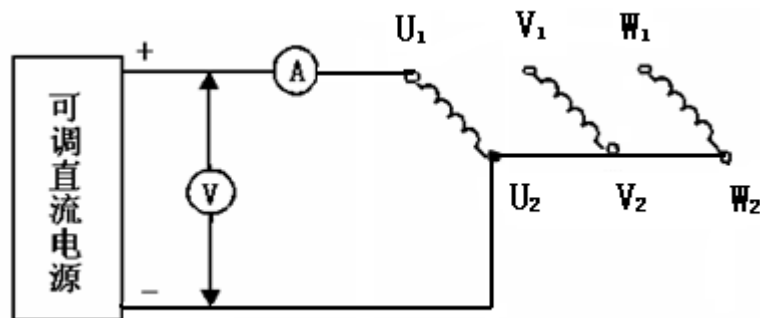


图 5-1 一相直流电阻的测定

表 5-1 冷态直流电阻

室温 \_\_\_\_\_ $^{\circ}C$ 

	绕组 I			绕组 II			绕组 III		
I (MA)									
U (V)									
R ( $\Omega$ )									
平均电阻 ( $\Omega$ )									

## 2. 其他情况下的直流电阻参数，参考实验 3。

电阻测好后记录当时室温  $t=$  \_\_\_\_\_ $^{\circ}C$

## （二）同步电机的空载试验

测量电路如图 5-2 所示。原动机采用直流电动机 M，接成他励形式；拖动三相同步电机 G 旋转，同步电机电枢绕组接成 Y 形（额定相电压  $U_{N\phi}=220$  伏），三相开路。

直流电动机参数：额定功率 3kW、额定电枢电流 17.5A、励磁电压额定值 220V、励磁电流 0.505A。

**步骤（1）** 按图 5-2 进行接线，原动机采用直流电动机 M，接成他励形式；拖动三相同步电机 G 旋转。

- 直流电机励磁电源为可调的直流电机励磁电源 (BMEL-008/008G)，注意电源极性。
- 直流电机电枢接直流电枢电源(专用直流柜)，电源已接入直流电流和电压表。注意极性。
- 同步电机励磁电源用可调的同步机励磁电源(BMEL-008G)。

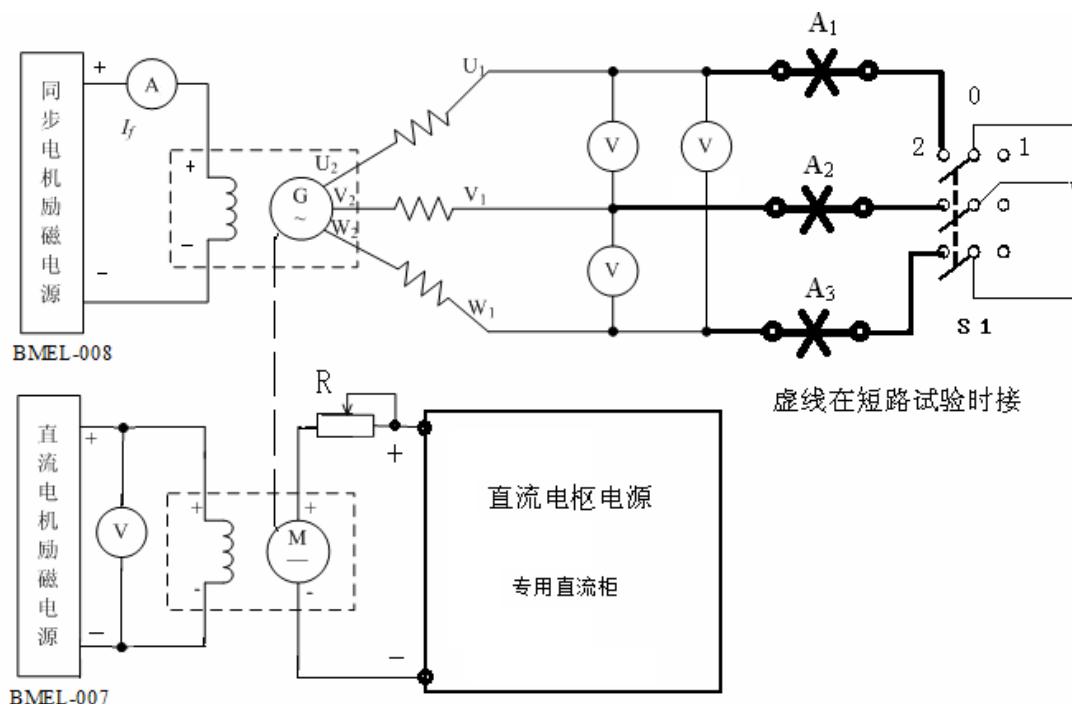


图 5-2 同步电机运行特性实验接线

提示：每个接线柱不要超过 2 根并连接线，必须旋紧，确保试验中不松动，接触良好。

#### 步骤（2） 实验预备

- 各表计量程可以选择在“自动”档（按下状态为选择）。
- 各分合按钮在“分”状态。
- 各可调直流电源调节旋钮在最小位置，一般逆时针旋到底。
- 将直流电机电枢回路的起动电阻  $R$  调在最大值位置。

#### 步骤（3） 启动直流电动机，调节至同步电机额定转速（1500 转/分），并保持不变

- 合上主控制屏电源开关（左侧面）。
- 合上直流电机励磁电源开关，调节旋钮加额定励磁电压（即 220V）。
- 合上直流电机电枢电源开关，电枢电压为 220V 不可调直流电压，逐渐减小起动电阻  $R$ ，同时用转速仪测量同步电机转速，使电机转速逐步达到额定转速 1500 r/min，并保持不变。

#### 步骤（4） 调节同步电机励磁，使端电压改变，测定空载特性曲线

- 合上同步电机励磁电源开关。
- 调节同步电机励磁电流  $I_f$ ，使其单方向递增，至发电机输出电压  $U_0=1.1U_N$ （不超过 440V）。读取此时的励磁电流  $I_f$  和三相电压值  $U_{U1V1}$ 、 $U_{V1W1}$ 、 $U_{W1U1}$ ，把此组数据作为特性曲线上的第 1 点）。
- 测定转速，保持在额定转速，并记录转速值。（测量过程中保持额定转速不变）



d. 逐渐减少同步电机励磁电流, 使  $I_f$  单方向减至零值为止。选择 7-8 点, 读取励磁电流  $I_f$  和三相的空载电压, 记录在表 5-2、表 5-3 中。在额定电压附近应多测几点, 在  $I_f = 0$  时, 记下剩磁电压。

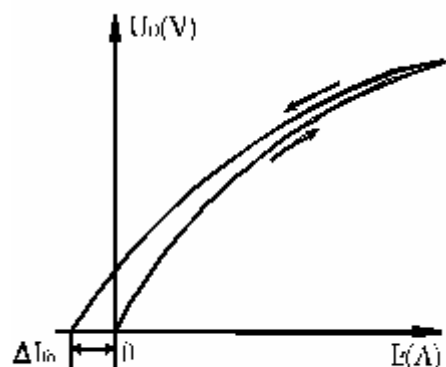


图5-3 上升和下降两条空载特性

实验说明: 在用实验方法测定同步发电机的空载特性时, 由于转子磁路中剩磁情况的不同, 当单方向改变励磁电流  $I_f$  从零到某一最大值, 再反过来由此最大值减小到零时将得到上升和下降的二条不同曲线, 如图 5-3。二条曲线的出现, 反映铁磁材料中的磁滞现象。测定参数时使用下降曲线。

表 5-2 空载试验上升曲线记录数据

$n = 1500$  r/min

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_f$ (A)	0								
$U_{U1V1}$ (V)									440V
$U_{V1W1}$ (V)									
$U_{W1U1}$ (V)									
$U_0$ (V)									

表 5-3 空载试验下降曲线记录数据

$n = 1500$  r/min

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_f$ (A)									0
$U_{U1V1}$ (V)	440V								
$U_{V1W1}$ (V)									
$U_{W1U1}$ (V)									
$U_0$ (V)									

表中:  $U_0 = (U_{u1v1} + U_{v1w1} + U_{w1u1}) / 3$

#### 实验注意事项:

- (1) 实验过程中转速保持额定值不变;
- (2) 在额定电压值附近多安排测试点;
- (3) 为防止磁滞现象影响, 激励电流只能单方向调节;
- (4) 如果电机转速不是额定转速, 应换算至额定转速, 其换算公式如下:

$$U_0 = U_{\text{实验}} \times \frac{n_N}{n_{\text{实验}}}$$

#### 步骤(5) 实验结束, 停机

- a. 起动电阻 R 回到最大值
- b. 减小同步电机励磁电流至零, 并关闭励磁电源。
- c. 关闭直流电动机电枢电源, 使电机减速至停止。

d. 当电机停止后，关闭励磁电源。各可调直流电源调节旋钮在最小位置，逆时针旋到底。

### （三）同步电机的短路试验

测量电路如图 5-2 所示。原动机采用直流电动机 M，接成他励形式；拖动三相同步电机 G 旋转，同步电机电枢绕组接成 Y 形（额定相电压  $U_{N\phi}=220$  伏），三相短路。

**步骤（1）** 在图 5-2 的基础上，将开关  $S_1$  合向 1 位置，使同步电机输出短路。

**步骤（2）** 启动直流电动机，调节至同步电机额定转速（1500 转/分），并保持不变

a. 合上直流电机励磁电源开关，加额定励磁电压（即 220V）。

b. 合上直流电机电枢电源开关，电枢电压为 220V 不可调直流电压，逐渐减小起动电阻 R，同时用转速仪测量同步电机转速，使电机转速逐步达到额定转速 1500 r/min，并保持不变。

**步骤（3）** 调节同步电机励磁，改变输出电流（即短路电流），测定短路特性曲线

a. 合上同步电机励磁电源开关。平缓调节电机励磁电流  $I_f$ ，使其单方向递增至发电机短路电流  $I_k = 1.1 I_N$ （即 3.9A）止。读取励磁电流  $I_f$  及三相短路电流值（为第 1 点）。在最大短路电流停留的时间不要过长。

b. 测定转速，使保持在额定转速，并记录转速值。（测量过程中保持额定转速不变）

c. 减少同步电机励磁电流，使  $I_f$  单方向减至零值为止。选择 7-8 点，读取励磁电流  $I_f$  和三相短路电流  $I_{U1}$ 、 $I_{V1}$ 、 $I_{W1}$ 。记录在表 5-4 中。在额定电流附近应多测几点。

表 5-4 三相短路试验记录数据

$n = \underline{\quad 1500 \quad}$  r/min

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_f$ (A)									0
$I_{U1}$ (A)									
$I_{V1}$ (A)									
$I_{W1}$ (A)									
$I_k$ (A)	3.9A								

表中： $I_k = (I_{U1} + I_{V1} + I_{W1}) / 3$

**步骤（4）** 实验结束，停机

a. 起动电阻 R 回到最大值

b. 减小同步电机励磁电流至零，并关闭励磁电源。

c. 关闭直流电动机电枢电源，使电机减速至停止。

d. 当电机停止后，关闭励磁电源。各可调直流电源调节旋钮在最小位置，逆时针旋到底。

## 六. 实验报告

### 1. 计算基准工作温度时的相电阻

由实验直接测得的每相电阻值，此值为实际冷态电阻值。冷态温度为室温。按下式换算到基准工作温度时的定子绕组相电阻：

$$r_{lref} = r_{lc} \frac{235 + \theta_{ref}}{235 + \theta_c}$$

式中  $r_{lref}$  ——换算到基准工作温度时定子绕组的相电阻， $\Omega$ ；

$r_{lc}$ ——定子绕组的实际冷态相电阻， $\Omega$ ；

$\theta_{ref}$ ——基准工作温度，对于 E 级绝缘为  $75^{\circ}\text{C}$ ；

$\theta_c$ ——实际冷态时定子绕组的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

2. 绘制空载特性曲线： $I = 0$ 、 $U_0 = f(I_f)$

3. 绘制短路特性曲线： $U = 0$ 、 $I_k = f(I_f)$

4. 求短路比  $K_k$ 。

$$k_k = \frac{I_{k0}}{I_N}$$

上式中： $I_{k0}$  是当有额定励磁电流时的短路电流。

5. 由空载特性和短路特性求  $x_d$  不饱和值

由  $I_k = f(I_f)$  曲线找出使短路电流有额定值 ( $I_k = I_N$ ) 的励磁电流  $I_{fk}$ ，在空载特性的气隙线 (直线部分的延长线) 上找出  $I_f = I_{fk}$  对应的气隙线的电压  $U'_0$ ，则  $x_d$  不饱和值为：

$$x_{d(\text{不饱和值})} = \frac{U'_0}{I_k}$$

## 七. 思考题

1. 做空载实验时，发电机输出电压较低的点如何得到？
2. 短路实验时，若发电机转速发生变化，对实验结果有没有影响？
3. 为什么由空载特性和短路特性计算出的同步电抗是不饱和值，计算时必须用气隙线上的对应电压？

## 实验六 三相同步电机的并联运行

### 一. 实验目的

1. 掌握三相同步发电机投入电网并联运行的条件和操作方法。
2. 掌握三相同步发电机并联运行时有功功率和无功功率的调节方法。

### 二. 预习要点

1. 三相同步发电机投入并联运行有哪些条件？不满足并联条件，会产生什么后果？
2. 采用灯光明暗法，投入并联的时机选择。
3. 三相同步发电机在并联运行时，如何调节发电机输出的有功功率和无功功率？

### 三. 实验项目

1. 用准确同步法将三相同步发电机投入电网并联运行。
2. 用自同步法将三相同步发电机投入电网并联运行。
3. 三相同步发电机并网运行时有功功率的调节。
4. 三相同步发电机并网运行时无功功率的调节。

测取当发电机输出有功功率等于 0、等于 1/2 倍额定功率时的 U 形曲线  $I=f(I_f)$ 。

### 四. 实验设备及仪器

1. 电机教学实验台主控制屏 (BMEL-II)
2. 交流电压、电流、功率表 (BMEL-33A、33F)
3. 直流电压、电流表 (BMEL-34A)
4. 同步电机励磁电源 (BMEL-008G)
5. 直流电动机励磁电源 (BMEL-008)
6. 直流电动机电枢电源 (专用直流柜)
7. 三相调压器 (MEL-)
8. 三相同步电机 (M08)
9. 直流他励电动机 (M03)
10. 旋转指示灯

### 五. 实验方法及步骤

#### (一). 用准确同步法——将三相同步发电机投入电网并联运行

1. 灯光明暗法实验电路接线如图 6-1 所示。图中指示灯应按二倍电网额定电压选择。同步发电机用直流电动机拖动。原动机采用直流电动机 M，接成他励形式；拖动三相同步电机 G 旋转，同步电机电枢绕组接成 Y 形（额定相电压  $U_{N\phi}=220$  伏），发电机输出接至指示灯的 A、B、C 端子。

直流电动机参数：额定功率 3kW、额定电枢电流 17.5A、励磁电压额定值 220V、励磁电流 0.505A。

三相调压器在主控制台的左下方。三相调压器输出端接至旋转指示灯的  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$  端子（表示电网电源）。

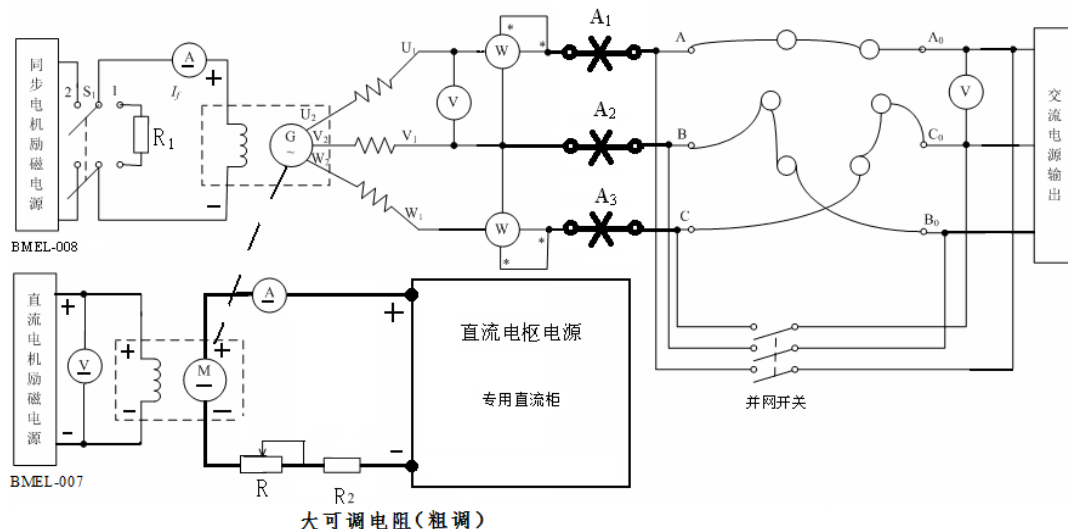


图 6-1 三相同步发电机并网实验接线

#### 预备知识：并网原理：

三相同步发电机与电网并联运行必须满足下列条件：

- (1) 发电机与电网的相序一致；
- (2) 发电机空载电势  $E_0$  与电网电压  $U$  的大小相等、相位相同，即  $E_0=U$ ；
- (3) 发电机电势的频率与电网电压的频率相等或接近相等。

为了检查这些条件是否满足，可用电压表检查双方电压，用整步表、灯光旋转法或灯光明暗法检查相序和频率。

#### 步骤（1）采用灯光明暗法，按图 6-1 进行接线

直流电动机、同步发电机、各电流表、电压表及功率表的接法可参考实验五。

#### 步骤（2）实验预备

在未上电源前，分别将同步发电机的励磁电源调节旋钮逆时针旋到底、直流电动机的励磁电压和电枢电压调至最小（一般把可调旋钮左旋到底）、三相调压器逆时针旋到底、将电枢回路的起动电阻  $R$  调在最大值位置。

#### 步骤（3）调节三相调压器，使输出电压达到发电机额定电压（400V）

- c. 合上主控制屏电源开关（左侧面）。
- b. 合上绿色“闭合”按钮开关。
- c. 调节三相调压器旋钮，观察交流电压，达到同步发电机的额定输出电压（线电压 400V）。

#### 步骤（4）启动直流电动机，调节至同步电机额定转速（1500 转/分）

- a. 合上直流电机励磁电源开关（BMEL-008），调节旋钮加额定励磁电压（220V）。
- b. 合上直流电机电枢电源开关（专用直流柜输出电压 220V），逐渐减小电阻  $R$ ，同时

用转速仪测量同步电机转速，使电机转速逐步达到额定转速 1500 r/min。

**步骤（5） 调节同步发电机励磁，使输出电压达到额定电压（400V）**

- a. 切换开关 S1 合向“2”位置。
- b. 合上同步电机励磁电源开关，调节同步电机励磁电流  $I_f$ ，使其单方向递增，增至发电机空载输出电压达到额定  $E_0=U_N$ （即 400V）值为止。

**步骤（6） 观察指示灯，判断相序**

若三组指示灯同时变亮、同时变暗，则表示发电机与电网相序一致。

若三组指示灯依次明暗，形成旋转灯光，则表示发电机和电网相序不同。则应先停机，调换三相电源任意两根端线，改变相序后，按前述步骤重新启动电动机。

**步骤（7） 细调，使灯光缓慢明暗变化**

- a. 微调直流电动机的电枢电流（即微调电阻 R），使机组转速微小变化。
- b. 当频率很接近时，三组指示灯同时缓慢明、暗。
- c. 在做步骤（5）、步骤（6）、步骤（7）时，各参数间有影响，所以要反复微调，一直微调到符合并联要求。

**步骤（8） 准确并联**

- a. 发电机投入并联运行应选择在三组灯同时熄灭的瞬间。可以观察灯光熄灭的情况，放过几次合闸机会，以便确定合闸时机。
- b. 当灯光变暗瞬间，及时合上并网开关，投入并联运行。

**实验注意事项：**

- ◆ 在不同相序时严禁继续下面的步骤；（会损坏电机）
- ◆ 并联合闸应果断。

**步骤（9） 停机**

- a. 首先断开并网开关。
- b. 三相调压器调整到零位。
- c. 增大起动电阻 R 至最大值。
- d. 减小同步电机励磁电流至零，并关闭同步机励磁电源。
- e. 关闭直流电动机电枢电源，使电机减速至停止。
- f. 关闭直流电机励磁电源。

## **2. 用自同步法将三相同步发电机投入电网并联运行**

**步骤（1） 并联前的准备（同上的步骤（5）、步骤（6）、步骤（7））**

- a. 开关 S 1 合向“2”位置（励磁电源端）。
- b. 调节三相调压器（为电网电压），使输出电压达到发电机额定电压（400V）。
- c. 启动直流电动机，调节至接近同步电机额定转速，约在 1500 转/分。
- d. 调节同步发电机励磁，使端电压与电网电压近似相等。
- e. 检验同步发电机与电网相序，必须保证一致。

**步骤（2） 发电机投入电网**

- a. 将开关 S 1 合向“1”位置，接入串联电阻  $R_1$ （ $R_1$  为  $90\Omega$  电阻，约为三相同步发电机励磁绕组电阻的 10 倍）。

b. 迅速合上并网开关。此时发电机投入电网。

### 步骤(3) 牵入同步

- 将开关 S 1 合向“2”位置（励磁电流端）；
- 发电机利用“自同步作用”牵入同步。

## (二). 三相同步发电机并网运行时有功功率的调节

目的：在励磁电流不变的条件下，测取  $I$ 、 $\cos \theta = f(P_2)$

基础：发电机已并联在电网上，可采用并网实验（一）的 1 或 2 的方法将发电机投入并网运行。

### 步骤(1) 使发电机输出电流至零

a. 同步发电机并入电网后，微调同步发电机励磁电流  $I_f$  和直流电动机的电枢电流（即微调起动电阻  $R$ ，改变电枢电流大小），使发电机输出电流接近 0，记录此时的励磁电流，即  $I_f = I_{f0}$ 。

### 步骤(2) 保持励磁电流为 $I_{f0}$ 不变，逐步增加原动机输出功率

a. 增加发电机输出功率，在发电机输出电流由 0 增加至额定电流  $I_N = 3.6A$  的过程中，记录三相电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  及两瓦计的功率  $P_I$ 、 $P_{II}$ ，取 6 组数据填在表 6-1 中。

注：改变直流电动机的电枢电流，可以改变三相同步发电机的有功功率

表 6-1  $U = \underline{400}$  (V)、 $n = \underline{1500}$  (r/min)、 $I_f = I_{f0} = \underline{\hspace{2cm}}$  (A)

序号	测量值					计算值		
	输出电流 $I$ (A)			输出功率 $P$ (W)		$I$	$P_2$	$\cos \theta$
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_I$	$P_{II}$			
1								
2								
3								
4								
5								
6								

$$I = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

表中： $P_2 = P_I + P_{II}$

$$\cos \theta = \frac{P_2}{\sqrt{3}UI}$$

## (三). 三相同步发电机并网运行时无功功率的调节

目的：保持转速  $n$ 、输出电压  $U$  不变，在一定输出功率条件下，测取 U 形曲线  $I = f(I_f)$

基础：发电机已并联在电网上，可采用并网实验（一）的 1 或 2 的方法将发电机投入并网运行。

### 步骤(1) 测取当发电机输出有功功率 $P_2=0$ 时的 U 形曲线 $I = f(I_f)$

a. 同步发电机并入电网后，调节同步发电机励磁电流  $I_f$  和直流电动机的电枢电流（即微调起动电阻  $R$ ，改变电枢电流大小），使发电机输出电流为 0 或接近 0。即输出功率  $P_2=0$ 。

**步骤(2) 调节励磁电流  $I_f$ ，测 U 形曲线**

- 增加发电机励磁电流  $I_f$ ，使发电机输出交流电流增加至  $1.2I_N$  (4.3A)，记录励磁电流、三相电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 。
- 逐步减小励磁电流，使输出电流减小至最小值，记录其数据。
- 继续减小励磁电流，输出电流又增加，增加到额定电流  $I_N=3.6A$  或励磁电流减小到 0。
- 分别在过励、欠励情况下，各记录 6 组数据填在表 6-2 中。

表 6-2  $U=$  400 (V)、 $n=$  1500 (r/min)、 $P_2=$  0 (W)

序号	三相电流 I (A)				励磁电流 $I_f$ (A)
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	I	
1					
2					
3					
4					
5					
6					

表中： $I = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$

**步骤(3) 测取当发电机输出有功功率  $P_2=1/2$  倍额定功率时的 U 形曲线  $I=f(I_f)$** 

同步发电机并入电网后，调节同步发电机励磁电流  $I_f$  和直流电动机的电枢电流（即微调起动电阻 R，改变电枢电流大小），使发电机输出功率  $P_2=1/2P_N$ （方法 1：即增加直流电动机的电枢电流，使两瓦计法下的  $P_2=|P_I + P_{II}|=1/2P_N$ ；方法 2：同样增加直流电动机的电枢电流，用公式：

$$I = \frac{P_2}{\sqrt{3}U \cos \theta}$$

计算 I (式中： $U=400V$ 、 $\cos \theta=1$ 、 $P_2=1/2P_N$ )，使同步电机的输出电流等于 I 数值，并保持不变。

**注：**增加直流电动机的电枢电流，可以增加其输出功率，从而改变同步发电机输出的有功功率。

**步骤(4) 调节励磁电流  $I_f$ ，测 U 形曲线**

- 增加发电机励磁电流  $I_f$ ，使发电机输出电流增加至  $1.2I_N$  (4.3A)，记录励磁电流、三相电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 。
- 逐步减小励磁电流，使输出电流减小至最小值，记录其数据。
- 继续减小励磁电流，输出电流又增加，增加到额定电流  $I_N=3.6A$  或励磁电流减小到 0。
- 分别在过励、欠励情况下，各记录 6 组数据填在表 6-3 中。



表 6-3  $U = \underline{400}$  (V)、 $n = \underline{1500}$  (r/min)、 $P_2 = (0.5P_N) = \underline{1250}$  (W)

序号	测量值 (A)				计算值	
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_f$	$I$	$\cos \theta$
1						
2						
3						
4						
5						
6						

$$I = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

表中:

$$\cos \theta = \frac{P_2}{\sqrt{3}UI}$$

**步骤(5) 停机**

- 增加同步发电机励磁电流  $I_f$ ，使发电机输出电流接近零（即调回到实验的起始点）。
- 首先**断开并网开关**。
- 三相调压器调整到零位。
- 增大起动电阻  $R$  至最大值。
- 减小同步电机励磁电流至零，并关闭同步机励磁电源。
- 关闭直流电动机电枢电源，使电机减速至停止。
- 关闭直流电机励磁电源。

**六. 实验报告**

- 三相同步发电机可用准确同步法和自同步法并联入电网，分析两种方法的优缺点。
- 试述如当并联条件不满足时并网会产生什么后果。
- 试述同步发电机有功和无功功率调节的方法。
- 画出当发电机输出有功功率等于 0、等于 1/2 倍额定功率时的 U 形曲线  $I=f(I_f)$ ，并解释此曲线。

**七. 思考题**

- 采用自同步法并联运行时，先将同步发电机励磁绕组串入 10 倍附加电阻，试分析此电阻回路有什么作用？
- 自同步法并网时，若转速太低会有什么影响？转速是否可以高于同步速？

## 实验七 直流发电机

### 一. 实验目的

1. 掌握用实验方法测定他励直流发电机的运行特性。
2. 掌握并励直流发电机的自励过程，并观察自励过程。

### 二. 预习要点

1. 直流发电机的运行特性有哪些？对于不同的特性曲线，保持哪些物理量不变，同时测量哪些物理量？
2. 做空载实验时，励磁电流必须单方向调节，为什么？
3. 并励直流发电机的自励条件是什么？当发电机不能自励建立电压时，应采取什么措施？。

### 三. 实验项目

#### 1. 他励直流发电机

- (1) 空载特性：保持  $n=n_N$ ，使  $I=0$ ，测取  $U_0=f(I_f)$ 。
- (2) 外特性：保持  $n=n_N$ ，使  $I_f=I_{fN}=0$ ，测取  $U=f(I)$ 。
- (3) 调节特性：保持  $n=n_N$ ，使  $U=U_N$ ，测取  $I_f=f(I)$ 。

#### 2. 并励直流发电机

- (1) 自励电压建立过程。
- (2) 外特性：保持  $n=n_N$ ，使场阻  $R_{\Sigma}$  为常数，测取  $U=f(I)$ 。

### 四. 实验设备及仪器

1. 电机教学实验台主控制屏 BMEL-II
2. 直流电压、电流表 (BMEL-34A)
3. 直流发电机励磁电源 (BMEL-008)
4. 直流电动机励磁电源 (BMEL-008G)
5. 直流电动机电枢电源 (专用直流柜)
6. 直流电动机-直流电机机组 (BMEL-003A)
7. 滑线电阻  $200\Omega$
8. 可调电阻箱  $55\Omega$

### 五. 实验方法及步骤

选用直流电动机-直流发电机组 BMEL-003A。

- (1) 直流电动机：额定转速  $1500\text{r/min}$ ，额定功率  $2.2\text{kW}$ 、额定电压  $220\text{V}$ 、额定电流  $12.5\text{A}$ ，励磁绕组额定电压  $220\text{V}$ 、额定电流  $0.61\text{A}$ 。
- (2) 直流发电机：额定转速  $1450\text{r/min}$ ，额定功率  $1.5\text{kW}$ 、额定电压  $220\text{V}$ 、额定电流  $6.8\text{A}$ ，励磁绕组额定电压  $220\text{V}$ 、额定电流  $0.82\text{A}$ 。

## （一）他励直流发电机

### 1) 他励发电机的空载运行特性。

原理：直流电动机作为原动机，拖动直流发电机运行，用可调电阻作为直流发电机的负载。

实验电路：如图 7-1 所示。原动机采用直流电动机 M，接成他励形式；拖动直流发电机旋转，直流发电机电枢绕组开路。

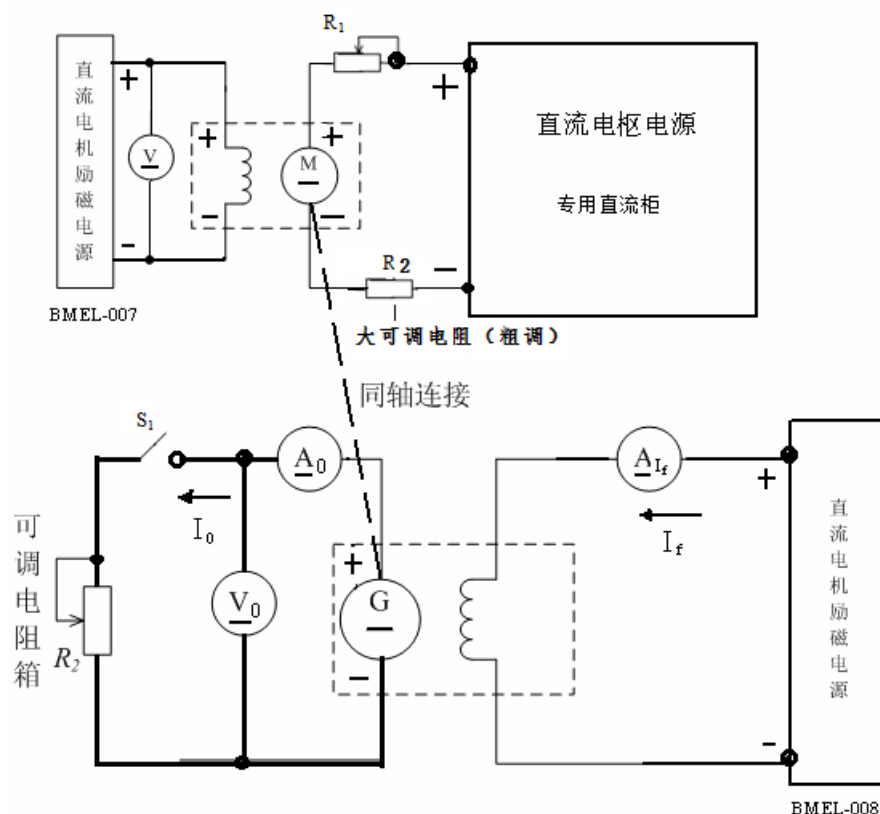


图 7-1 同步发电机的空载运行特性实验接线

#### 步骤（1）按图 7-1 进行接线

1. 直流电动机励磁电源为可调的恒流源（BMEL-008），注意电源极性。
2. 直流电动机电枢接直流稳压电源（专用直流柜）。
3. 直流发电机励磁电源为可调的恒流源（BMEL-008G）， $A_{If}$  为安培表。
4. 直流发电机电枢绕组接有直流电压表  $V_0$ 、直流电流表  $A_0$ ，空载时不接负载电阻箱。

提示：每个接线柱不要超过 2 根并连接线，必须旋紧，确保试验中不松动。

#### 步骤（2）实验预备

1. 各表计量程可以选择在“自动”档。

2. 各可调控制选钮在最小位置，一般左旋到底。
3. 将直流电动机电枢回路的起动电阻  $R_1$  调在最大值位置。

**步骤（3） 启动直流电动机，调节至直流发电机额定转速（1450 转/分），保持不变**

1. 合上主控制屏电源开关（左侧面）。
2. 合上直流电动机励磁电源开关（BMEL-008），加额定励磁电压（220V）。
3. 合上直流电动机电枢电源开关，逐渐减小起动电阻  $R_1$ ，同时用转速表测量机组转速，使机组转速平稳达到直流发电机的额定转速 1450 r/min，并保持恒定。

**步骤（4） 保持转速不变，调节直流电动机的电枢电流，测定空载特性曲线**

1. 合上直流发电机励磁电源开关（BMEL-008G）。
2. **测空载特性的上升分支：**调节发电机励磁电流  $I_f$ （调节励磁电压），使其从 0 开始单方向递增，至发电机输出电压  $U_0=1.2U_N$ （即 264V）止（观察  $V_0$  电压表）。测取 9 点，每点读取励磁电流  $I_f$  及相应的空载电压值  $U_0$ 。
3. **测空载特性的下降分支：**减少电机励磁电流，使  $I_f$  单方向减至零值为止。选择 9 点，读取励磁电流  $I_f$  和相应的空载电压  $U_0$ 。记录在表 7-1 中。

表 7-1 他励直流发电机空载试验记录数据

$n = 1450$  r/min

	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
上升 分支	$I_f$ (A)									
	$U_0$ (V)	30V								250V
下降 分支	$I_f$ (A)									
	$U_0$ (V)	240V								0

**实验注意事项：**

- （1）在实验过程中转速保持额定值 1450 r/min 恒定不变；
- （2）在额定电压值 220V 附近多安排测试点；
- （3）为防止磁滞现象影响，激励电流只能单方向调节；

**步骤（5） 待机**

确认直流发电机励磁电流已降至零，关发电机励磁电源。

**2). 他励发电机的外特性**

测量电路如图 7-1 所示。将可调电阻箱经过  $S_1$  开关接至直流发电机电枢回路中，应串入直流安培表  $A_0$ ，并接直流电压表  $V_0$ 。

**步骤（1） 串入可调直流电阻箱**

1. 调节直流电阻箱  $R_2$ ，使电阻保持在最大值位置。
2. 将可调直流电阻箱串入电枢回路，将  $S_1$  开关切换到 1 位置。（电阻箱的中间两端子为大电流接线端子）

**步骤（2） 调节直流发电机，使其达到额定运行工作点**

1. 合上直流发电机励磁电源开关（BMEL-008G），调节旋钮逐渐增加励磁电流  $I_f$ 。
2. 同时调节（增加）发电机的励磁电流和调节（减小）负载电阻  $R_2$ ，观察发电机端电

压和负载电流的变化。当发电机的负载电流（达到 6.8A）、端电压（达到 220V）和转速（达到 1450 r/min）均为额定值时，即达到额定运行点，此时的励磁电流为额定励磁电流  $I_{fN}$ 。在表 7-2 中记录此时的各参数值。注：在调节过程中需注意保持机组的转速为额定转速 1450 r/min。

**步骤（3） 调节发电机负载，保持发电机励磁电流  $I_{fN}$  不变，记录端电压，测定外特性曲线**

1. 逐步增加负载电阻  $R_2$ ，即减小发电机的负载电流，在额定负载（6.8A）至空载运行范围内，测取 9 组数据，每次记录负载电流值和端电压。记录在表 7-2 中。

**注意：测量过程尽量快，以防止电阻箱过热。**

表 7-2 他励直流发电机外特性试验记录数据  $I_{fN} = \underline{\hspace{2cm}}$  mA,  $n = \underline{1450}$  r/min

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U (V)	220V								240V
I (A)	6.8								

**步骤（4） 待机**

1. 将  $S_1$  开关切换到 0 位置，减小直流发电机励磁电流至零，并关闭励磁电源。

### 3). 他励发电机的调节特性

测量电路如图 7-1 所示。将可调电阻箱接至直流发电机电枢回路中，应串入直流安培表，并接直流电压表。

**步骤（1）** 打开直流发电机励磁电源（BMEL-008G），调节直流发电机励磁电流，使发电机空载电压为额定值 220V。

**步骤（2） 接入负载**

1. 调节直流电阻箱  $R_2$ ，使电阻保持在最大值位置。

2. 将可调直流电阻箱  $R_2$  串入电枢回路，将  $S_1$  开关切换到 1 位置。（电阻箱的中间两端子为大电流接线端子）

**步骤（3）** 改变负载，保持端电压为额定值（220V）不变，调节发电机励磁电流，测量调节特性

1. 逐步减小负载电阻  $R_2$ ，即增加发电机的负载电流，同时不断调节发电机的励磁电压，保持发电机电枢输出电压为额定值 220V，从空载到额定负载电流（6.8A）范围内，测取 8 组数据，每次记录负载电流值和励磁电流值。记录在表 7-3 中。

**注意：测量过程尽量快，以防止电阻箱过热。**

表 7-3 他励直流发电机调节特性试验记录数据  $U=220\text{ V}$ ,  $n=1450\text{ r/min}$ 

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_0\text{ (A)}$	<b>2.0A</b>							<b>6.8A</b>
$I_f\text{ (A)}$								

**步骤（4） 停机**

1. 减小直流发电机励磁电流至零，并关闭励磁电源。
2. 减小直流电动机电枢电压（调节起动电阻  $R_1$  在最大值位置），使机组停机，关闭电枢电源。
3. 减小直流电动机励磁电流至零，关闭励磁电源。
4. 将  $S_1$  开关切换到 0 位置，断开负载电阻。

**（二） . 并励直流发电机****1) . 并励时电压的建立过程****步骤（1） 按图 7-2 进行接线**

1. 直流电动机的接线不变。
2. 直流发电机的励磁回路串联  $200\ \Omega$  滑线变阻器，并联至直流发电机的电枢输出端。
3. 将励磁串联电阻  $R_{f2}$ ——滑线变阻器调节在电阻最大位置。（此时场阻最大）

**步骤（2） 启动直流电动机，调节至直流发电机额定转速（1450 转/分），保持不变**

1. 合上直流电动机励磁电源开关，加额定励磁电压（220V）。
2. 合上直流电动机电枢电源开关，逐渐减小起动电阻  $R_1$ ，同时用转速表测量机组转速，使机组转速平稳达到直流发电机的额定转速  $1450\text{ r/min}$ ，并保持恒定。

**步骤（3） 并励发电机的电压建立**

1. 观察直流发电机有无剩磁电压。记录剩磁电压， $U_r=$ \_\_\_\_\_ V。如剩磁电压为 0，则应先进行他励充磁。
2. 接入励磁电压，即将  $S_2$  开关切换到 1 位置，接上滑线电阻，观察发电机的端电压如何变化。
  - 如电压值增加，表明励磁绕组与电枢绕组的极性是正确的，可以继续实验。
  - 如电压值减小，表明励磁绕组与电枢绕组的极性接错，应先将励磁绕组的两头对调。对调前，首先关闭励磁电源，对调后，可以继续实验。
3. 观察改变发电机的场阻对发电机端电压的影响。
4. 不断减小场阻，将发电机电枢端电压建立起，直到额定电压 220V。

**2) . 测量并励发电机的外特性曲线****步骤（1）**

1. 保持发电机在额定转速与额定电压。
2. 将负载电阻  $R_2$  调节在最大值，接入负载电阻箱，即将  $S_1$  开关切换到 1 位置。

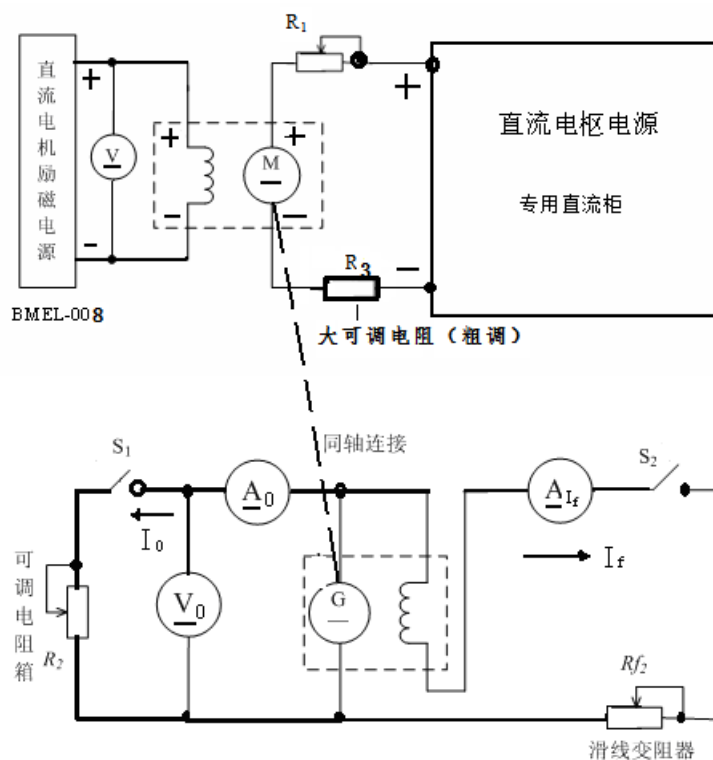


图 7-2 并励直流发电机实验接线

### 步骤 (2)

1. 逐步增加发电机的负载电流（即减小负载电阻  $R_2$ ），同时调节励磁电流（改变滑线变阻），使负载端电压达到额定值 220V、电流达到额定值 6.8A 和转速（达到 1450 r/min）均为额定值时。此时为额定运行点，此时的励磁电流即为  $I_{fN}$ ，记录在表 7-4 中。注：在调节过程中需注意保持机组的转速为额定转速 1450 r/min。

2. 保持励磁电流  $I_{fN}$  不变（在改变负载时，需要不断调节滑线电阻，来保持  $I_{fN}$  不变），逐步减小负载（即增加负载电阻  $R_2$ ），直至负载为 0，在额定运行至空载范围内，测取 8 点，每点记录负载电流和端电压。

表 7-4 并励直流发电机外特性试验记录数据  $I_{fN} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mA}$ ,  $n = \underline{1450} \text{ r/min}$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_0$ (V)	220V							240V
$I_0$ (A)	6.8							

## 六. 实验报告

1. 根据空载实验数据，画出空载特性曲线的上升分支和下降分支，
  - (1) 计算出被试电机的剩磁电压；
  - (2) 取两条曲线的平均值为电机的空载特性曲线，由曲线计算该电机在额定电压时的饱和系数。
2. 在同一坐标纸上画出他励、并励发电机的外特性曲线，分别计算两种情况下的电压变化率，并分析差异的原因。
3. 绘制他励发电机的调节特性曲线，分析在发电机转速不变时，为什么负载电流增加，为保持端电压不变，必须增加激磁电流的原因。

## 七. 思考题

1. 做空载实验时，为什么激磁电流必须只能在单方向上调节？
2. 并励发电机的端电压如果不能建立，可能有哪些原因？应分别采取什么措施？
3. 发电机的转向不改变，如何才能改变并励发电机的输出电压的极性？



## 实验八 他励直流电动机

### 一. 实验目的

1. 学习他励直流电动机的启动和改变转向的方法。
2. 掌握用实验方法测定他励直流电动机的工作特性和机械特性。
2. 掌握他励直流电动机的调速方法。

### 二. 预习要点

1. 什么是直流电动机的工作特性和机械特性？
2. 他励和并励直流电动机改变转向有什么区别？
2. 直流电动机的调速原理和基本方法。

### 三. 实验项目

1. 他励电动机启动和改变旋转方向
  - (1) 直流电动机的启动
  - (2) 互换电枢回路两端接线
  - (3) 互换励磁绕组两端接线
2. 他励直流电动机的工作特性和机械特性  
保持  $U_a=U_N$ 、 $I_f=I_N$ ，测取  $n$ 、 $T_2$ 、 $n=f(I_a)$ 、 $n=f(T_2)$ 。
3. 他励直流电动机的调速特性
  - (1) 改变电枢电压调速  
保持  $I_f=I_N$ 、 $T_2=\text{常数}$ ，测取  $n=f(U_a)$
  - (2) 改变电枢回路串联电阻  $R_2$  调速  
保持  $U_a=U_N$ 、 $I_f=I_N$ 、 $T_2=\text{常数}$ ，测取  $n=f(R_1)$
  - (3) 改变励磁电流调速  
保持  $U_a=U_N$ 、 $T_2=\text{常数}$ ，测取  $n=f(I_f)$

### 四. 实验设备及仪器

1. 电机教学实验台主控制屏 BMEL-II
2. 直流电压、电流表 (BMEL-34A)
3. 直流电机励磁电源 (BMEL-008)
4. 直流电机电枢电源 (专用直流柜)
5. 直流发电机励磁电源 (BMEL-007)
6. 直流-直流电机机组 (BMEL-003A)
7. 两个可调电阻箱 ( $55\ \Omega$ )

## 五. 实验方法及步骤

选用直流电动机-直流发电机组 BMEL-003A。

(1) 直流电动机：额定转速 1500r/min，额定功率 2.2kW、额定电压 220V、额定电流 12.5A，励磁绕组额定电压 220V、额定电流 0.61A。

(2) 直流发电机：额定转速 1450r/min，额定功率 1.5kW、额定电压 220V、额定电流 6.8A，励磁绕组额定电压 220V、额定电流 0.82A。

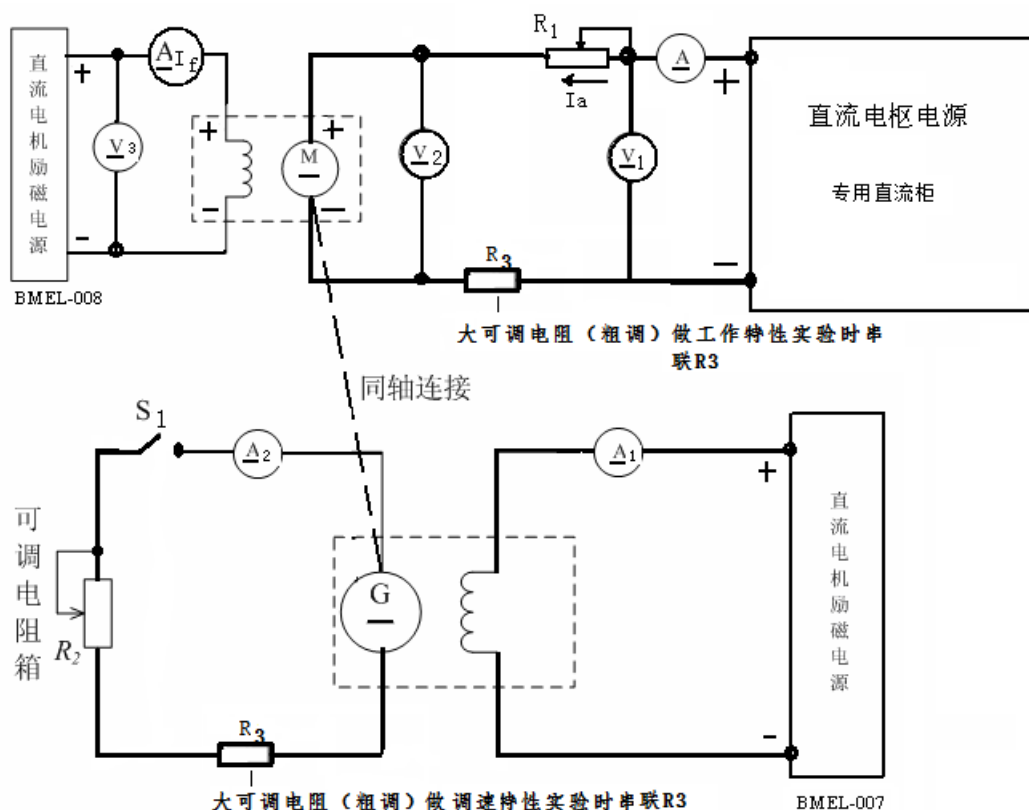


图 8-1 直流电动机实验接线

### (一). 他励电动机启动和改变旋转方向

#### 1). 直流电动机的启动

实验电路：如图 8-1 所示。直流电动机 M，接成他励形式。

步骤 (1) 按图 8-1 进行接线

1. 直流电动机励磁电源为可调的恒流源 (BMEL-008)。
2. 直流电动机电枢接直流电枢电源 (专用直流柜)。
3. 直流发电机励磁电源为可调的恒流源 (BMEL-007)。
4. 直流发电机电枢绕组接有直流电压表、直流电流表，空载时不接负载电阻箱。

提示：每个接线柱不要超过 2 根并联接线，必须旋紧，确保试验中不松动。

**步骤（2） 实验预备**

1. 各表计量程可以选择在“自动”档（按下状态为选择）。
2. 各分合按钮在“分”状态。
3. 各可调控制选钮在最小位置，一般指左旋到底。具体：未上电源前，把直流电机励磁电源的调节旋钮逆时针旋到底，直流电机磁场调节电阻调至最小，电枢调节电阻调至最大。断开各电压源、电流源开关。
4.  $S_1$  开关切换到 0 位置。
5. 初始调节直流电动机电枢回路串联的起动电阻箱电阻  $R_1$  至阻值最大位置（想想为什么？）。
6. 初始调节直流发电机负载电阻箱电阻  $R_2$  在阻值最大位置。

**步骤（3） 启动直流电动机**

1. 合上主控制屏电源开关（左侧面）。
2. 合上直流电动机励磁电源开关，调节旋钮加额定励磁电压（220V），。
3. 合上直流电动机电枢电源开关，电动机启动。

随着电机转速的增加，逐步调小电枢回路串联电阻，当  $R_1=0$  时，电动机进入正常运行。观察并记录直流电动机的转向。

**步骤（4） 停机**

关闭直流电动机电枢电源；  
调节同步电动机励磁电流至零，关闭励磁电源。  
直流电动机自然停止。

**2). 互换电枢绕组两端接线****步骤（1） 互换直流电动机电枢绕组两端接线**

1. 重新启动电动机（依第 1 项实验方法）。
2. 观察电动机转向是否与原来的转向相反，并做记录。
3. 停机。

**3). 互换励磁绕组两端接线****步骤（1） 互换直流电动机励磁绕组两端接线**

1. 重新启动电动机（依第 1 项实验方法）。
2. 观察电动机转向是否又反转，并做记录。
3. 停机。

**（二） . 他励直流电动机的工作特性和机械特性**

测量电路如图 8-1 所示。将可调直流电阻箱串入发电机的电枢回路，开关  $S_1$  开关仍切换在 0 位置。（电阻箱的中间两端子为大电流的接线端子）

**步骤（1）** 启动直流电动机至额定转速  $n_N$

依第 1 项实验方法，用转速仪跟踪电动机的实际转速。

$R_1$  电阻值=0

**步骤（2）** 接入负载（发电机），调节至额定工作状态

1. 合上发电机的直流励磁电源开关（BMEL-007），调节励磁电流至额定值（0.82A）。

2. 当发电机建立起正常的电压后， $S_1$  开关切换到 1 位置。逐步减小负载  $R_2$  电阻值，可使直流电动机所带的负载不断增加。

3. 负载变动过程中，需不断调节直流电动机的电枢电源（即分压电阻  $R_1$ ），使转速保持稳定，当具有额定电压  $U_N$ （ $V_2=220V$ ）、额定电流  $I_N$ （ $I_a=12.5A$ ）和额定转速  $U_N$ （1500r/min）时，即为额定工作点。

此时的励磁电流为额定励磁电流  $I_{fN}$ ，在后续实验步骤中，保持电动机励磁电流为额定值不变。

**步骤（3）** 改变负载，测工作特性

1. 保持直流电动机励磁回路不变。逐步增加负载电阻  $R_2$ ，即减小电动机的负载，从额定负载电流到空载运行范围内，测取 9 组数据（应分布均匀），每次记录直流电动机电枢电流  $I_a$  值和电机转速  $n$ 。记录在表 8-1 中。

**注意：**实验过程中，改变直流电动机的负载，可以通过改变同轴直流发电机的负载电流实现。

表 8-1 他励直流电动机工作特性试验记录数据  $V_2=U_N=220V$ ,  $I_{fN} = \underline{\hspace{1cm}} A$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_a$ (A)	12.5A								空载
$n$ (转/分)	1500								

**步骤（4）** 停机

1. 减小同步发电机励磁电流至零（BMEL-007），并关闭励磁电源。

2. 减小直流电动机的电枢电压至零（调大起动电阻  $R_1$ ），关闭电枢电源。

3. 减小直流电动机励磁电流至零（BMEL-008），关闭励磁电源。

### （三）. 他励直流电动机的调速特性

**原理——产生恒转矩负载的方法：**

带负载的发电机等效于一恒转矩负载。保持发电机的励磁电流和负载电流均不变。

实现方法：合上发电机励磁电源，调节励磁电流为其额定励磁电流（0.82A）； $S_1$  开关切换到 1 位置，调节负载电阻  $R_2$ ，使发电机的负载电流为小于额定值的某值（可取 5.2A）；且在实验过程中保持不变（每次通过调节  $R_2$  电阻得到）。

## 1) . 改变电枢电压调速

即：保持  $I_f=I_{fN}$ 、 $T_2=\text{常数}$ ，测取  $n=f(U_a)$

## 步骤 (1)

1. 启动直流电动机；
2. 保持直流电动机励磁电流为额定励磁电流不变，即  $I_f=I_{fN}=0.61\text{A}$ ；串联电阻  $R_1$  在零值位置 ( $R_1=0$ )；产生一恒转矩负载，即  $T_2=\text{常数}$ ；
3. 调节电枢电源电压  $U_a$  (即  $V_2$ )，电压从额定值向下调节，测量电压  $U_a$ 、电枢电流  $I_a$  及电机转速  $n$ 。将测量结果记录在表 8-2 中。

表 8-2 他励直流电动机调速试验记录数据  $I_{fN} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ A}$ 

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_a$ (V)	<b>220V</b>								<b>100V</b>
$I_a$ (A)									
$n$ (转/分)									

## 2) . 改变电枢回路串联电阻调速

即：保持  $U_1=U_N$ 、 $I_f=I_{fN}$ 、 $T_2=\text{常数}$ ，测取  $n=f(R_1)$

## 步骤 (1)

1. 启动直流电动机；
  1. 保持励磁电流为额定励磁电流不变，即  $I_f=I_{fN}=0.61\text{A}$ ；电枢电源电压不变，即  $U_1=U_N=220\text{V}$ ；产生一恒转矩负载，即  $T_2=\text{常数}$ ；
  2. 调节电枢回路串联电阻  $R_1$ ，阻值从 0 开始增加，当  $R_1$  改变时，电动机转速变化（减小）。测量电枢绕组端电压  $U_a$  (即  $V_2$ )、电枢电流  $I_a$  及电机转速  $n$ ，计算  $R_1$ 。将测量和计算结果记录在表 8-3 中。

表 8-3 他励直流电动机调速试验记录数据  $U_1=U_N= \underline{220} \text{ V}$ ， $I_{fN} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ A}$ 

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_a$ (V)	<b>220V</b>								<b>140V</b>
$I_a$ (A)									
$n$ (转/分)									
$R_1$ ( $\Omega$ )									

电枢回路串联电阻  $R_1$  计算式： $R_1=(U_1-U_2)/I_a$

## 3) . 改变励磁电流调速

即：保持  $U_1=U_N$  ( $R_1=0$ )、 $T_2=\text{常数}$ ，调节  $I_f$ ，测取  $n=f(I_f)$

## 步骤 (1)

1. 启动直流电动机；
2. 保持电枢电源电压不变，即  $U_1=U_N$ ；产生一恒转矩负载，即  $T_2=\text{常数}$ ；
3. 调节励磁电压(励磁电压不能小于 170V)，由额定励磁电流向下变化，电动机转速变化（增加）。测量励磁电流  $I_f$  及电机转速  $n$ 、电枢电流  $I_a$ 。将测量和计算结果记录

在表 8-4 中。

表 8-4 他励直流电动机调速试验记录数据  $U_1=U_2=U_N=220\text{ V}$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_f$ (A)	0.70A	0.68	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58	0.55A
$I_a$ (A)								
$n$ (转/分)								

注意：电机最高转速不要超过  $1.2n_N=1800\text{r/min}$

## 六. 实验报告

1. 根据实验数据，画出工作特性和机械特性曲线。

(1) 转速特性  $n=f(I_a)$

(2) 转矩特性  $T_2=f(I_a)$

(3) 效率特性  $\eta=f(I_a)$

(4) 固有机特性  $n=f(T_2)$

2. 绘制他励直流电动机的调速特性曲线。

(1) 改变电枢电压的调速特性  $n=f(U_a)$

(2) 改变电枢回路串联电阻的调速特性  $n=f(R_1)$

(3) 改变励磁电流的调速特性  $n=f(I_f)$

附： $T_2$ 、 $\eta$  的计算方法、过程和计算表

设已知电枢绕组电阻  $R_a=1.6(\Omega)$ ， $U_N=220(\text{V})$ ， $I_{a0}=0.9\text{A}$

所求各量	电枢电流 $I_a(\text{A})$	转速 $n(\text{r/min})$	输入功率 $P_1=U_N I_a$	电枢铜耗 $p_{cu}=I_a^2 R_a$	电磁功率 $P_M=P_1-p_{cu}$	电磁转矩 $T=P_M/\Omega$	输出功率 $P_2=P_M-p_0$	效率 $\eta$ $=P_2/P_1$
计算公式								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								

其中， $P_0$  为电动机的空载损耗。当直流电动机启动后，发电机处于空载状态时，机组的总损耗近似为电动机损耗的两倍（发电机与电动机损耗近似相等）。设输入电流为  $I_{a0}$ ，此时电动机输入功率为  $P_{10}=2p_0$ ，即  $P_0=U_N I_{a0}/2$ 。

## 七. 思考题

1. 他励直流电动机的转速特性为什么略微下降？是否会出现上翘现象？为什么？
2. 并联直流电动机的转速特性是否有上翘现象？上翘现象对电机运行有什么影响？
3. 为什么他励直流电动机的转矩特性是一条直线？是否通过坐标原点，为什么？
4. 为什么当直流电动机的电枢电流太大时，效率反而降低了？
5. 为什么当负载转矩基本不变时，增加电枢回路串联电阻或降低电源电压会使电动机的转速下降，而降低励磁电流使转速上升？