

电气技术实验指导书

主编 李金文

主审 邹振春

承德石油高等专科学校

目 录

第一部分 电机拖动实验

实验一	直流发电机	1
实验二	并励电动机实验	4
实验三	单相变压器空载、短路实验	8
实验四	三相变压器的极性和连接组的测定	11
实验五	三相异步电动机的空载和短路实验	15
实验六	三相异步电动机机械特性的测定	18

第二部分 变流技术实验

实验一	晶闸管的简易测试及其导通、关断条件	20
实验二	正弦波同步触发电路	23
实验三	锯齿波触发电路	26
实验四	单相桥式半控整流电路	29
实验五	三相半波整流电路	34
实验六	三相桥式半控整流电路	38
实验七	三相全控桥式整流电路的研究	42
实验八	三相桥式有源逆变电路	46

第三部分 继电保护实验

实验一	电磁型电流继电器和时间继电器实验	49
实验二	中间继电器和信号继电器	54
实验三	三段式过流保护实验	56
实验四	电流互感器 10%误差实验	58
实验五	BCH-2 差动继电器的特性实验	62
实验六	BG-11B 功率方向继电器特性实验	70

附录一	移相器.....	75
附录二	D3- Ψ 型相位表的工作原理	78

第四部分 传感器技术实验

第一篇	传感器实验装置简介.....	80
第二篇	实验指导书	
实验一	热电阻测温实验.....	82
实验二	PN 结测温实验.....	84
实验三	超声波传感器实验.....	86
实验四	V I 变换电路实验.....	88
实验五	温度传感器 AD590 实验.....	90
实验六	简易酒精测试实验.....	93
实验七	热敏电阻测温电路.....	95
实验八	磁电式转速传感器实验.....	97
实验九	角位移测量实验.....	99
实验十	霍尔电流测量系统.....	100

第五部分 自动控制原理实验

实验一	典型环节的模拟研究.....	101
实验二	典型系统瞬态响应和稳定性.....	110
实验三	系统校正.....	115
实验四	控制系统的频率特性.....	119
实验五	采样系统分析.....	121
实验六	采样控制系统校正.....	125

实验一 直流发电机

一、实验目的

1. 学习电机实验的基本技术
2. 求取他励发电机的外特性 $U=f(I)$
3. 求取他励发电机的调整特性 $I_r=f(I)$

二、内容说明

1. 直流发电机的原动机采用三相异步电动机。
2. 在实验中，最好采用磁电式直流仪表进行测量，并注意仪表的极性。
3. 直流发电机的外特性是指转速 $n=n_N$ 且维持不变，保持发电机励磁回路电阻不变时，发电机的端电压 U 和负载电流 I 的关系曲线 $U=f(I)$ 。
4. 发电机的调整特性是指在转速 $n=n_N$ 的情况下，保持发电机的端电压 $U=U_N$ 不变，励磁电流 I_r 与负载电流 I 的关系曲线 $I_r=f(I)$ 。从调节特性可以求出发电机的额定励磁电流值 I_{rN} 。

5. 发电机电压变化率按下式计算：

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

式中 U_0 ——空载电压； U_N ——额定负载电压。

三、实验线路和实验仪器与设备

1. 实验线路见图 1 所示

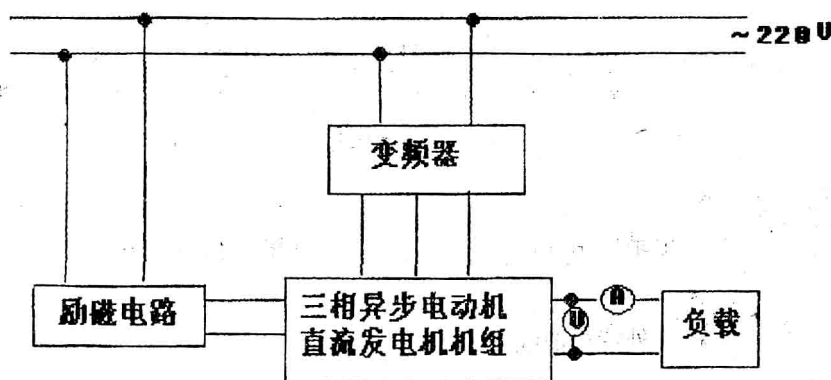


图 1 他励发电机负载实验接线图。

2. 实验仪器与设备

- (1) 三相异步电动机——直流发电机机组;
- (2) 变频器;
- (3) 发电机负载电阻(灯箱);
- (4) 直流电流表(1只);
- (5) 直流电压表(1只)。

四、实验步骤

1. 他励发电机的外特性

- (1) 起动变频器, 使发电机空载端电压在额定电压左右。
- (2) 将发电机的负载电阻 R 调到最大位置, 合上负载开关, 逐步减小负载电阻 R , 使发电机负载电流为额定值 ($2.5A$), 并保持转速不变。继续增加发电机负载电阻, 记录不同负载电阻时, 发电机电流及发电机电压的数值 (测 5~6 点即可)。

I (安)	
U (伏)	

2. 他励发电机的调整特性

- (1) 按外特性实验中(1)~(2)项重做一遍。
- (2) 保持转速 $n=n_N$ 和 $U=U_N$ 不变, 逐渐减小负载电流, 直到空载($I=0$)为止, 读取发电机的励磁电流 I_f 和负载电流 I 之值 5~7 组。

I (安)	
I_f (安)	

- (3) 从空载开始, 逐步增加负载, 仍维持转速 $n=n_N$ 及电压 $U=U_N$ 不变, 直到负载电流 $I=I_N$ 为止, 读取发电机的励磁电流 I_f 和负载电流 I 之值 5~7 组。

五、实验报告要求

1. 编写实验目的, 记录所用仪器与设备的名称、规格、数量及编号。
2. 绘制实验线路图。
3. 绘制他励发电机的外特性曲线并求出电压变化率。
4. 绘制调整特性曲线。

六、思考题

1. 他励发电机的外特性是一条略微下垂的曲线，即随着负载电流的增大，发电机的端电压将稍有下降。引起端电压下降的主要因素是什么？

2. 他励发电机有哪些特点，适用于什么场合？

注：实验注意事项

- (1) 安全注意事项。
- (2) 有关仪表、设备的正确使用方法。各种仪表、设备首先要检查其型号、规格、量程，做到合理使用。
- (3) 接线前必须将电源切断。
- (4) 接线要注意文明。线的长短、粗细要合适，走线尽量避免交叉，一个接线柱上不要接三个以上的接头；仪表、设备的安放要整齐适当。
- (5) 接线要牢实。
- (6) 实验线路每一次接好及每一次改接后，都必须经教师检查通过，方可进行实验。合电源刀闸前必须通知全组成员。
- (7) 使用直流仪表时，均应先试量，看其极性正确与否。
- (8) 实验时，必须注意同组人员之间的配合，指挥、测量、记录要有分工，读数要同时进行；调节指挥要用手势，不要大声喧哗。
- (9) 实验完毕，首先要分析所得结果是否合理，然后将结果经教师检查，签字后方可拆除线路。
- (10) 拆线前必须先断电源。

实验二 并励电动机实验

一、实验目的

1. 求取并励电动机的工作特性
2. 测量电动机的冷态电阻和电动机的空载损耗
3. 测定并励电动机的调速特性

二、内容说明

1. 本实验用并励电动机拖动直流发电机作为负载；
2. 工作特性是指 $U = U_N = \text{常值}$, $I_f = I_{fN}$ 不变时, n 、 T 、 $\eta = f(P_2)$ 的关系。

在实际运行中 I_a 较易测到, 且电枢电流 I_a 随着 P_2 的增大而增大, 故工作特性也可表示为 n 、 T 、 $\eta = f(I_a)$ 。调节发电机的负载电阻, 使电动机的输入电流 I_M 在 $(0 \sim 1.2) I_{MN}$ 范围内变化, 读取直流电动机的转速 n , 电压 U_M 、电流 I_M 、励磁电流 I_f 及发电机的电压 U_G 、电流 I_G 等数据。并按下列公式计算电动机的效率和转矩 T ;

电动机的输入功率 $P_{1M} = U_M I_M$

电枢电流 $I_a = I_M - I_f$

电动机效率 (假定两机效率相同)

$$\eta_M = \eta_G = \sqrt{\frac{P_{2G}}{P_{1M}}}$$

电动机输出功率 $P_{2M} = P_{1M} \eta$

发电机输出功率 $P_{2G} = U_G I_G$

转矩

$$T_2 = 0.975 \frac{P_{2M}}{n}$$

根据每组计算数据, 绘制 η 、 n 、 T_2 、 I_a 、 $= f(P_{2M})$ 的特性曲线

3. 人工机械特性是指 $U = U_N = \text{常值}$, 励磁电流和串入电枢回路电阻 R_{pa} 保持不变时, 电动机的转速 n 和转矩 T_2 之间的关系, 即 $n = f(T_2)$ 。

4. 实际上直流电动机和发电机的效率并不一定相等。如果两机效率不等, 求

取工作特性时，则需测量电动机的冷态电枢电阻，周围介质温度以及电动机的空载损耗。

为了测取空载损耗，则需拆开联轴器，使电动机在额定电压 U_N 、额定电流 I_N 及额定转速情况下单独运转，以测取电动机的电枢电压和空载电流。

三、实验线路图和实验用的仪器、设备

1. 实验线路 直流并励电动机负载实验接线如图 2 所示

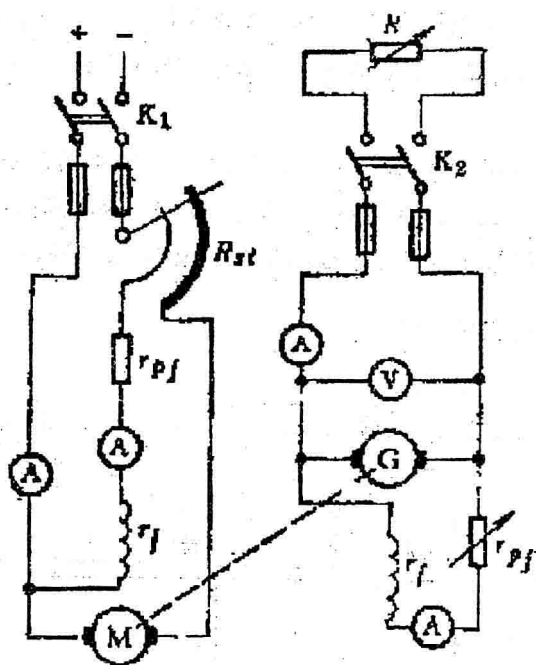


图 2 并励电动机实验接线图

2. 实验用的仪器、设备

- (1) 直流并励电动机 M
- (2) 直流并励发电机 G
- (3) 起动器 R_{st}
- (4) 负载电阻
- (5) 滑线电阻
- (6) 直流电压表 V
- (7) 直流电流表 A
- (8) 转速表
- (9) 秒表

四、实验步骤

1. 工作特性的求取

(1) 合理地选择仪表量程, 按图 2 所示接线。实验前, 电动机励磁回路电阻 r_{pf} 取最小值, 发电机励磁回路电阻 r_{pf} 取最大值。

(2) 合上电源开关, 用起动机 R_{st} 起动电动机, 调节电阻 r_{pf} , 使发电机建立电压 $U=U_N$ 。

(3) 求取工作特性, 合上负载开关 $K2$ 调节负载电阻 R 和电动机励磁回路电阻 r_{pf} , 使电动机在电压 $U=U_N$ 和负载 $I=I_N$ 的情况下, 使电动机的转速 $n=n_N$, 此时电动机的励磁电流 $I=I_{fN}$ 。

(4) 保持电动机电压 $U=U_N$ 和励磁电流 $I=I_{fN}$ 不变, 调节电动机的负载 (改变发电机的负载电阻 R) 使电动机负载电流从 $1.2 I_N$ 开始, 逐渐减小发电机的输出电流直至 $I_G=0$ 为止。每次测取电动机的负载电流 I_M 、电压 U_M 、转速 n 、励磁电流 I_f 及发电机的电压 U_G 、电流 I_G 等数据 5 ~ 7 组。

序 号	电 动 机									发 电 机		
	实 验 值				计 算 值					实 验 值		计算值
	U_M (V)	I_M (A)	I_f (A)	n	I_a	P_{1M} kW	P_{2M} kW	η	T_2 N.M	U_G	I_G	P_{2G}

2. 人工机械特性的求取

将电动机的电枢回路串上调节电阻 R_{pa} , 在 $U=U_N$, $I_f=I_{fN}$ 和保持电枢回路电阻 R_{pa} 不变时, 测取人工机械特性。其实验步骤和方法与工作特性的求法相同。测取数据 5 ~ 7 组记入表中, 数据表同上表。

3. 改变电枢端电压调速

(1) 将枢路电阻 R_{pa} 调到零。起动电动机后, 调节 R_{pa} 和电动机的励磁电流, 并适当增加发电机的负载, 使电动机的电枢电压 $U_a=U_N$, 励磁电流 $I_{fN}=I_{fN}$; 输入电流

$I_1=0.5I_N$ 记下此时发电机电流 I_G 。

(2) 保持电动机的 $I_{f1}=I_N$ 及发电机的负载电流 I_G 不变 (发电机的励磁电流 I_{f2} 为规定值时, 即 $T_2 = \text{常数}$)。逐次调节 R_{pa} 以改变电压 U_a , 电动机转速逐次减小, 每次测取 U_a, n, I 的数据共 4 ~ 5 组, 记入下表中。

序号	U_a	n	I	I_a	I_{f1}	I_{f2}	I_G	T_2

4. 改变励磁电流调速

(1) 将电阻 R_{pa} 调到零, 起动电动机后, 电动机的 $U_a=U_N$, 适当增加电动机的负载使 $I=0.5I_N$, 记下此时发电机的负载电流 I_G 和电动机的 n, I, I_{f1} 。

(2) 保持电动机的 $U_a=U_N$ 及发电机 I_G 不变 (即 $T_2 = \text{常数}$, I_{f2} 为规定值) 的条件下, 缓慢地减小电动机的励磁电流 I_{f1} , 电动机转速逐渐增加, 一直做到 $n=1.2n_N$ 为止, 读取电动机的 I_{f1}, n, I, I_a 等数据, 共 4 ~ 5 组记入下表中。

序号	I_{f1}	n	I	I_a	U_a	I_G	I_{f2}	T_2

五、总结报告

1. 编写实验日的, 抄录仪器和设备的名称、规格、数量和编号等;
2. 绘出实验线路图;
3. 列出表格, 写出实验数据和计算数据;
4. 绘出工作特性曲线, 并由工作特性计算转速变化率;
5. 绘出机械特性曲线。电动机的输出转矩可计算求取, 或用测功机直接测取, 或根据 n 和 I_G 由校正过的直流发电机的校正曲线上查取。

实验三 单相变压器空载、短路实验

一、实验目的

1. 熟悉和掌握单相变压器的实验方法
2. 通过空载和短路实验测定单相变压器的参数及运行特性。

二、预习要求

1. 在空载和短路实验中, 各种仪表怎样联结, 才能使测量误差最小。
2. 如何用试验的方法测定变压器的铁耗和铜耗。
3. 变压器空载和短路实验时应注意哪些问题? 一般电源应接在哪一方比较合适。

三、内容说明

1. 变压比的测定

一般变压比的测定可选用电桥法, 双电表法和标准互感器法。本次实验我们采用双电表法。

采用双电表法时, 按图 3 接线。在变压器的低电压端施加一适合电压表量程的电压, 一般在 $1\sim 25\%$ 线圈的额定电压范围内选择, 并尽量使两个电压表的指针偏转在满刻度的一半以上, 以提高测量的准确度。

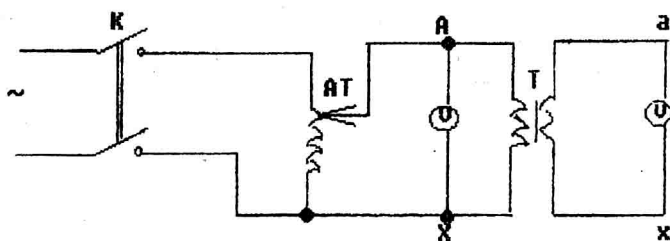


图 3 用双电表法测定变比的接线图

2. 空载实验通常是将高压侧开路, 由低压侧测量。又空载时功率因数较低, 因此测量时采用低功率因数功率表。因为变压器空载阻抗很大, 故接线采用电压表外接形式, 如图 4。

3. 短路实验是将低压侧短接, 从高压侧通电测量。调压器电压应从低值逐步上调, 以免损坏仪表。由于短路阻抗很小, 故接线采用电压表内接形式, 如图 5。

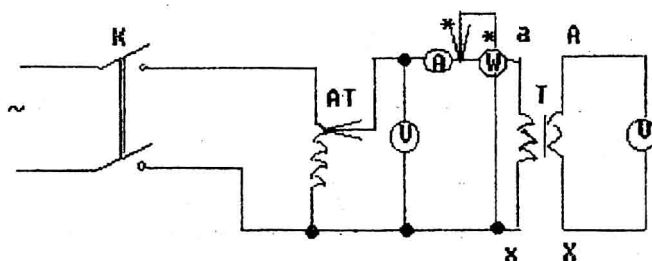


图 4 单相变压器空载实验线路图

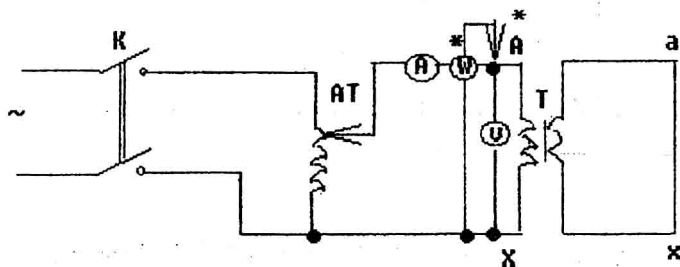


图 5 单相变压器短路实验线路图

四、实验步骤

1. 测变比

按图 3 接线，电源经调压器 A T 接至低压线圈，高压线圈开路，闭合开关 K，外施电压调至额定的 50%，测量两侧的电压，计算变压器的变比。要求测量三次，取三次测量的平均值。

2. 空载实验

按图 4 接线，根据空载电流 $I_0 = 4 \sim 16\% I_N$ ，选择电流表和功率表的电流量程。闭合开关 K 前，A T 应调至电压输出最小位置。闭合开关 K 后，调节 $U = 1.2 U_N$ 。然后逐次降低，测量 U_0 ， I_0 ， P_0 ，在 1.2 至 0.5 间共取 6 至 7 组（包括 $U_0 = U_N$ ），计入下表。

序号	实验数据			计算数据		
	U_0 (V)	I_0 (A)	P_0 (W)	U_0^*	I_0^*	$\cos\Phi_0$

3. 短路实验

按图 5 接线, 将低压侧短接, 高压侧接电源。闭合开关 K 前, A T 应调电压输出最小位置。闭合开关 K 后, 调节调压器, 使 $I = 1.1 I_N$ 。在 $1.1 \sim 0.5 I_N$ 范围内, 测量 U_K , I_K , P_K , 共取 5 组 (包括 $I_K = I_N$), 计入下表。

序号	$I_K (A)$	$U_K (V)$	$P_K (W)$	$\cos \psi$

五、实验报告

1. 计算变比

根据变比实验数据, 分别计算变比 K 值, 取其平均值作为变压器的变比。

2. 根据空载实验数据, 作空载特性曲线并计算激磁参数。

$$a \quad \text{计算 } U_0^* = \frac{U_0}{U_N}, \quad I_0^* = \frac{I_0}{I_N}, \quad \cos \Phi_0 = \frac{P_0}{U_N I_N}.$$

作空载特性曲线 $U_0^* = f(I_0^*)$, $P_0 = f(U_0)$ 。

b 计算激磁参数

3. 根据短路实验数据, 作短路特性曲线并计算短路参数。

a 作短路特性曲线 $U_K = f(I_K)$, $P_K = f(I_K)$ 。

b 计算短路参数

4. 根据空载和短路实验测定的参数, 画出变压器的简化等效电路。

实验四 三相变压器的极性和联接组的测定

一、实验目的

1. 学习用交流电压表法测定变压器绕组极性的方法。
2. 学会用实验的方法测定三相变压器的联接组号。

二、预习要点

1. 测定变压器绕组的同名端有那些方法？
2. 为什么要进行联接组的测定？

三、内容说明

确定变压器的联接组号时，可采用下列方法：

a. 直读法（相位表法）

在被测变压器的高压端施加数值不大，且足以使相位表 Ψ 正常指示的电压，即可读出电压的相位差，以确定其时钟序。

b. 双电压表法

按图 6 接线，在高压侧施加一低于 250V 的三相交流电压（要加 200V），用电压表依次测量 $b-B$, $b-C$, $c-B$, $A-B$ 和 $a-b$ 线端的电压。

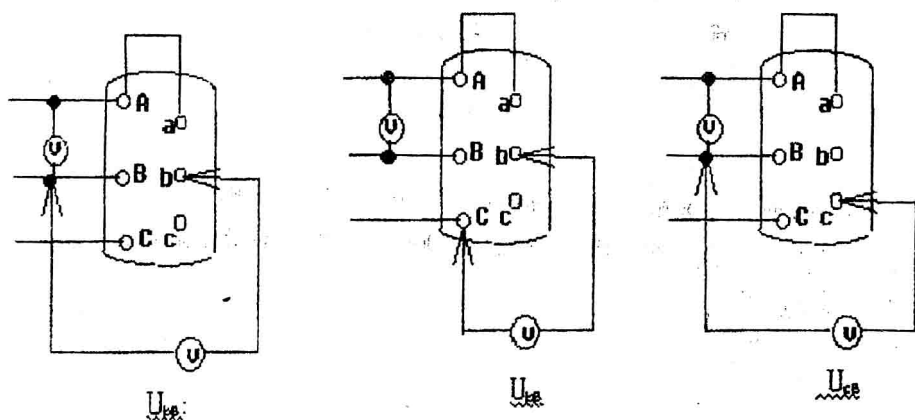


图 6 三相变压器的极性和连接组

本实验主要测定三相变压器绕组为 $Y, y0$ 和 $Y, d11$ 的联接组别。用电压表测出有关电压值，根据核实公式求出核实值，再与实测值进行比较可确定联接组别。

四、实验步骤

（一）测定三相变压器原，副边的极性和芯式变压器的相间极性

1. 先用万用表测出变压器上哪两个出线端是属于同一绕组的，标上标号

2. 测定每相原、副边绕组的极性

将 X 和 x 用导线相连，在 A 和 X 上加 200V 的电压，测量 U_{AX} 、 U_{Ax} 、 U_{ax} ，若 $U_{Ax} = |U_{AX} - U_{ax}|$ ，则 A 和 a 互为同名端，若 $U_{Ax} = |U_{AX} + U_{ax}|$ ，则 A 和 a 互为异名端，须把 a 和 x 标号对调才符合 I、I0 的要求。

同理，其它两相间也可依此法定出。

3. 测定芯式变压器的高压边 A、B、C 三相间的极性

把芯式变压器的 X 和 Z 用导线相连，在 B 相上加 200V 的电压，测量 U_{AC} 、 U_{AX} 、 U_{CZ} ，若 $U_{AC} = |U_{AX} - U_{CZ}|$ ，则标号正确，若 $U_{AC} = |U_{AX} + U_{CZ}|$ ，则相间标号不正确，须把 A 和 X 标号对调。

同理，其它两相间也可依此法定出。

(二) Y、y0 联结组的校核

1. 将三相变压器接成 Y、y0，如图 7

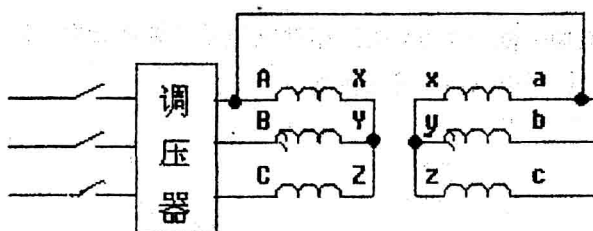


图 7

2. 用导线把 A a 接起来，在高压边加 200V 的电压，测量 U_{AB} 、 U_{ab} 、 U_{bB} 、 U_{bC} 、 U_{cB} 、 U_{cC} 可确定联接组别。

设变比为 K，即

$$K = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$$

按校核公式算出校核值

$$U_{bB} = U_{cC} = (K-1) U_{ab}$$

$$U_{Bc} = U_{Cb} = \sqrt{K^2 - K + 1} U_{ab}$$

且有 $U_{Bc} > U_{bB}$

3. 将测量值和校核值记录于下表中。

测量值						校核值			
U_{AB}	U_{ab}	U_{Bb}	U_{Cc}	U_{Bc}	U_{Cb}	U_{Bb}	U_{Cc}	U_{Bc}	U_{Cb}

(三) Y, d11 联结组别校核

1. 按图 8 将变压器接成 Y, d11, 并经老师检查认可;

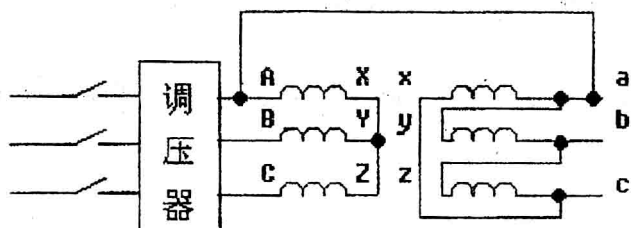


图 8 逆序连接

2. 用导线把 A a 连接起来, 在高压边加 200V 的电压, 测量 U_{AB} , U_{ab} , U_{Bb} , U_{BC} , U_{cb} , 可确定连接组别。

设变比为 K, 即

$$K = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$$

$$U_{Bb} = U_{Bc} = \sqrt{K^2 K - \sqrt{3}K + 1} U_{ab}$$

$$U_{Cb} = \sqrt{K^2 K + 1} U_{ab}$$

按校核公式算出校核值

3. 将测量值和校核值记录于下表中。

测 量 值						校 核 值			
U_{AB}	U_{ab}	U_{Bl}	U_{Ce}	U_{Be}	U_{Cb}	U_{Bl}	U_{Ce}	U_{Be}	U_{Cb}

五、 实验报告

1. 绘出 Y, y0 和 Y, d11 的电压相量图, 并将校核公式结果与实测结果作简要分析和结论。

2. 如何将 Y, y0 和 Y, d11 分别改为 Y, y8 和 Y, d7, 并画出相量图。