

## 第二章 同步发电机励磁控制实验

### 一、实验目的

1. 加深理解同步发电机励磁调节原理和励磁控制系统的基本任务；
2. 了解自并励励磁方式和它励励磁方式的特点；
3. 熟悉三相全控桥整流、逆变的工作波形；观察触发脉冲及其相位移动；
4. 了解微机励磁调节器的基本控制方式；
5. 了解电力系统稳定器的作用；观察强励现象及其对稳定的影响；
6. 了解几种常用励磁限制器的作用；
7. 掌握励磁调节器的基本使用方法。

### 二、原理与说明

同步发电机的励磁系统由励磁功率单元和励磁调节器两部分组成，它们和同步发电机结合在一起就构成一个闭环反馈控制系统，称为励磁控制系统。励磁控制系统的三大基本任务是：稳定电压，合理分配无功功率和提高电力系统稳定性。

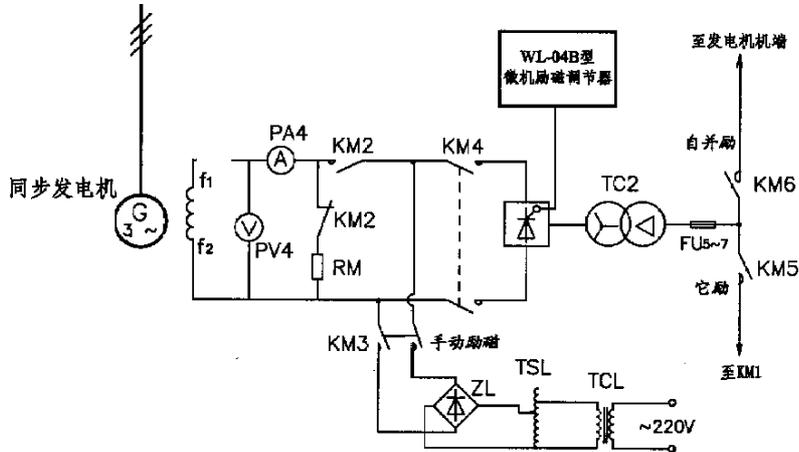


图1 励磁控制系统示意图

实验用的励磁控制系统示意图如图1所示。可供选择的励磁方式有两种：自并励和它励。当三相全控桥的交流励磁电源取自发电机机端时，构成自并励励磁系统。而当交流励磁电源取自380V市电时，构成它励励磁系统。两种励磁方式的可控整流桥均是由微机自动励磁调节器控制的，触发脉冲为双脉冲，具有最大最小 $\alpha$ 角限制。

微机励磁调节器的控制方式有四种：恒 $U_F$ （保持机端电压稳定）、恒 $I_L$ （保

持励磁电流稳定)、恒 Q (保持发电机输出无功功率稳定) 和恒  $\alpha$  (保持控制角稳定)。其中, 恒  $\alpha$  方式是一种开环控制方式, 只限于它励方式下使用。

同步发电机并入电力系统之前, 励磁调节装置能维持机端电压在给定水平。当操作励磁调节器的增减磁按钮, 可以升高或降低发电机电压; 当发电机并网运行时, 操作励磁调节器的增减磁按钮, 可以增加或减少发电机的无功输出, 其机端电压按调差特性曲线变化。

发电机正常运行时, 三相全控桥处于整流状态, 控制角  $\alpha$  小于  $90^\circ$ ; 当正常停机或事故停机时, 调节器使控制角  $\alpha$  大于  $90^\circ$ , 实现逆变灭磁。

电力系统稳定器——PSS 是提高电力系统动态稳定性能的经济有效方法之一, 已成为励磁调节器的基本配置; 励磁系统的强励, 有助于提高电力系统暂态稳定性; 励磁限制器是保障励磁系统安全可靠运行的重要环节, 常见的励磁限制器有过励限制器、欠励限制器等。

### 三、实验项目和方法

#### (一) 不同 $\alpha$ 角 (控制角) 对应的励磁电压波形观测

(1) 合上操作电源开关, 检查实验台上各开关状态: 各开关信号灯应绿灯亮、红灯熄;

(2) 励磁系统选择它励励磁方式: 操作“励磁方式开关”切到“微机它励”方式, 调节器面板“它励”指示灯亮;

(3) 励磁调节器选择恒  $\alpha$  运行方式: 操作调节器面板上的“恒  $\alpha$ ”按钮选择为恒  $\alpha$  方式, 面板上的“恒  $\alpha$ ”指示灯亮;

(4) 合上励磁开关, 合上原动机开关;

(5) 在不启动机组的状态下, 松开微机励磁调节器的灭磁按钮, 操作增磁按钮或减磁按钮即可逐渐减小或增加控制角  $\alpha$ , 从而改变三相全控桥的电压输出及其波形。

**注意:** 微机自动励磁调节器上的增减磁按钮键只持续 5 秒内有效, 过了 5 秒后如还需要调节, 则松开按钮, 重新按下。

实验时, 调节励磁电流为表 1 规定的若干值, 记下对应的  $\alpha$  角 (调节器对应的显示参数为“CC”), 同时通过接在 Ud+、Ud-之间的示波器观测全控桥输出电压波形, 并由电压波形估算出  $\alpha$  角, 另外利用数字万用表测出电压 Ufd 和  $U_{AC}$ , 将以上数据记入下表, 通过 Ufd,  $U_{AC}$  和数学公式也可计算出一个  $\alpha$  角来; 完成此表后, 比较三种途径得出的  $\alpha$  角有无不同, 分析其原因。

表 2-1

励磁电流 Ifd	0.0A	0.5A	1.5A	2.5A
----------	------	------	------	------

显示控制角 $\alpha$				
励磁电压 $U_{fd}$				
交流输入电压 $U_{AC}$				
由公式计算的 $\alpha$				
示波器读出的 $\alpha$				

(6) 调节控制角大于 90 度但小于 120 度，观察全控桥输出电压波形，与课本所画波形有何不同？为什么？

(7) 调节控制角大于 120 度，观察全控桥输出电压波形，与课本所画波形有何不同？为什么？

## (二) 同步发电机起励实验

同步发电机的起励有三种：恒  $U_F$  方式起励，恒  $\alpha$  方式起励和恒  $I_L$  方式起励。其中，除了恒  $\alpha$  方式起励只能在它励方式下有效外，其余两种方式起励都可以分别在它励和自并励两种励磁方式进行。

恒  $U_F$  方式起励，现代励磁调节器通常有“设定电压起励”和“跟踪系统电压起励”的两种起励方式。设定电压起励，是指电压设定值由运行人员手动设定，起励后的发电机电压稳定在手动设定的电压水平上；跟踪系统电压起励，是指电压设定值自动跟踪系统电压，人工不能干预，起励后的发电机电压稳定在与系统电压相同的电压水平上，有效跟踪范围为 85%~115%额定电压；“跟踪系统电压起励”方式是发电机正常发电运行默认的起励方式，而“设定电压起励”方式通常用于励磁系统的调试试验。

恒  $I_L$  方式起励，也是一种用于试验的起励方式，其设定值由程序自动设定，人工不能干预，起励后的发电机电压一般为 20%额定电压左右；恒  $\alpha$  方式起励只适用于它励励磁方式，可以做到从零电压或残压开始由人工调节逐渐增加励磁，完成起励建压任务。

### 1. 恒 $U_F$ 方式起励步骤

- (1) 将“励磁方式开关”切到“微机自励”方式，投入“励磁开关”；
- (2) 按下“恒  $U_F$ ”按钮选择恒  $U_F$  控制方式，此时恒  $U_F$  指示灯亮；
- (3) 将调节器操作面板上的“灭磁”按钮按下，此时灭磁指示灯亮，表示处于灭磁位置；
- (4) 启动机组；
- (5) 当转速接近额定时，(频率  $\geq 47\text{Hz}$ )，将“灭磁”按钮松开，发电机起励建压。注意观察在起励时励磁电流和励磁电压的变化(看励磁电流表和电压表)。录波，观察起励曲线，测定起励时间，上升速度，超调，振荡次数，稳定时间等指标，记录起励后的稳态电压和系统电压。

上述的这种起励方式是通过手动解除“灭磁”状态完成的，实际上还可以让

发电机自动完成起励，其操作步骤如下：

- (1) 将“励磁方式开关”切到“微机自励”方式，投入“励磁开关”；
- (2) 按下“恒  $U_F$ ”按钮选择恒  $U_F$  控制方式，此时恒  $U_F$  指示灯亮；
- (3) 使调节器操作面板上的“灭磁”按钮为弹起松开状态（注意，此时灭磁指示灯仍然是亮的）；
- (4) 启动机组；
- (5) 注意观察，当发电机转速接近额定时（频率 $\geq 47\text{Hz}$ ），灭磁灯自动熄灭，机组自动起励建压，整个起励过程由机组转速控制，无需人工干预，这就是发电厂机组的正常起励方式。同理，发电机停机时，也可由转速控制逆变灭磁。

改变系统电压，重复起励（无需停机、开机，只需灭磁、解除灭磁），观察记录发电机电压的跟踪精度和有效跟踪范围以及在有效跟踪范围外起励的稳定电压。

按下灭磁按钮并断开励磁开关，将“励磁方式开关”改切到“微机它励”位置，恢复投入“励磁开关”（**注意：若改换励磁方式时，必须首先按下灭磁按钮并断开励磁开关！否则将可能引起转子过电压，危及励磁系统安全。**）本励磁调节器将它励恒  $U_F$  运行方式下的起励模式设计成“设定电压起励”方式（这里只是为了试验方便，实际励磁调节器不论何种励磁方式均可有两种恒  $U_F$  起励方式），起励前允许运行人员手动借助增减磁按钮设定电压给定值，选择范围为  $0\sim 110\%$  额定电压。用灭磁和解除灭磁的方法，重复进行不同设定值的起励试验，观察起励过程，记录设定值和起励后的稳定值。

## 2. 恒 $I_L$ 方式起励步骤

- (1) 将“励磁方式开关”切到“微机自励”方式或者“微机它励”方式，投入“励磁开关”；
- (2) 按下“恒  $I_L$ ”按钮选择恒  $I_L$  控制方式，此时恒  $I_L$  指示灯亮；
- (3) 将调节器操作面板上的“灭磁”按钮按下，此时灭磁指示灯亮，表示处于灭磁位置；
- (4) 启动机组；
- (5) 当转速接近额定时（频率 $\geq 47\text{Hz}$ ），将“灭磁”按钮松开，发电机自动起励建压，记录起励后的稳定电压。起励完成后，操作增减磁按钮可以自由调整发电机电压。

## 3. 恒 $\alpha$ 方式起励步骤

- (1) 将“励磁方式开关”切到“微机它励”方式，投入“励磁开关”；
- (2) 按下恒  $\alpha$  按钮选择恒  $\alpha$  控制方式，此时恒  $\alpha$  指示灯亮；
- (3) 将调节器操作面板上的“灭磁”按钮按下，此时灭磁指示灯亮，表示

处于灭磁位置；

(4) 启动机组；

(5) 当转速接近额定时（频率 $\geq 47\text{Hz}$ ），将“灭磁”按钮松开，然后手动增磁，直到发电机起励建压；

(6) 注意比较恒 $\alpha$ 方式起励与前两种起励方式有何不同。

### (三) 控制方式及其相互切换

本型微机励磁调节器具有恒 $U_F$ ，恒 $I_L$ ，恒 $Q$ ，恒 $\alpha$ 等四种控制方式，分别具有各自特点，请通过以下试验自行体会和总结。

#### 1. 恒 $U_F$ 方式

选择它励恒 $U_F$ 方式，开机建压不并网，改变机组转速 $45\text{Hz}\sim 55\text{Hz}$ ，记录频率与发电机电压、励磁电流、控制角 $\alpha$ 的关系数据；

表 2-2

发电机频率	发电机电压	励磁电流	励磁电压	控制角 $\alpha$
45Hz				
46Hz				
47Hz				
48Hz				
49Hz				
50Hz				
51Hz				
52Hz				
53Hz				
54Hz				
55Hz				

#### 2. 恒 $I_L$ 方式

选择它励恒 $I_L$ 方式，开机建压不并网，改变机组转速 $45\text{Hz}\sim 55\text{Hz}$ ，记录频率与发电机电压、励磁电流、控制角 $\alpha$ 的关系数据；

表 2-3

发电机频率	发电机电压	励磁电流	励磁电压	控制角 $\alpha$
45Hz				
46Hz				
47Hz				
48Hz				

49Hz				
50Hz				
51Hz				
52Hz				
53Hz				
54Hz				
55Hz				

### 3. 恒 $\alpha$ 方式

选择它励恒  $\alpha$  方式，开机建压不并网，改变机组转速 45HZ~55HZ，记录频率与发电机电压、励磁电流、控制角  $\alpha$  的关系数据；

**表 2-4**

发电机频率	发电机电压	励磁电流	励磁电压	控制角 $\alpha$
45Hz				
46Hz				
47Hz				
48Hz				
49Hz				
50Hz				
51Hz				
52Hz				
53Hz				
54Hz				
55Hz				

### 4. 恒 Q 方式

选择它励恒  $U_F$  方式，开机建压，并网后选择恒 Q 方式（并网前恒 Q 方式非法，调节器拒绝接受恒 Q 命令），带一定的有功、无功负荷后，记录下系统电压为 380V 时发电机的初始状态，注意方式切换时，要在此状态下进行。改变系统电压，记录系统电压与发电机电压、励磁电流、控制角  $\alpha$ ，无功功率的关系数据；

**表 2-5**

系统电压	发电机电压	发电机电流	励磁电流	控制角 $\alpha$	有功功率	无功功率
380V						
370V						
360V						
350V						

390V						
400V						
410V						

将系统电压恢复到 380V，励磁调节器控制方式选择为恒  $U_F$  方式，改变系统电压，记录系统电压与发电机电压、励磁电流、控制角  $\alpha$ ，无功功率的关系数据；

**表 2-6**

系统电压	发电机电压	发电机电流	励磁电流	控制角 $\alpha$	有功功率	无功功率
380V						
370V						
360V						
350V						
390V						
400V						
410V						

将系统电压恢复到 380V，励磁调节器控制方式选择为恒  $I_L$  方式，改变系统电压，记录系统电压与发电机电压、励磁电流、控制角  $\alpha$ ，无功功率的关系数据；

**表 2-7**

系统电压	发电机电压	发电机电流	励磁电流	控制角 $\alpha$	有功功率	无功功率
380V						
370V						
360V						
350V						
390V						
400V						
410V						

将系统电压恢复到 380V，励磁调节器控制方式选择为恒  $\alpha$  方式，改变系统电压，记录系统电压与发电机电压、励磁电流、控制角  $\alpha$ ，无功功率的关系数据；

**表 2-8**

系统电压	发电机电压	发电机电流	励磁电流	控制角 $\alpha$	有功功率	无功功率
380V						
370V						
360V						

350V						
390V						
400V						
410V						

**注意：**四种控制方式相互切换时，切换前后运行工作点应重合。

## 5. 负荷调节

调节调速器的增速减速按钮，可以调节发电机输出有功功率，调节励磁调节器的增磁减磁按钮，可以调节发电机输出无功功率。由于输电线路比较长，当有功功率增到额定值时，功角较大（与电厂机组相比），必要时投入双回线；当无功功率到额定值时，线路两端电压降落较大，但由于发电机电压具有上限限制，所以需要降低系统电压来使无功功率上升，必要时投入双回线。记录发电机额定运行时的励磁电流，励磁电压和控制角。

将有功、无功减到零值作空载运行，记录发电机空载运行时的励磁电流，励磁电压和控制角。了解额定控制角和空载控制角的大致度数，了解空载励磁电流与额定励磁电流的大致比值。

**表 2-9**

发电机状态	励磁电流	励磁电压	控制角 $\alpha$
空载			
半负载			
额定负载			

### （四）逆变灭磁和跳灭磁开关灭磁实验

灭磁是励磁系统保护不可或缺的部分。由于发电机转子是一个大电感，当正常或故障停机时，转子中贮存的能量必须泄放，该能量泄放的过程就是灭磁过程。灭磁只能在空载下进行（发电机并网状态灭磁将会导致失去同步，造成转子异步运行，感应过电压，危及转子绝缘）。三相全控桥当触发控制角大于  $90^\circ$  时，将工作在逆变状态下。本实验的逆变灭磁就是利用全控桥的这个特点来完成的。

#### 1. 逆变灭磁步骤：

（1）选择“微机自励”励磁方式或者“微机它励”方式，励磁控制方式采用“恒  $U_F$ ”；

（2）启动机组，投入励磁并起励建压，增磁，使同步发电机进入空载额定运行；

（3）按下“灭磁”按钮，灭磁指示灯亮，发电机执行逆变灭磁命令，注意观察励磁电流表和励磁电压表的变化以及励磁电压波形的变化。

#### 2. 跳灭磁开关灭磁实验步骤：

（1）选择微机自并励励磁方式或者“微机它励”方式，励磁控制方式采用

恒  $U_F$ ;

(2) 启动机组，投入励磁并起励建压，同步发电机进入空载稳定运行；

(3) 直接按下“励磁开关”绿色按钮跳开励磁开关，注意观察励磁电流表和励磁电压表的变化。

以上试验也可在它励励磁方式下进行。

### (五) 伏赫限制实验

单元接线的大型同步发电机解列运行时，其机端电压有可能升得较高，而其频率有可能降得较低。如果其机端电压  $U_F$  与频率  $f$  的比值  $B=U_F/f$  过高，则同步发电机及其主变压器的铁芯就会饱和，使空载激磁电流加大，造成发电机和主变过热。因此有必要对  $U_F/f$  加以限制。伏赫限制器工作原理就是：根据整定的最大允许伏赫比  $B_{max}$  和当前频率，计算出当前允许的最高电压  $U_{Fh}=B_{max}*f$ ，将其与电压给定值  $U_g$  比较，取二者中较小值作为计算电压偏差的基准  $U_b$ ，由此调节的结果必然是发电机电压  $U_F \leq U_{Fh}$ 。伏赫限制器在解列运行时投入，并网后退出。

#### 实验步骤：

(1) 选择“微机自励”励磁方式或者“微机它励”方式，励磁控制方式采用“恒  $U_F$ ”；

(2) 启动机组，投入励磁起励建压，发电机稳定运行在空载额定以上；

(3) 调节原动机减速按钮，使机组从额定转速下降，从 50Hz~44Hz；

(4) 每间隔 1Hz 记录发电机电压随频率变化的关系数据；

(5) 根据试验数据描出电压与频率的关系曲线，并计算设定的  $B_{max}$  值（用限制动作后的数据计算，伏赫限制指示灯亮表示伏赫限制动作）。做本实验时先增磁到一个比较高的机端电压后再慢慢减速。

表 2-10

发电机频率 $f$	50Hz	49 Hz	48 Hz	47 Hz	46 Hz	45 Hz	44 Hz
机端电压 $U_F$							

### (六) 同步发电机强励实验

强励是励磁控制系统基本功能之一，当电力系统由于某种原因出现短时低压时，励磁系统应以足够快的速度提供足够高的励磁电流顶值，借以提高电力系统暂态稳定性和改善电力系统运行条件。在并网时，模拟单相接地和两相间短路故障可以观察强励过程。

**实验步骤:**

- (1) 选择“微机自励”励磁方式，励磁控制方式采用“恒  $U_F$ ”；
- (2) 启动机组，满足条件后并网；
- (3) 在发电机有功和无功输出为 50% 额定负载时，进行单相接地和两相间短路实验，注意观察发电机端电压和励磁电流、励磁电压的变化情况；观察强励时的励磁电压波形；

**表 2-11**

方式 类型 电 流 值	自 励		它 励	
	单相接地短路	两相间短路	单相接地短路	两相间短路
励磁电流最大值				
发电机电流最大值				

- (4) 采用它励励磁方式，重复 (1) ~ (2)，并完成后面的思考题。

**(七) 欠励限制实验**

欠励限制器的作用是用来防止发电机因励磁电流过度减小而引起失步或因机组过度进相引起定子端部过热。欠励限制器的任务是：确保机组在并网运行时，将发电机的功率运行点(P、Q)限制在欠励限制曲线上方。

欠励限制器的工作原理：根据给定的欠励限制方程和当前有功功率 P 计算出对应的无功功率下限： $Q_{\min}=aP+b$ 。将  $Q_{\min}$  与当前 Q 比较，若： $Q_{\min}<Q$ ，欠励限制器不动作； $Q_{\min}>Q$ ，欠励限制器动作，自动增加无功输出，使  $Q_{\min}<Q$ 。

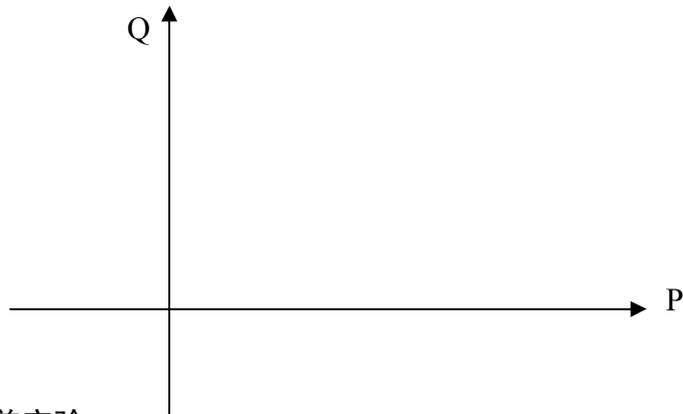
**实验步骤:**

- (1) 选择“微机自励”励磁方式或者“微机它励”方式，励磁控制方式采用“恒  $U_F$ ”；
- (2) 启动机组，投入励磁；
- (3) 满足条件后并网；
- (4) 调节有功功率输出分别为 0，50%，100% 的额定负载，用减小励磁电流(按“减磁”按钮)或升高系统电压的方法使发电机进相运行，直到欠励限制器动作(欠励限制指示灯亮)，记下此时的有功 P 和无功 Q；
- (5) 根据试验数据作出欠励限制线  $P=f(Q)$ ，并计算出该直线的斜率和截距；如果减磁到失步时还不能使欠励限制动作时可以用提高系统电压来实现。

**表 2-12**

发电机有功功率 P	欠励限制动作时的 Q 值
零功率	
50% 额定有功	

100%额定有功	
----------	--



### (八) 调差实验

#### 1. 调差系数的测定

在微机励磁调节器中使用的调差公式为（按标么值计算） $U_B = U_g \pm KQ * Q$ ，它是将无功功率的一部分叠加到电压给定值上（模拟式励磁调节器通常是将无功电流的一部分叠加在电压测量值上，效果等同）。

#### 实验步骤：

(1) 选择“微机自励”励磁方式或者“微机它励”方式，励磁控制方式采用“恒  $U_F$ ”；

(2) 启动机组，投入励磁；

(3) 满足条件后并网，稳定运行；

(4) 用降低系统电压的方法以增加发电机无功输出，记录一系列  $U_F$ 、 $Q$  数据；

(5) 作出调节特性曲线，并计算出调差系数；

**表 2-13**

	发电机机端电压 $U_F$	发电机无功输出 $Q$
1		
2		
3		
4		
5		

#### 2. 零调差实验

设置调差系数=0，实验步骤同 1。

用降低系统电压的方法以增加发电机无功输出，记录一系列  $U_F$ 、 $Q$  数据，作出调节特性曲线。



### 3. 正调差实验

设置调差系数=4%，实验步骤同 1。

用降低系统电压的方法以增加发电机无功输出，记录一系列  $U_F$ 、 $Q$  数据，作出调节特性曲线。

### 4. 负调差实验

设置调差系数=-4%，实验步骤同 1。

用降低系统电压的方法以增加发电机无功输出，记录一系列  $U_F$ 、 $Q$  数据，作出调节特性曲线。

表 2-14

K=0		K=+4%		K=-4%	
$U_F$	Q	$U_F$	Q	$U_F$	Q

### (九) 过励磁限制实验

发电机励磁电流超过额定励磁电流 1.1 倍称为过励。励磁电流在 1.1 倍以下允许长期运行，1.1~2.0 之间按反时限原则延时动作，限制励磁电流到 1.1 倍以上，2.0 倍以下，瞬时动作限制励磁电流在 2.0 倍以上。过励限制指示灯在过励限制动作时亮。

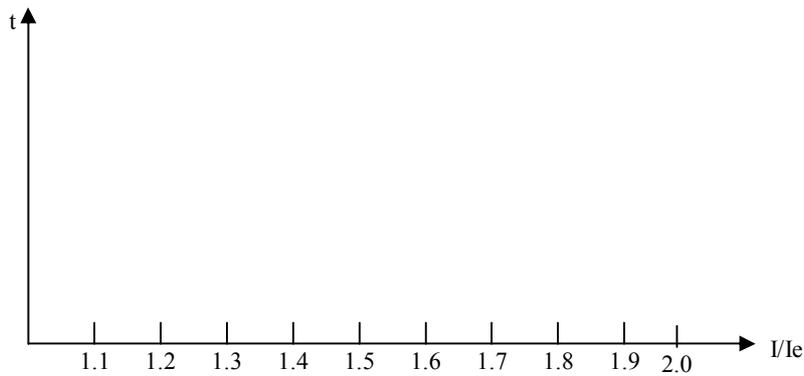
#### 实验步骤：

(1) 选择“微机自励”励磁方式或者“微机它励”方式，励磁控制方式采用“恒  $U_F$ ”；

(2) 启动机组，投入励磁；

(3) 用降低额定励磁电流定值的方法模拟励磁电流过励（注：无法使励磁电流真正过励，你有办法吗？），此时限制器将按反时限特性延时动作，记录励磁电流值和延时时间，观察过励限制器动作过程；

(4) 描出励磁限制特性曲线， $t = f\left(\frac{I}{I_e}\right)$ ；



(5) 做本实验时需要改变过流整定值。

表 2-15

额定电流整定值  $I_e = \underline{\hspace{2cm}}$

励磁电流实际值 I	过励倍数( $I/I_e$ )	延时时间(t)

### (十) PSS 实验

PSS（电力系统稳定器）的主要作用是抑制系统的低频振荡。它的投入对提高电力系统的动态稳定性有非常重要的意义。

#### 实验步骤：

- (1) 选择“微机自励”励磁方式或者“微机它励”方式，励磁控制方式采用“恒 UF”；
- (2) 启动机组，投入励磁；
- (3) 满足条件后并网，稳定运行；
- (4) 在不投入 PSS 的条件下，增加发电机有功输出，直到系统开始振荡，

记下此时的机端电压、有功输出和功角（由调速器的显示器读数）；

（5）在投入 PSS 的条件下，增加发电机有功输出，直到系统开始振荡，记下此时的机端电压、有功输出和功角；

（6）比较 PSS 投和不投两种情况下的功率极限和功角极限有何不同。

**表 2-16**

	单回输电线		双回输电线	
	PSS 投	PSS 不投	PSS 投	PSS 不投
机端电压 $U_F$				
发电机有功 $P$				
功角 $\delta$				

### （十一）停机灭磁

发电机解列后，直接控制调速器停机，励磁调节器在转速下降到 43HZ 以下时自动进行逆变灭磁。待机组停稳，断开原动机开关，跳开励磁和线路等开关，切除操作电源总开关。

## 四、实验报告要求

1. 分析比较各种励磁方式和各种控制方式对电力系统安全运行的影响；
2. 比较各项的实验数据，分析其产生的原因。
3. 分析励磁调节器、空载实验的各项测试结果。
4. 分析励磁调节器、负载实验的各项测试结果。

## 五、思考题

1. 三相可控桥对触发脉冲有什么要求？
2. 为什么在恒  $\alpha$  方式下，必须手动“增磁”才能起励建压？
3. 比较恒  $U_F$  方式起励、恒  $I_L$  方式起励和恒  $\alpha$  方式起励有何不同？
4. 逆变灭磁与跳励磁开关灭磁主要有什么区别？
5. 为什么在并网时不需要伏赫限制？
6. 比较在它励方式下强励与在自并励下强励有什么区别？
7. 比较在它励方式下逆变灭磁与在自并励下逆变灭磁有什么差别？
8. 比较单回线路和双回线路有功功率与功角的关系有何变化，线路电压降落与无功功率的关系有何不同？
9. 比较四种运行方式：恒  $U_F$ 、恒  $I_L$ 、恒  $Q$  和恒  $\alpha$  的特点，说说他们各适合在何种场合应用？对电力系统运行而言，哪一种运行方式最好？试就电压质量，

无功负荷平衡，电力系统稳定等方面进行比较。