

四、操作方法与实验步骤

①同步发电机起励

同步发电机的起励有三种：恒 U_F 方式起励，恒 α 方式起励和恒 I_L 方式起励。其中，除了恒 α 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下进行。

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 α 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；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；
- (3) 启动机组；
- (4) 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)。观察起励时间，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 20(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 0~110% 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) 当转速接近额定值(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 α 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 α 按钮选择恒 α 控制方式，此时恒 α 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) 当转速接近额定值(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 α 方式起励与前两种起励方式有何不同。

②“控制方式及其相互切换”实验

1.改变机组转速

(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 α 的关系数据。

(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 α 的关系数据。

2.改变系统电压

(1) 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 α ，无功功率的关系数据。

(2) 恒 U_F 方式

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 α ，无功功率的关系数据。

(3) 恒 α 方式

将系统电压恢复到 380V ，励磁调节器控制方式选择为恒 α 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 α ，无功功率的关系数据。

③实验结束后停机灭磁

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。

五、实验数据记录和处理

1.改变机组转速

(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、控制角的关系数据如图 1.2 所示。

发电机频率 (Hz)	发电机电压 (V)	励磁电流 (A)	励磁电压 (V)	控制角 α
46	379.4	2.27	51.3	87.8
48	379.4	2.05	46.6	90.6
50	380.0	1.81	41.3	93.9
52	379.4	1.65	38.8	95.4
54	380.0	1.53	36.4	97.2

图 1.2 恒 U_F 方式改变机组转速的电磁关系数据

观察这几个关键参数的变化趋势可知,随着频率的增加,发电机电压保持相对稳定,略有波动,但整体变化不大;励磁电流和励磁电压随着频率的增加逐渐减小;控制角 α 逐渐增大。

(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 45Hz~55Hz,记录频率与发电机电压、励磁电流、控制角 α 的关系数据如图 1.3 所示

发电机频率 (Hz)	发电机电压 (V)	励磁电流 (A)	励磁电压 (V)	控制角 α
46	350.1	1.87	44.4	91.6
48	364.8	1.87	44.6	91.5
50	380.5	1.87	44.6	91.3
52	396.3	1.88	44.8	91.2
54	412.1	1.87	44.8	91.4

图 1.3 恒 I_L 方式改变机组转速的电磁关系数据

观察这几个关键参数的变化趋势可知,随着频率的增加,励磁电流保持相对稳定,略有波动;电压随着频率的增加而增加;励磁电流、励磁电压和控制角 α 保持相对稳定,略有波动,但整体变化不大。

2. 改变系统电压

实验中线路工况如图 2.1 所示。

线路开关	QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6
开关状态	分	合	分	合	分	合

图 2.1 线路工况

(1) 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 α ,无功功率的关系数据如图 2.2 所示。

系统电压 (V)	发电机电压 (V)	发电机电流 (A)	励磁电流 (A)	控制角 α	有功功率 (W)	无功功率 (VA)
360	365.9	0.784	1.77	92.7	471	-68
370	373.3	0.767	1.88	92.4	468	-66
380	385.8	0.729	1.97	90.2	458	-70
390	396.3	0.613	2.13	87.8	394	-79
400	408.6	0.579	2.31	84.8	367	-72

图 2.2 恒 Q 方式改变系统电压的电磁关系数据

观察这几个关键参数的变化趋势可知,随着系统电压的增加,发电机电压升高且略高于系统电压,此时发电机正在向系统供电;发电机电流减少;励磁电流增加;控制角减小;有功功率减少;无功功率保持相对稳定,且为负值,说明此时发电机正在从系统中吸收无功功率。

(2) 恒 U_F 方式 (并网)

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 α ,无功功率的关系数据如图 2.3 所示。

系统电压 (V)	发电机电压 (V)	发电机电流 (A)	励磁电流 (A)	控制角 α	有功功率 (W)	无功功率 (VA)
360	382.9	1.172	1.98	90	515	13
370	384.3	1.103	1.97	90.2	513	-41
380	385.8	1.084	1.96	90.3	510	-77
390	386.1	0.797	1.95	90.7	508	-161
400	386.4	0.838	1.91	91.1	467	-237

图 2.3 恒 U_F 方式改变系统电压的电磁关系数据

观察这几个关键参数的变化趋势可知,随着系统电压的增加,发电机电压略有升高但仍保持 380V 左右相对稳定,系统电压不大于 380V 时,发电机电压高于系统电压,此时发电机正在向系统供电;系统电压小于 380V 时,发电机电压低于系统电压,此时发电机从系统中获取电能;发电机电流减少;励磁电流基本不变;控制角增大;有功功率减少;无功功率减小并有正转负,即系统电压较小时发电机先向系统注入功率,随着系统电压的增加,发电机从系统中吸收无功功率,表明无功功率的需求增加。

(3) 恒 α 方式 (并网)

将系统电压恢复到 380V,励磁调节器控制方式选择为恒 α 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 α ,无功功率的关系数据如图 2.4 所示。

系统电压 (V)	发电机电压 (V)	发电机电流 (A)	励磁电流 (A)	控制角 α	有功功率 (W)	无功功率 (VA)
360	382.9	1.084	2.00	90.2	506	29
370	383.5	1.076	1.98	90.2	504	-18
380	385.8	1.063	2.01	90.2	503	-79
390	388.1	0.784	1.98	90.2	458	-143
400	389.3	0.773	2.01	90.2	449	-161

图 2.4 恒 α 方式改变系统电压的电磁关系数据

观察这几个关键参数的变化趋势可知,随着系统电压的增加,发电机电压略有升高但仍保持 380V 左右相对稳定,系统电压不大于 380V 时,发电机电压高于系统电压,此时发电机正在向系统供电;系统电压小于 380V 时,发电机电压低于系统电压,此时发电机从系统中获取电能;发电机电流减少;励磁电流基本不变;控制角恒定;有功功率减少;无功功率减小并有正转负,即系统电压较小时发电机先向系统注入功率,随着系统电压的增加,发电机从系统中吸收无功功率,表明无功功率的需求增加。

六、分析与思考

1、三相可控桥对触发脉冲有什么要求?

六个晶闸管的触发脉冲按顺序依次相差 60° ；器件换相只在本组内进行，每隔 120° 换相一次。共阴极组的脉冲依次差 120° ，共阳极组也依次相差 120° ；同一相的上下两个桥臂触发脉冲相位相差 180° 。

2、为什么在恒 α 方式下，必须手动“增磁”才能起励建压？

因为恒 α 方式是一种开环控制方式，没有闭环反馈，只限于他励方式下使用。所以它不能自动跟踪系统起励，而需要手动“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 α 方式起励有什么不同？

恒 U_F 方式：保持机端电压稳定；恒 I_L 方式：保持励磁电流稳定；恒 α 方式：保持控制角稳定。其中，恒 α 方式是一种开环控制方式，只限于他励方式下使用，而其他两种方式在他励和自励方式下都可使用。

4、逆变灭磁与跳励磁开关灭磁主要有什么区别？

若发电机利用全控桥进行逆变灭磁，必须使最小逆变角大于换流角及晶闸管关断角之和；跳励磁开关是由相应的继保装置检测到某种值超过负荷整定值范围时，迅速关断。

5、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？

它励是指直流发电机作为励磁机，向交流发电机提供励磁电流，它励下逆变灭磁是灭掉直流发电机的励磁电流，从而使直流发电机无法向交流发电机提供励磁电流。这种励磁方式一般适用于 50MW 以下机组。

自并励是交流发电机增设励磁变压器提供励磁，它直接通过可控硅整流输出到交流发电机的转子。

6、比较四种运行方式：恒 U_F 、恒 I_L 、恒 Q 和恒 α 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。

恒 U_F 运行方式：在运行过程中保持发电机端电压 U 不变。恒 I_L 运行方式：在运行过程中保持发电机端电流不变。恒 Q 运行方式：在运行过程中保持发电机端无功输出 Q 不变。恒 α 运行方式：在运行过程中保持晶闸管导通角 α 不变。

对于一些大的机组，常常使用恒 U_F 方式起励，从而提供较为稳定的电压，使得 PV 节点相对稳定。对于一些小的机组，常常使用恒 Q 方式起励，从而提供恒定的无功功率输出来提供给电路。

七、实验心得与体会

通过这次实验，我深刻体会到了理论与实践相结合的重要性。实验不仅加深了我对励磁原理和控制方式的理解，还提升了我操作励磁调节器和监控发电机参数的技能。我观察到不同励磁方式下系统响应的变化，这让我认识到精确控制励磁电流和控制角对于维持发电机稳定运行的重要性。

此外，实验过程中遇到的问题锻炼了我的问题分析和解决能力，同时也增强了我对电力设备操作安全的认识。在三人合作小组中，我也体会到了与队友沟通协调的重要性。

总体来说，这次实验让我对现代电力系统控制技术有了更深入的认识，激发了我继续学习和探索电力系统新技术的兴趣，为我未来的学习和工作打下了坚实的基础。