



**YZFDZ-I**  
**虚拟电力自动化软件**  
**说明书**

湖南依中紫光电气科技有限公司

2019年07月修订

# 目录

第 1 章 系统简介.....	3
1.1 系统主要功能.....	3
1.2 系统主要部分简介.....	3
1.3 系统运行环境.....	3
第 2 章 软件界面基本介绍.....	4
2.1 系统的启动.....	4
2.2 系统的退出.....	4
2.3 软件界面说明.....	4
第 3 章 基本操作介绍.....	6
3.1 调速装置的基本操作.....	6
3.2 励磁装置的基本操作.....	8
3.3 同期装置的基本操作.....	10
3.4 负荷调节.....	11
3.5 无穷大系统.....	12
3.6 仿真速度调节.....	13
3.7 同期波形.....	13
3.8 数据记录.....	14
第 4 章 实验内容.....	16
4.1 发电机组的启动与运转实验.....	16
4.1.1 调速装置及原动机控制.....	17
4.1.2 励磁装置及简单励磁控制.....	18
4.2 准同期并列运行.....	20
4.2.1 频差与压差的整定.....	21
4.2.1 手动准同期并网.....	24
4.2.2 半自动准同期并网.....	27
4.2.3 自动准同期并网.....	29

4.3 同步发电机励磁控制.....	32
4.3.1 同步发电机起励.....	33
4.3.2 伏赫限制实验.....	37
4.3.3 欠励限制实验.....	38
4.3.4 调差特性实验.....	42
4.3.5 过励限制实验.....	48
4.4 单机一无穷大系统稳态运行方式实验 .....	50
4.4.1 单回路稳态对称运行实验.....	51
4.4.2 双回路对称运行与单回路对称运行比较实验.....	52
4.5 电力系统功率特性和功率极限实验.....	53
4.5.1 无调节励磁时，功率特性和功率极限的测定.....	54
4.5.2 手动调节励磁时，功率特性和功率极限的测定.....	57
4.5.3 自动调节励磁时，功率特性和功率极限的测定.....	58
4.5.4 单回路、双回路输送功率与功角关系.....	58
4.5.5 提高电力系统静态稳定性.....	58

## 第1章 系统简介

本软件是一款专业的电力系统综合自动化仿真软件,是一套集多种功能于一体的综合型实验平台,目的在于使学生掌握系统运行的原理及特性,学会通过故障运行现象及相关数据分析故障原因,并排除故障。通过实验使学生能够根据实验目的,实验内容及测取的数据,进行分析研究,得出必要结论,从而完成实验报告。

### 1.1 系统主要功能

本软件展示了现代电能发出和输送全过程的工作原理,本软件有以下应用功能:调速装置的基本操作以及原动机控制、励磁装置的基本操作以及简单励磁控制、同期装置的基本操作以及同期并列、同步发电机起励实验、伏赫限制实验、欠励限制实验、同步发电机强励实验、调差特性实验、过励实验、单回路稳态对称运行实验,双回路对称运行与单回路对称运行比较实验、电力系统功率特性和功率极限测试等实验。

### 1.2 系统主要部分简介

本软件主要包括调速装置、励磁装置、同期装置、保护装置、无穷大系统、负荷设置以及相关数据的检测。

### 1.3 系统运行环境

WinXP, Vista, Win7, Win8, Win10

## 第2章 软件界面基本介绍

### 2.1 系统的启动

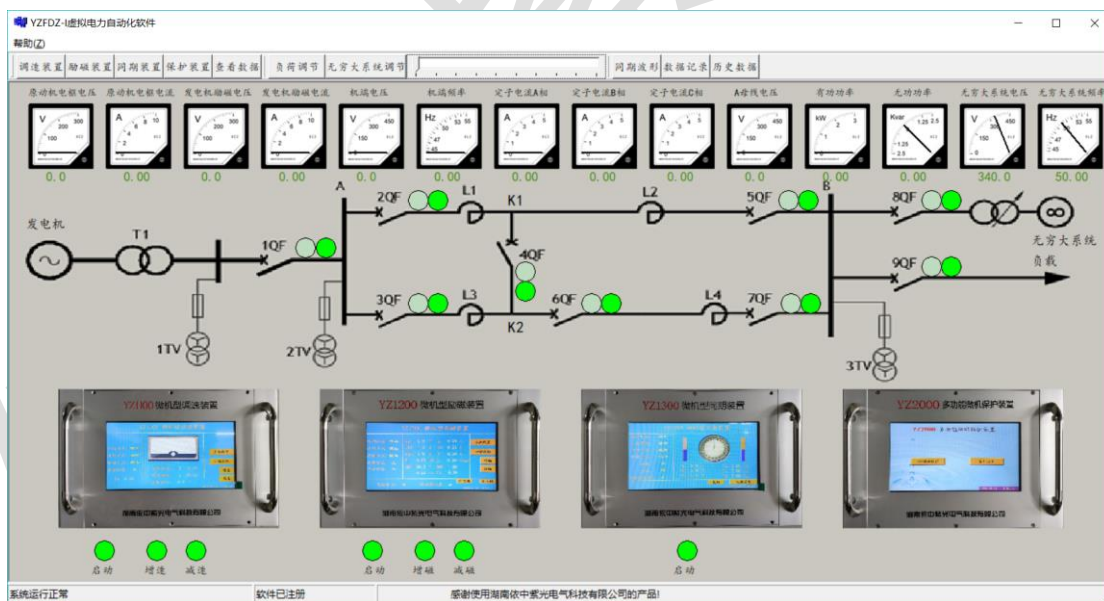
双击电力系计算软件打开后，在菜单栏中单击“软件注册>获取机器码”，将机器码记下来，发送至湖南依中电气科技有限公司，以获取注册码（一台电脑对应一个注册码）。获取注册码后，输入注册码完成注册，注册成功后，软件下方显示“软件已注册”标志，方可正常使用。

### 2.2 系统的退出

退出系统前，为避免所设置的参数丢失，可以选择保存所设置的定值参数。

### 2.3 软件界面说明

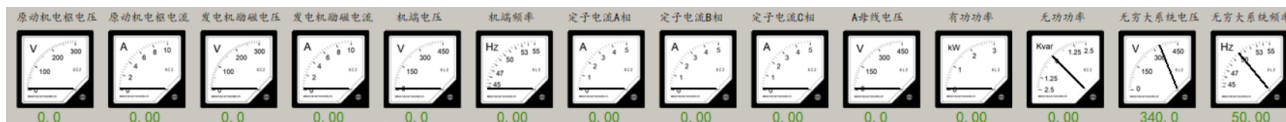
本软件打开后初始界面如下图所示：



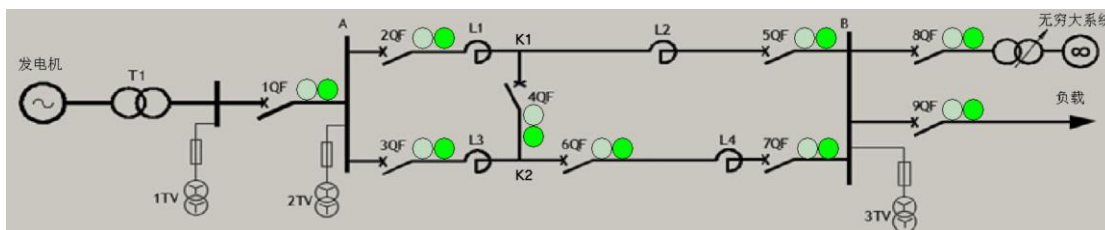
**菜单栏：**包括了调速装置界面、励磁装置界面、同期装置界面、保护装置界面、数据查看、负荷调节、无穷大系统调节，点击可以进行相关的操作。如下图所示：



**测量仪表：**菜单栏下方是基本的测量仪表，可以观察相关数据的变化。如下图所示。



**输电线路：**采用双回路输电线路，每回输电线路分两段，并设置有中间开关站，可以构成四种不同的联络阻抗线路。输电线路的具体结构如下图所示：



**调速、励磁、同期、保护装置：**最下方为调速、励磁、同期、保护装置。点击相关装置，可进入装置的相关操作。如下图所示：



### 第3章 基本操作介绍

#### 3.1 调速装置的基本操作

1. 首先点击调速装置下面的启动按钮如下图所示：



2. 点击菜单栏的调速装置或者直接点击界面中的装置，出现调速装置的基本操作界面下面的启动按钮如下图所示：



3. 点击参数设置可进行基本的参数的设置（一般不需要修改），如下图所示：

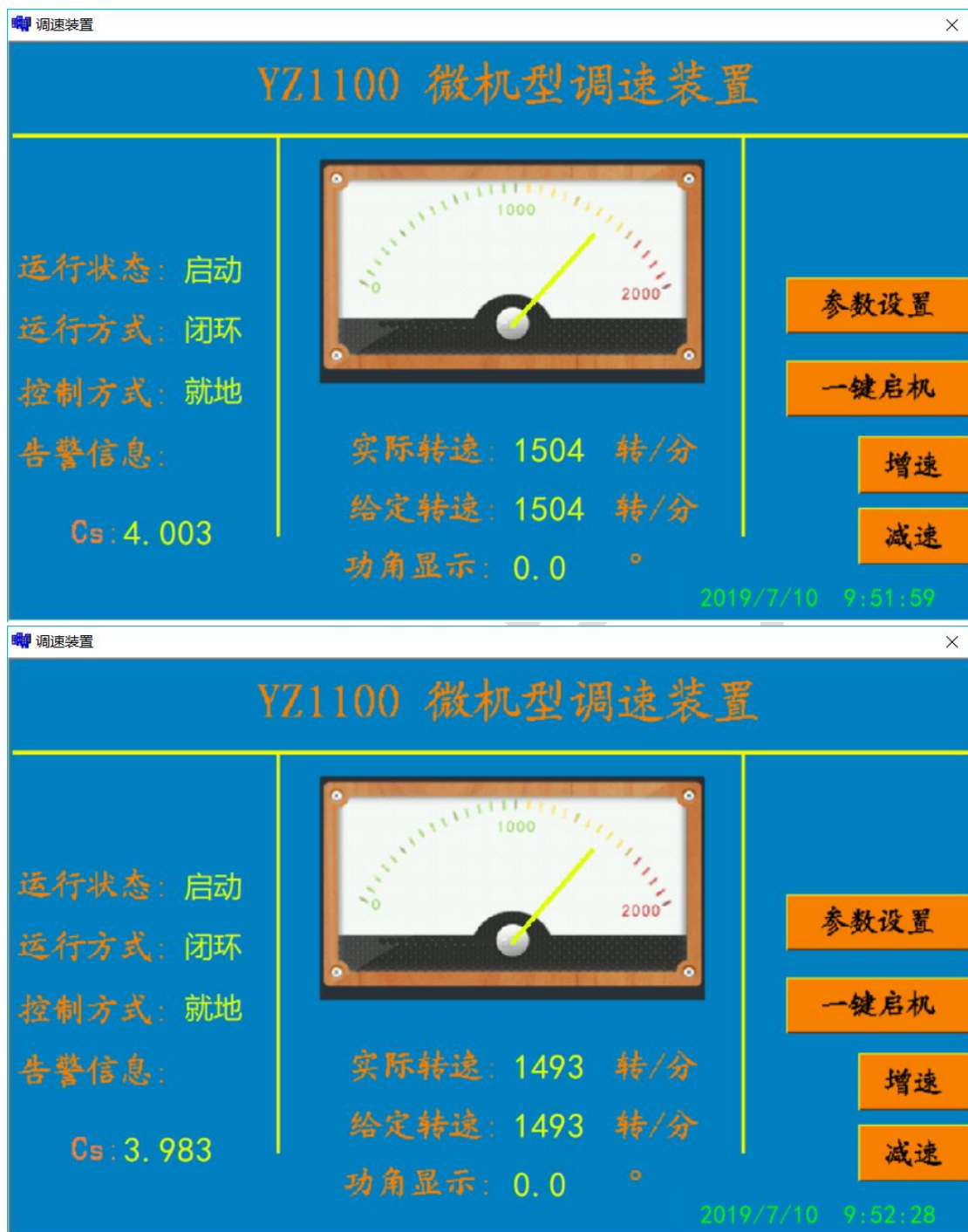


4. 点击一键启机，转速持续上升，直到额定转速 1500 转/分。如下图所示：



5. 点击界面中的增速或者减速，可对转速进行调节。如下图所示：





6.调速装置操作完毕，同步发电机，原动机启动。

### 3.2 励磁装置的基本操作

- 1.励磁装置操作，须在调速装置控制原动机启动后。
- 2.点击励磁装置下的启动按钮



3. 点击菜单栏的励磁装置或者直接点击界面中的装置，出现励磁装置的基本操作界面下面的启动按钮如下图所示：



4. 点击一键起励，发电机起励建压。

## YZ1200 微机型励磁装置

运行状态	启动	U <sub>g</sub> : 340.0 V I <sub>g</sub> : 0.00 A	<a href="#">参数设置</a>
运行方式	恒UG	U <sub>fd</sub> : 49.4 V I <sub>fd</sub> : 1.71 A	<a href="#">一键起励</a>
控制方式	就地	U <sub>gr</sub> : 340.0 V I <sub>fr</sub> : 1.52 A	<a href="#">增磁</a>
告警信息		P: 0.00 kW Q: 0.00 kVar	<a href="#">减磁</a>
保护信息		ARF: 54.9 ° COS: 0.00	
		F: 50.03 Hz C <sub>s</sub> : 2.855	

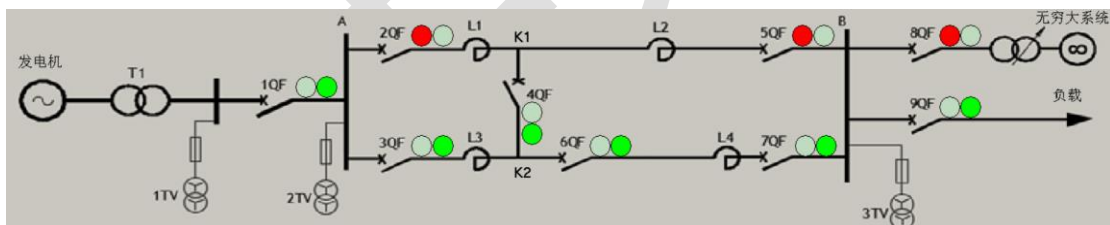
灭磁开关: 分
断路器位置: 分
合灭磁
分灭磁

2019/7/10 10:21:28

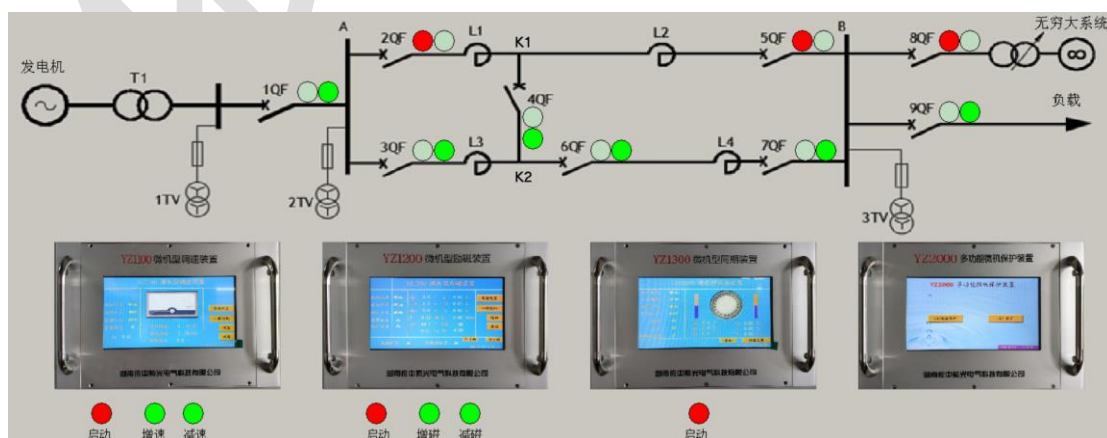
5.励磁装置操作完成。

### 3.3 同期装置的基本操作

1.在调速励磁启动后，将 2QF、5QF、8QF 合闸，如下图所示：



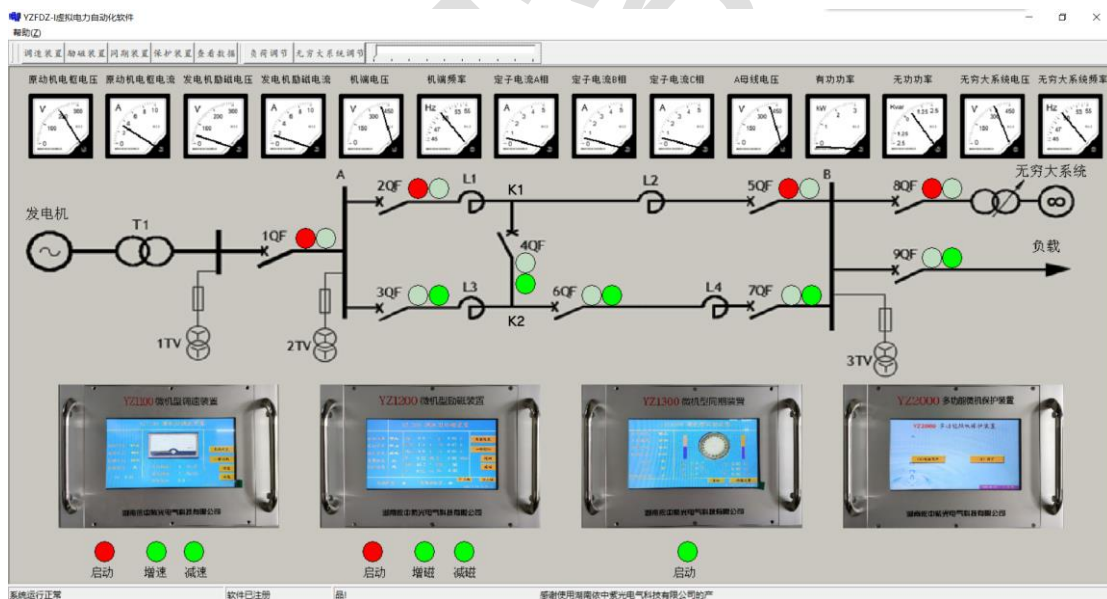
2.点击同期装置下方启动，如下图所示：



3. 点击同期装置。观察相位表以及压差棒图，如下图所示：



4. 待断路器 1QF 合闸成功后，退出同期装置，如下图所示：



5. 同期装置并网操作完成。

### 3.4 负荷调节

点击菜单栏中的负荷调节，可以设置负荷大小以及类型，将需要设置的负荷点成红色后，点击确认，代表将负荷设置成功。如下图所示

示：

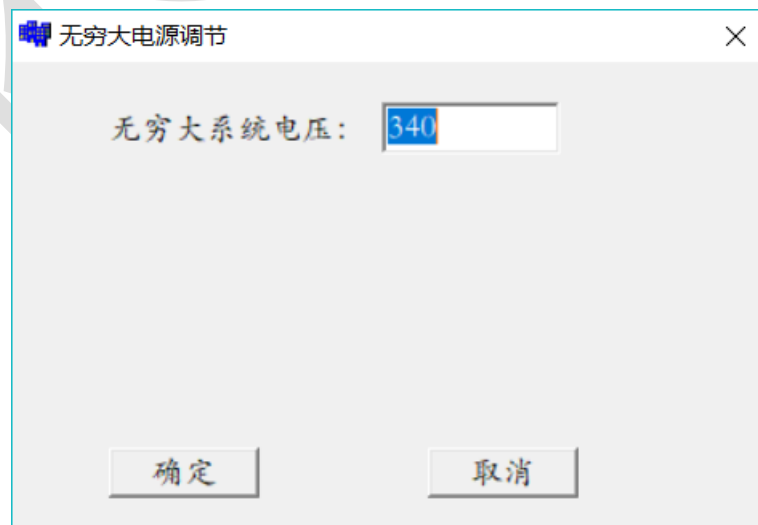


选择电阻负载 300 欧，如下图所示：



### 3.5 无穷大系统

点击菜单栏中的无穷大系统，可设置无穷大系统侧的电压，如下图所示：



### 3.6 仿真速度调节

拖动图片中的滑块可对仿真速度进行调节，从左到右对应了从快倒慢，如下图所示：

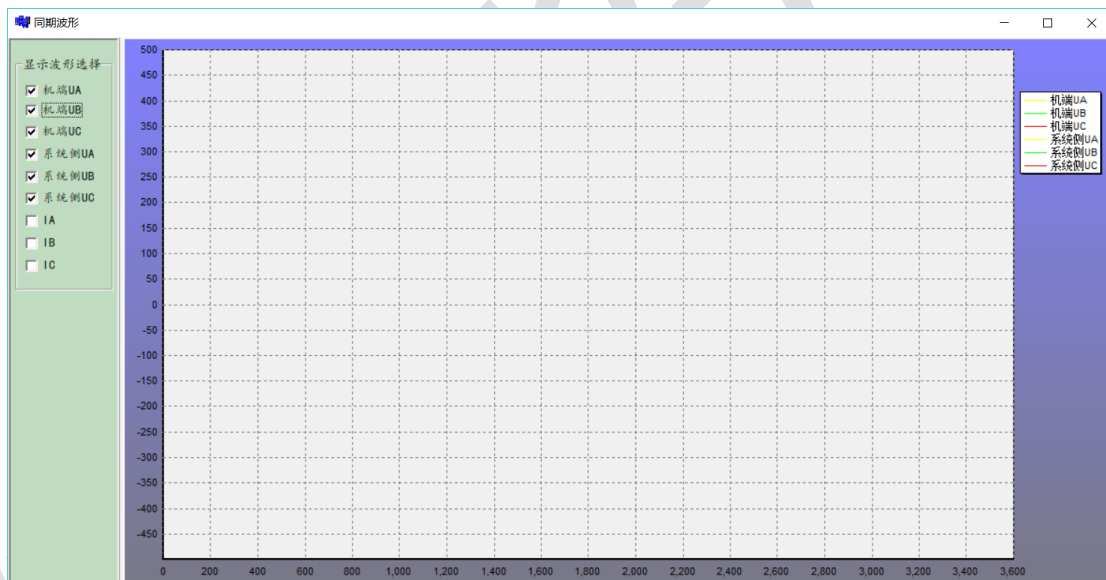


### 3.7 同期波形

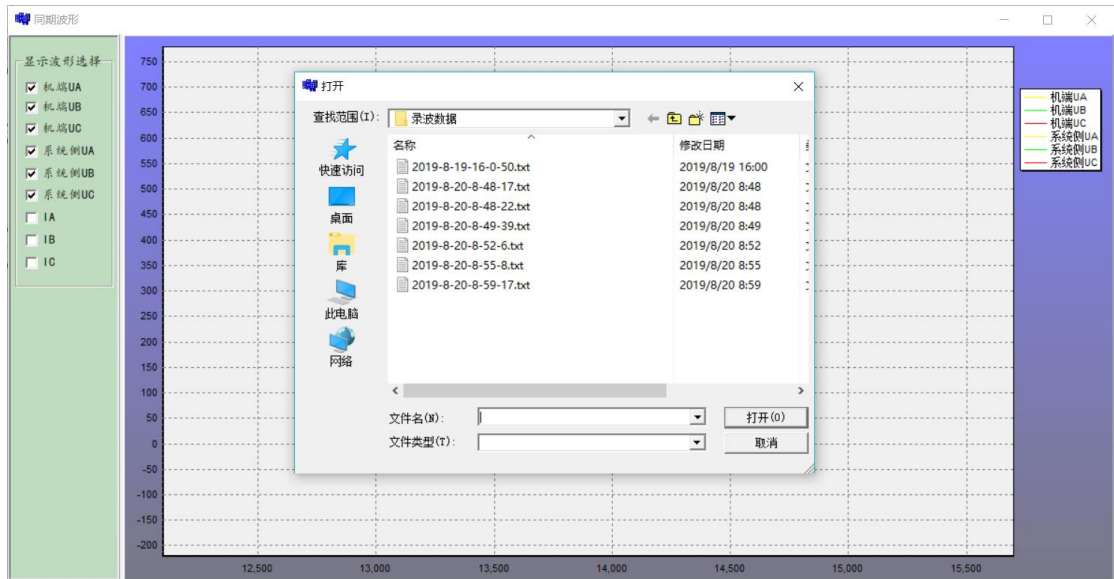
点击菜单栏中的同期波形，如下图所示：



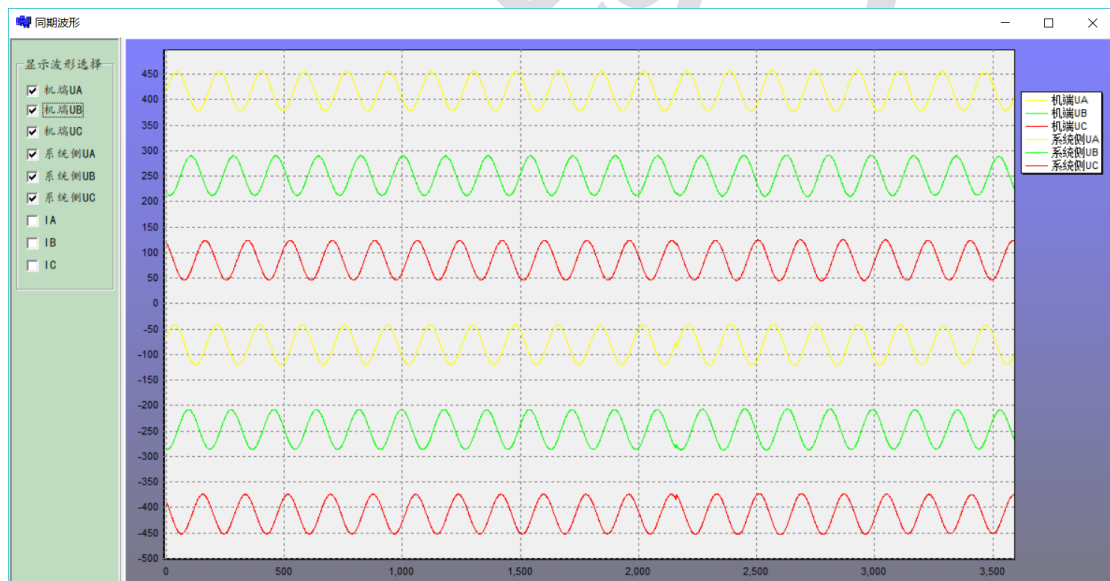
点击同期波形，进入波形显示界面，如下图所示：



右击显示界面，随后点击打开，出现录制波形的选择界面，如下图所示：



选择最新录制的.TXT 文件打开，波形将在显示界面中出现。其中线条所代表的参数可以参考右侧的波形定义，如下图所示：



右击显示界面，点击清除，可将显示的波形清除。

### 3.8 数据记录

点击菜单栏中的数据记录，可以记录当前调速、同期、励磁中的相关数据，如下图所示：



点击进入历史数据，出现历史数据记录表格，如下图所示：



点击查看数据，表格中出现调速、同期、励磁的历史记录数据，每点击一次数据记录，就会记录点击时的一条数据，如下图所示：



点击清除数据可将，表格中显示的数据清除。



## 第4章 实验内容

### 4.1 发电机组的启动与运转实验

#### 实验目的：

1. 了解微机调速装置的工作原理和掌握其操作方法。
2. 熟悉发电机组中原动机（直流电动机）的基本特性。
3. 掌握发电机组起励建压，停机的操作。

#### 原理与说明：

原动机采用直流电动机模拟工业现场的汽轮机或水轮机，调速系统用于调整原动机的转速和输出的有功功率，励磁系统用于调整发电机电压和输出的无功功率。

将同步发电机并入电力系统的合闸操作通常采用准同期并列方式。准同期并列要求在合闸前通过调整待并机组的电压和转速，当满足电压幅值和频率条件后，根据“恒定越前时间原理”，由运行操作人员手动或由准同期控制器自动选择合适时机发出合闸命令，这种并列操作的合闸冲击电流一般很小，并且机组投入电力系统后能被迅速拉入同步。根据并列操作的自动化程度不同，又分为手动准同期、半自动准同期和全自动准同期三种方式。

正弦整步电压是不同频率的两正弦电压之差，其幅值作周期性的正弦规律变化。它能反映两个待并系统间的同步情况，如频率差、相角差以及电压幅值差。线性整步电压反映的是不同频率的两方波电压间相角差的变化规律，其波形为三角波。它能反映两个待并系统间的频率差和相角差，并且不受电压幅值差的影响，因此得到广泛应用。

手动准同期并列，应在正弦整步电压的最低点（同相点）时合闸，考虑到断路器和继电器固有的合闸时间，实际发出合闸命令的时刻应提前一个相应的时间或角度。自动准同期并列，通常采用恒定越前时间原理工作，这个越前时间可按断路器的合闸时间整定。准同期控制器根据给定的允许压差和允许频差，不断地检查准同期条件是否满足，在不满足要求时闭锁合闸并且发出均压均频控制脉冲。当所有条件均满足时，在整定的越前时刻送出合闸脉冲。

同期装置一般在发电机端的电压和频率与系统侧电压和频率相差不大时投入，而在同期结束后就可退出运行。

#### 4.1.1 调速装置及原动机控制

##### 实验步骤：

1、调速装置的按钮全松开，则“运行状态”显示为“停止”，设置调速装置运行方式为闭环方式，此时“运行方式”显示为“闭环”，表盘显示“发电机转速”为零，“实际转速”也为0。具体设置方式参照调速装置基本操作。

2、按下调速装置旁的“启动”按钮，此时启动“红灯”亮，调速装置主界面“运行状态”变为“启动”。

3、通过连续按“增速”按钮，使调速装置的“给定转速”调节至1500转/分。观察调节过程中发电机组运行情况及时速装置主界面的表盘和“实际转速”。

4、通过连续按“减速”按钮，使调速装置的“给定转速”调节至0转/分。观察调节过程中发电机组运行情况及时速装置主界面的表盘和“实际转速”。

5、设置调速装置运行方式为开环方式，此时“运行方式”显示为“开环”，表盘显示“发电机转速”为零，“实际转速”也为0。重复步骤3、4。

6、按下调速装置主界面的“一键启机”按键，观察调节过程中发电机组运行情况以及调速装置主界面的表盘和“实际转速”。

## 2) 思考

- 1、开环和闭环两种运行方式有什么区别？为什么？
- 2、实际转速与给定转速为什么会有不同？

### 4.1.2 励磁装置及简单励磁控制

#### 实验步骤：

1、励磁装置的按钮全松开，则“运行状态”显示为“停止”，设置励磁装置运行方式为恒  $U_g$  方式，此时“运行方式”显示为“恒  $U_g$ ”，表盘显示“ $U_{gr}$ ”为零，“ $U_G$ ”也为0。具体设置方式参照励磁装置的基本操作。

2、按照调速装置及原动机控制实验中步骤进行，此时机组转速应为1500转/分。

3、按下励磁装置旁的“启动”按钮，此时启动“红灯”亮，励磁装置主界面“运行状态”变为“启动”。

4、通过连续和点动方式按“增磁”按钮，使励磁装置的“ $U_{gr}$ ”调节至380V。观察调节过程中发电机组运行情况、励磁装置主界面的“ $U_g$ ”以及电力系统综合自动化试验台上机端电压表。调节过程中“ $U_g$ ”和机端电压表的数值都应该是从小到大一直到380V。

5、通过连续和点动方式按“减磁”按钮，使励磁装置的“ $U_{gr}$ ”调节至 0V。观察调节过程中发电机组运行情况、励磁装置主界面的“ $U_g$ ”以及电力系统综合自动化试验台上机端电压表。此步骤结束时，励磁装置主界面所有参数都应该回到初始值。

6、设置励磁装置运行方式为恒 IL 方式，此时“运行方式”显示为“恒 IL”，电力系统综合自动化试验台上机端电压表和，励磁装置主界面的“ $U_g$ ”均为 0。重复步骤 4、5。

7、按下励磁装置主界面的“一键起励”按键，观察调节过程中发电机组运行情况、励磁装置主界面的“ $U_g$ ”以及电力系统综合自动化试验台上机端电压表。

8、重复步骤 5，当“ $U_g$ ”为 0 后，按“启动”按钮，“启动”亮绿灯。

9、通过连续和点动方式按“减速”按钮，使调速装置的“给定转速”调节至 0 转/分。

10、当“给定转速”为 0 后，按调速“启动”按钮，“启动”按钮亮绿灯。

## 4.2 准同期并列运行

### 原理与说明:

将同步发电机并入电力系统的合闸操作通常采用准同期并列方式。准同期并列要求在合闸前通过调整待并机组的电压和转速，当满足电压幅值和频率条件后，根据“恒定越前时间原理”，由运行操作人员手动或由准同期控制器自动选择合适时机发出合闸命令，这种并列操作的合闸冲击电流一般很小，并且机组投入电力系统后能被迅速拉入同步。根据并列操作的自动化程度不同，又分为手动准同期、半自动准同期和全自动准同期三种方式。

正弦整步电压是不同频率的两正弦电压之差，其幅值作周期性的正弦规律变化。它能反映两个待并系统间的同步情况，如频率差、相角差以及电压幅值差。线性整步电压反映的是不同频率的两方波电压间相角差的变化规律，其波形为三角波。它能反映两个待并系统间的频率差和相角差，并且不受电压幅值差的影响，因此得到广泛应用。

手动准同期并列，应在正弦整步电压的最低点（同相点）时合闸，考虑到断路器和继电器固有的合闸时间，实际发出合闸命令的时刻应提前一个相应的时间或角度。自动准同期并列，通常采用恒定越前时间原理工作，这个越前时间可按断路器的合闸时间整定。准同期控制器根据给定的允许压差和允许频差，不断地检查准同期条件是否满足，在不满足要求时闭锁合闸并且发出均压均频控制脉冲。当所有条件均满足时，在整定的越前时刻送出合闸脉冲。

同期装置一般在发电机端的电压和频率与系统侧电压和频率相

差不大时投入，而在同期结束后就可退出运行。

#### 4.2.1 频差与压差的整定

##### 原理与说明：

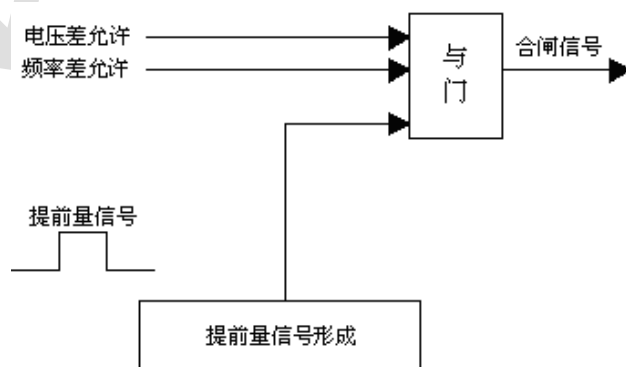
为了使待并发电机组满足并列条件，自动准同期装置设置了三个控制单元：

1. 频差控制单元：它的任务是检测发电机电压  $U_g$  与系统电压  $U_S$  间的滑差角频率  $\omega_d$ ，控制调速系统，调节发电机转速，使发电机的频率接近于系统频率，满足允许频差。

2. 压差控制单元：它的功能是检测发电机电压  $U_g$  与系统电压  $U_S$  间的电压幅值差，控制励磁系统，调节发电机电压  $U_g$  使之与系统电压  $U_S$  的压差小于规定允许值，促使并列条件的形成。

3. 合闸信号控制单元：检查并列条件，当待并发电机组的频率和电压都满足并列条件，在相角差  $\delta$  接近于零或控制在允许范围以内时，合闸控制单元就选择合适的时间（导前时间）发出合闸信号，使并列断路器的主触头接通，完成发电机组与电网的并列运行。

三者之间的逻辑机构框图如下：



准同期装置的合闸信号控制逻辑结构框图

微机型同期装置对微机型调速装置的控制方式：当准同期装置设置为“启动”，且发电机电压与系统电压的频差大于同期装置的频差整定值时，其频差控制单元向微机调速装置发出加速/减速脉冲信号（准同期面板有相应指示），直至频差不大于频差整定值。

微机型同期装置对微机型励磁装置的控制方式：当准同期装置设置为“启动”，发电机电压与系统电压的压差大于准同期装置整定的压差允许值，它的压差控制单元给微机励磁装置发出升压或降压脉冲信号，直至压差不大于压差允许值。

#### 实验步骤：

- 1、参考 3.3 同期装置的基本操作。
- 2、依次合上 8QF、5QF、2QF、7QF、6QF、3QF，使系统侧母线带电。各 QF（即断路器）处指示灯应红灯亮、绿灯灭。观察 A 母线电压表及电力系统综合自动化试验台上系统电压表和频率，此时系统侧电压应为 340V，50Hz。若电压有偏差，通过调节无穷大系统将系统侧电压调至所需电压。
- 4、将同期装置启动开关打到“关闭”位置。即按钮弹起、黄灯灭。原动机启动及发电机起励，参照发电机组的启动与运转实验中的实验步骤。控制原动机转速在 1460 转/分附近，机端电压在 340V 左右。

#### 5、频差的整定：

对微机准同期设置如下参数：允许频差：0.3Hz；允许压差：3V。

将同期装置设置为自动运行方式，启动同期装置。直到均频指示

长期显示无，在此过程中，观察准同期装置均频指示的变化以及发电机组转速的变化。

将同期装置启动开关打到“关闭”位置。即按钮弹起、黄灯灭。按1QF绿色按键，解列。

再分别设置允许频差：0.2Hz或0.1Hz，再调节 $n=1470$  rpm,  $U_g=380V$ ，重复以上观察步骤，总结变化规律。

## 6、压差的整定：

调节 $n=1500$  rpm,  $U_g=360V$ 。

对微机准同期设置如下参数：允许频差：0.3Hz；允许压差：5V。

将同期装置设置为半自动运行方式，启动同期装置。直到均压指示长期显示无，在此过程中，观察准同期装置均压频指示的变化以及发电机组机端电压的变化。

将同期装置启动开关打到“关闭”位置。即按钮弹起、黄灯灭。按1QF绿色按键，解列。

再分别设置允许压差：4V或2V，再调节 $n=1500$ rpm,  $U_g=360V$ ，重复以上观察步骤，总结变化规律。

在不同的频差和压差情况下观察同期装置的均频、均压过程。

7、停机。停止同期装置，然后参照发电机组的启动与运转试验中的实验步骤依次退出励磁系统和调速系统，

思考：

1. 根据实验现象，分析微机型同期装置的压差、频差与整定控制单元的内部工作原理。



2. 总结调速装置和励磁装置的如何与同期装置压差、频差与整定控制单元配合工作的。

#### 4.2.1 手动准同期并网

**实验目的：**

1. 加深理解同步发电机准同期并列运行原理，掌握准同期并列条件。
2. 掌握手动准同期的概念及并网操作方法，准同期并列装置的分类和功能。
3. 熟悉同步发电机手动准同期并列过程

**实验原理：**

在满足并列条件的情况下，只要控制得当，采用准同期并列方法可使冲击电流很小且对电网扰动甚微，故准同期并列方式是电力系统运行中的主要并列方式。准同期并列要求在合闸前通过调整待并发电机组的电压和转速，当满足电压幅值和频率条件后，根据“恒定越前时间原理”，由运行操作人员手动或由准同期控制器自动选择合适时机发出合闸命令，这种并列操作的合闸冲击电流一般很小，并且机组投入电力系统后能被迅速拉入同步。

依并列操作的自动化程度，又可分为手动准同期、半自动准同期和全自动准同期三种方式。

正弦整步电压是不同频率的两正弦电压之差，其幅值作周期性的正弦规律变化。它能反映发电机组与系统间的同步情况，如频率差、相角差以及电压幅值差。线性整步电压反映的是不同频率的两方波电压间相角差的变化规律，其波形为三角波。它能反映电机组与系统间

的频率差和相角差,并且不受电压幅值差的影响,因此得到广泛应用。

手动准同期并列,应在正弦整步电压的最低点(相同点)时合闸,考虑到断路器的固有合闸时间,实际发出合闸命令的时刻应提前一个相应的时间或角度。

自动准同期并列,通常采用恒定越前时间原理工作,这个越前时间可按断路器的合闸时间整定。准同期控制装置根据给定的允许压差和允许频差,不断地检测准同期条件是否满足,在不满足要求时,闭锁合闸并且发出均压、均频控制脉冲。当所有条件均满足时,在整定的越前时间送出合闸脉冲。

### 实验步骤:

1、参照压差和频差的整定实验中的实验步骤,机组启动并建压。使 $n=1485\text{ rpm}$ ;  $U_g=350\text{V}$ 。

2、将自耦调压器的旋钮逆时针旋至最小。按下QF8合闸按钮,观察电力系统综合自动化试验台上无穷大电压表,将无穷大系统调节到340V,然后按下5QF、2QF、7QF、6QF、3QF,使系统侧母线带电。

3、在手动准同期方式下,发电机组的并列运行操作

将同期装置的工作模式设置为“手动”。

在这种情况下,要满足并列条件,需要手动调节发电机电压、频率,直至电压差、频差在允许范围内,相角差在零度前某一合适位置时,手动操作合闸按钮进行合闸。

A、观察同期装置主界面中,频差棒图和压差棒图的方向和量,以及相角差指针的旋转方向。

B、按下调速装置上的“增速”键进行增频，同期装置的频差棒图接近于零；此时同期表的压差棒图也应接近于零，否则，调节励磁装置。

C、观察同期装置主界面中同期表指针位置，当相角差指针旋转至接近0度位置时（此时相差也满足条件），手动按下1QF合闸，合闸成功后，1QF合闸，红灯亮。观察并记录合闸时的冲击电流。YZ1300微机同期装置闭锁了手动合闸，此实验请将同期装置的“同期参数”页面中的“手动合闸”投入。

将并网前的初始条件调整为：发电机端电压为370V， $n=1515$  rpm，重复以上实验，注意观察各种实验现象。

实验完毕后请将同期装置的“同期参数”页面中的“手动合闸”退出。

4、在手动准同期方式下，偏离准同期并列条件，发电机组的并列运行操作

本实验分别在单独一种并列条件不满足的情况下合闸，记录功率表冲击情况；

A、电压差、相角差条件满足，频率差不满足，在 $f_g > f_s$ 和 $f_g < f_s$ 时手动合闸，观察并记录实验台上有功功率表P和无功功率表Q指针偏转方向及偏转角度大小，分别填入表中；注意：频率差不要大于0.5Hz。

B、频率差、相角差条件满足，电压差不满足， $V_g > V_s$ 和 $V_g < V_s$ 时手动合闸，观察并记录实验台上有功功率表P和无功功率表Q指针

偏转方向及偏转角度大小，分别填入表中；注意：电压差不要大于额定电压的10%。

C、频率差、电压差条件满足，相角差不满足，顺时针旋转和逆时针旋转时手动合闸，观察并记录实验台上有功功率表P和无功功率表Q指针偏转方向及偏转角度大小，分别填入表中。注意：相角差不要大于30°。偏离准同期并列条件并网操作时，发电机组的功率方向变化表

#### 4.2.2 半自动准同期并网

**实验目的：**

1. 加深理解同步发电机准同期并列原理，掌握准同期并列条件。
2. 掌握半自动准同期装置的工作原理及使用方法。
3. 熟悉同步发电机半自动准同期并列过程。

**原理与说明：**

为了使待并发电机组满足并列条件，完成并列自动化的任务，同期装置需要满足以下基本技术要求：

同期装置要具有均压和均频的功能。如果频差满足要求，是发电机的转速引起的，此时同期装置要发出均频脉冲，改变发电机组的转速。如果电压差不满足要求，是发电机的励磁电流引起的，此时同期装置要发出均压脉冲，改变发电机的励磁电流的大小。

同步发电机的自动准同期装置按自动化程度可分为：半自动准同期并列装置和自动准同期并列装置。

半自动准同期并列装置没有频差调节和压差调节功能。并列时，

待并发电机的频率和电压由运行人员监视和调整，当频率和电压都满足并列条件时，并列装置就在合适的时间发出合闸信号。它与手动并列的区别仅仅是合闸信号由该装置经判断后自动发出，而不是由运行人员手动发出。

### 实验步骤：

1、参照压差和频差的整定实验中的实验步骤，机组启动并建压。使 $n=1485$  rpm； $U_g=390V$ 。

2、将自耦调压器的旋钮逆时针旋至最小。按下QF8合闸按钮，观察电力系统综合自动化试验台上无穷大电压表，设置成电压400V，然后按下5QF、2QF、7QF、6QF、3QF，使系统侧母线带电。

3、查看同期装置的各整定项是否正确。如果不符，则进行相关修改。

然后，修改准同期装置中的整定项：允许频差： $0.3Hz$ ；允许压差： $3V$ 。合闸时间设置为之前实验中所测得的越前时间。

设置同期装置工作模式为“半自动”，并启动同期装置。

4、在半自动准同期方式下，发电机组的并列运行操作

在这种情况下，要满足并列条件，需要手动调节发电机电压、频率，直至电压差、频差在允许范围内，相角差在零度前某一合适位置时，同期装置控制合闸按钮进行合闸。

A、观察同期装置主界面中，频差棒图和压差棒图的方向和量，以及相角差指针的旋转方向。

B、按下调速装置上的“增速”或“减速”键进行增频或减频，

同期装置的频差棒图和 $F_d$ 接近于零。此调节过程中，观察并记录观察并记录频差减小过程中，同期装置主界面中，频差棒图方向和量的大小的变化情况。

B、按下励磁装置上的“增磁”或“减磁”键进行增磁或减磁，同期装置的压差棒图和 $U_d$ 接近于零。此调节过程中，观察并记录观察并记录压差减小过程中，同期装置主界面中，压差棒图方向和量的大小的变化情况。

C、“压差”和“频差”棒图均接近于0， $U_d$ 和 $F_d$ 均小于设置的允许值。表示压差、频差均满足条件，微机装置自动判断相差也满足条件时，发出合闸命令，1QF合闸成功后，红色指示灯亮。观察并记录合闸时的冲击电流。

将并网前的初始条件调整为：发电机端电压为410V， $n=1515$  rpm，重复以上实验，注意观察各种实验现象。

5、停机。停止同期装置，然后参照发电机组的启动与运转试验中的实验步骤依次退出励磁系统和调速系统

#### 思考：

1. 根据实验步骤，详细分析半自动准同期并列过程。
2. 通过实验过程，分析半自动准同期与手动准同期的异同点。

### 4.2.3 自动准同期并网

#### 实验目的：

1. 加深理解同步发电机准同期并列原理，掌握准同期并列条件。
2. 掌握自动准同期装置的工作原理及使用方法。

### 3. 熟悉同步发电机准同期并列过程。

#### 原理与说明：

自动准同期并列装置设置与半自动准同期并列装置相比，增加了频差调节和压差调节功能，自动化程度大大提高。

微机准同期装置的均频调节功能，主要实现滑差方向的检测以及调整脉冲展宽，向发电机组的调速机构发出准确的调速信号，使发电机组与系统间尽快满足允许并列的要求。

微机准同期装置的均压调节功能，主要实现压差方向的检测以及调整脉冲展宽，向发电机的励磁系统发出准确的调压信号，使发电机组与系统间尽快满足允许并列的要求。此过程中要考虑励磁系统的时间常数，电压升降平稳后，再进行一次均压控制，以使压差达到较小的数值，更有利于平稳地进行并列。

#### 实验步骤：

1、参照压差和频差的整定实验中的实验步骤，机组启动并建压。使 $n=1485$  rpm； $U_g=390V$ 。

2、将自耦调压器的旋钮逆时针旋至最小。按下QF8合闸按钮，观察电力系统综合自动化试验台上无穷大电压表，电压400V，然后按下5QF、2QF、7QF、6QF、3QF，使系统侧母线带电。

3、查看同期装置的各项整定项是否正确。如果不符，则进行相关修改。

然后，修改准同期装置中的整定项：允许频差：**0.3Hz**；允许压差：**3V**。合闸时间设置为之前实验中所测得的越前时间。

设置同期装置工作模式为“自动”。

#### 4、在自动准同期方式下，发电机组的并列运行操作

在这种情况下，要满足并列条件，需要微机准同期装置自动控制微机调速装置和微机励磁装置，调节发电机电压、频率，直至电压差、频差在允许范围内，相角差在零度前某一合适位置时，微机准同期装置控制合闸按钮进行合闸。

A、观察同期装置主界面中，频差棒图和压差棒图的方向和量，以及相角差指针的旋转方向。

B、操作微机励磁装置上的增、减速键和微机励磁装置升、降压键，使 $U_g=410V$ ， $n=1515\text{ rpm}$ ，待电机稳定后，按下同期装置“启动”键。记录合闸时的冲击电流。

C、解列后，修改同期装置中的“允许频差”、“允许压差”、“合闸时间”。重复前面步骤，记录并分析三个同期条件的变化和冲击电流的关系。

5、停机。停止同期装置，然后参照发电机组的启动与运转试验中的实验步骤依次退出励磁系统和调速系统，并关闭所有电源。

思考：

1. 分析自动准同期的工作原理及过程。
2. 分析以下参数改变对自动准同期并列的影响：导前时间、允许频差和允许压差。
3. 自动准同期、半自动准同期与手动准同期的异同点有哪些？。



### 4.3 同步发电机励磁控制

#### 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) 了解微机励磁调节装置的基本控制方式。
- 3) 了解几种常用励磁限制器的作用。
- 4) 掌握励磁调节装置的基本使用方法。

#### 原理与说明：

同步发电机是将旋转形式的机械功率转换成三相交流电功率的特定的机器设备。为完成这一转换，它本身需要一个直流磁场，产生这个磁场的直流电流成为同步发电机的励磁电流，又称为转子电流。具有自动控制与自动调节设备的励磁系统称为自动调节励磁系统或称发电机自动电压调节系统。

同步发电机励磁系统由励磁功率单元和励磁调节装置两部分组成，它们和同步发电机结合在一起构成一个闭环反馈控制系统，称为发电机励磁控制系统。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。

励磁装置的控制方式有四种：恒 $U_g$ （恒机端电压方式，保持机端电压稳定）、恒 $I_L$ （恒励磁电流方式，保持励磁电流稳定）、恒 $Q$ （恒无功方式，保持发电机输出的无功功率稳定）和恒 $\alpha$ （恒控制角方式，保持控制角稳定），可以任选一种方式运行。恒 $Q$ 和恒 $\alpha$ 方式一般在抢发无功的时候才投入。大多数情况下应选择恒电压方式运行，这样

能满足发电机并网后调差要求，恒励流方式下并网的发电机不具备调差特性。

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。当操作励磁调节装置的增减磁按钮，可以升高或降低发电机电压；当发电机并网运行时，操作励磁调节装置的增减磁按钮，可以增加或减少发电机的无功输出。

无论是在“恒 $U_g$ ”还是“恒 $I_L$ ”方式下，都可以操作增减磁按钮，所不同的是调节的参数不同。在“恒 $U_g$ ”方式下，调节的是机端电压，也就是上下平移特性曲线，在“恒 $I_L$ ”方式下，改变的是励磁电流的大小，此时即使在并网的情况下，也不具备调差特性。

#### 4.3.1 同步发电机起励

本实验系统励磁方式为它励。同步发电机的起励方式有两种：恒机端电压方式起励，恒励磁电流方式起励。恒机端电压方式起励，起励后的发电机电压稳定在手动设定的电压水平上；恒励磁电流方式起励，起励后的发电机励磁电流稳定在手动设定的电流水平上。

##### 实验目的：

- 1、了解微机励磁调节器的几种控制方式及其各自特点。
- 2、通过实验理解励磁调节器无扰动切换的重要性。

##### 原理与说明：

励磁装置具有四种控制方式：恒发电机电压 $U_g$ ，恒励磁电流 $I_e$ ，恒导通角 $\alpha$ 和恒无功 $Q$ 。恒 $U_g$ ，恒 $I_e$ 和恒 $Q$ 三种控制方式均采用PID控制。

##### 实验步骤：

## A. 恒机端电压方式起励

1、将调速装置“运行方式”开关选择为“闭环”或“开环”方式均可，“控制方式”选择为“就地”（选择为“远方”时，就地控制失效）。“启动”开关按下，此时，调速装置开始输出控制信号。

通过“增速”按钮逐渐升高电动机转速，当按住“增速”按钮不动时，转速将快速升高。接近额定转速时，采用“点动”的方式操作按钮，使电动机达到需要的转速。

2、将励磁装置“运行方式”设置为“恒U<sub>g</sub>”，“控制方式”选择为“就地”。当机组转速升到额定附近时，“启动”开关按下，此时，励磁装置开始输出控制信号。

启动后，建压在380V左右。

3、观测在起励时励磁电流和励磁电压的变化，并记录起励后的发电机稳态电压、励磁电流、励磁电压和控制角 $\alpha$ 。

每次实验完毕后停机，应严格按照“准同期并列运行”中的停机步骤执行。

改变启动时机组转速，重复步骤，将记录数据填入表。

恒U<sub>g</sub>方式起励测试

发电机组频率 (Hz)	发电机电压(V)	励磁电流(A)	励磁电压(V)	控制角 $\alpha(^{\circ})$
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				

## B. 恒励磁电流方式起励

1、将调速装置“运行方式”开关选择为“闭环”或“开环”方式均可，“控制方式”选择为“就地”（选择为“远方”时，就地控制失效）。“启动”开关按下，此时，调速装置开始输出控制信号。

通过“增速”按钮逐渐升高电动机转速，当按住“增速”按钮不动时，转速将快速升高。接近额定转速时，采用“点动”的方式操作按钮，使电动机达到需要的转速。

2、将励磁装置“运行方式”设置为“恒IL”，“控制方式”选择为“就地”。当机组转速升到额定附近时，“启动”开关按下，此时，励磁装置开始输出控制信号。

启动后，建压在380V左右。

3、观测在起励时励磁电流和励磁电压的变化，并记录起励后的发电机稳态电压、励磁电流、励磁电压和控制角 $\alpha$ 。

每次实验完毕后停机，应严格按照“准同期并列运行”中的停机步骤执行。

改变起动时机组转速，重复步骤，将记录数据填入表。

恒IL方式起励测试

发电机组频率 (Hz)	发电机电压(V)	励磁电流(A)	励磁电压(V)	控制角 $\alpha(^{\circ})$
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				

### c. 恒Q方式运行

1、发电机组与系统并网。

2、并网后，通过调节调速装置使发电机组发出一定的有功，通过调节励磁或系统电压使发电机组发出一定的无功。要求保证发电机功率因数为0.8。具体操作如下：按调速装置的“增速”键或“减速”键来增大或减小有功功率；降低无穷大系统的电压,使发电机发出一定的无功功率。

3、设置励磁装置的“运行方式”为“恒Q”方式。

4、改变系统电压，从励磁装置读取发电机电压、励磁电流、给定电压和无功功率数值并记录于表中。

系统电压 $U_s$ (V)	发电机电压 $U_g$ (V)	发电机电流 $I_g$ (A)	励磁电流 $I_e$ (A)	给定电压 $U_R$ (V)	有功功率 $P$ (kW)	无功功率 $Q$ (kVar)
380						
370						
360						
350						
390						
400						
410						

**灭磁实验：**

1、发电机组的起励建压，具体操作参照前面实验。

2、按下励磁装置上的“灭磁”按钮，记录励磁电流和励磁电压的变化（观察发电机、变压器控制柜上的励磁电流表和电压表或者励磁装置上的数据）。并通过示波器观测励磁电压 $U_e$ （对应面板上的接线柱）波形。

### 3、发电机组停机。

#### 4.3.2 伏赫限制实验

##### 实验目的：

- 1、了解伏赫限制的意义。
- 2、熟悉伏赫限制的工作原理。

##### 原理与说明：

V/Hz（伏/赫）限制就是限制发电机的端电压与频率的比值，其目的是防止发电机在空载、甩负荷和机组启动期间，由于电压升高或频率降低使发电机励磁电流增大，导致发电机铁芯饱和而引起发电机转子过热。

已知公式：
$$U = 4.44NK_{N1}fBS$$

式中：U—发电机的相电势； N—每相绕组的串联匝数；

KN1—绕组系数； B—发电机的磁感应强度； S—发电机铁芯截面积

对于给定的发电机，N和S是常数，令 $K = 4.44NK_{N1}S$ ，则 $U/f = BK$

根据整定的最大允许伏赫比 $B_{max}$ 和当前频率 $f$ ，计算出当前允许的最高电压 $U_{max} = B_{max} \cdot f$ ，将其与当前发电机端电压 $U_g$ 比较，取两者中间的最小值作为 $U_{ref}$ 进行调节， $U_{ref} = \min\{U_{ref}, U_{max}\}$ 调节的结果必然是发电机端电压 $U_g = U_{ref}$ ，即满足 $U/f \leq B_{max}$ ，达到伏赫限制的目的。考虑到机组并网运行时，比值 $U/f$ 一般不会越限，故伏赫限制器解列运行时投入，并网后退出。

##### 实验步骤：

1、发电机组起励建压，使原动机转速为**1500rpm**，发电机电压为**400V**。

2、设置励磁装置的“伏赫限制倍数”为“**1.1**”，延时为**1S**。投入“伏赫限制”。

3、按调速装置上的“增速”键或“减速”键，调节发电机组频率下降至**45 Hz**，每间隔**1Hz**记录发电机电压，直到伏赫限制告警（伏赫限制动作），记录此时的发电机电压和频率。记录相关数据在表中。

发电机频率 f (Hz)	50	49	48	47	46	45	44
机端电压 $U_g$ (V)							

4、发电机组停机。

#### 思考：

1. 根据实验数据，在同一坐标系内绘制一簇伏赫限制曲线，分析曲线特点。

2. 根据实验现象，分析发电机并网运行时是否要投入伏赫限制功能，为什么？

### 4.3.3 欠励限制实验

#### 实验目的：

- 1、掌握欠励限制的作用、工作原理、特性曲线及其整定方法。
- 2、深入理解“V”形曲线和功率圆图，分析研究欠励运行与机组稳定的关系。

#### 原理与说明：

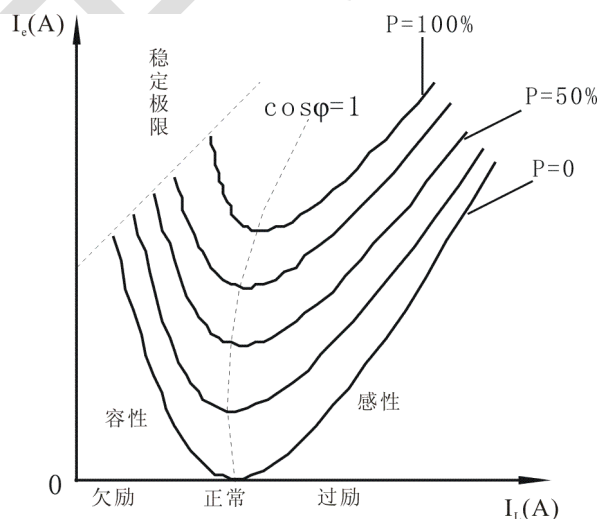
欠励限制的作用就是当发电机处于进相运行时，将其最小励磁值限制在发电机临界失步稳定极限范围内，并且使最小励磁值不致低于

发电机进相运行时定子端部绕组及铁芯部件的发热允许范围。

自并励方式励磁的同步发电机，当并列运行于容量不大而电压波动较大的电网中，在电网电压升高时（比如由于电力系统高压线路空载运行，或无功补偿电容在电力系统负荷低谷时未及时切除，造成系统无功过剩），自并励励磁系统由于电压负反馈的调节作用，会自动使发电机励磁电流大幅度降低。当发电机励磁电流小于某一定值时，其功率因数角将由滞后变为超前，发电机自动带上容性负载，即所谓“进相”运行，进入“进相”的励磁状态称为“欠励”状态。根据凸极同步发电机的功率方程式：

$$P = \frac{E_q U_s}{X_d - X_{st}} \sin \delta + \frac{U_s^2 (X_d - X_q)}{2(X_d + X_{st})(X_q + X_{st})} \sin 2\delta$$

式中： P—发电机有功功率；  $E_q$ —发电机空载电势；  
 $U_s$ —系统电压；  $\delta$ —功角；  
 $X_l$ —线路电抗；  $X_d$ —发电机纵轴同步电抗；  
 $X_q$ —发电机横轴同步电抗。



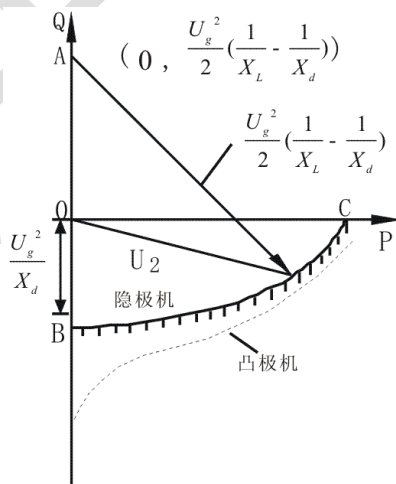
发电机“V”形曲线

当P、U、 $X_d$ 、 $X_q$ 、 $X_L$ 确定后，励磁电流减少，引起 $E_q$ 减少，必然导致功角 $\delta$ 增大，当 $\delta > 90^\circ$ 时，电机失步。发电机运行的P（有功）—Q（无功）极限在电机理论中可由功角特性得出同步发电机的V形



曲线或由功率圆图来确定。由“V”形曲线可知，发电机带上不同的有功负载时，分别“进相”到不同程度后即失去稳定。所以，当发电机带上某一有功功率时，为保证发电机稳定运行，其最小励磁电流由“V”形曲线就可确定。发电机所带有功负载越大，则允许“进相”的范围就越小，即励磁电流最小限制值越高。

最小励磁限制和最大容性无功功率（或电流）限制是同一回事。因为在发电机并联运行情况下，容性无功功率的增大是欠激励磁电流减小的必然反应，因此欠激励磁电流的测量和最小励磁电流的限制都可以通过容性无功功率来实现。保持静态稳定极限所允许的P~Q关系，可由发电机的功角特性和静态稳定特性的条件 $dP/d\delta=0$ 来推导。从而可作出保证静态稳定极限下的凸极同步发电机的P—Q关系功率圆图。



静稳定条件下的功率圆图

显然，为了保证机组有一定静稳定储备和避免水轮发电机由于欠励运行造成定子端部发热，需要限制发电机的最小励磁电流，也就是相应地限制发电机的最大进相无功电流（或功率）。

当电网电压波动较大，而发电机容量相对较小，并且有灵敏的励磁调节器时，甚至还可能发生因为电网电压升高，该机自动强减而失磁或自同期并网时发生失磁，因此考虑这一因素，也有必要装设欠励限制电路。

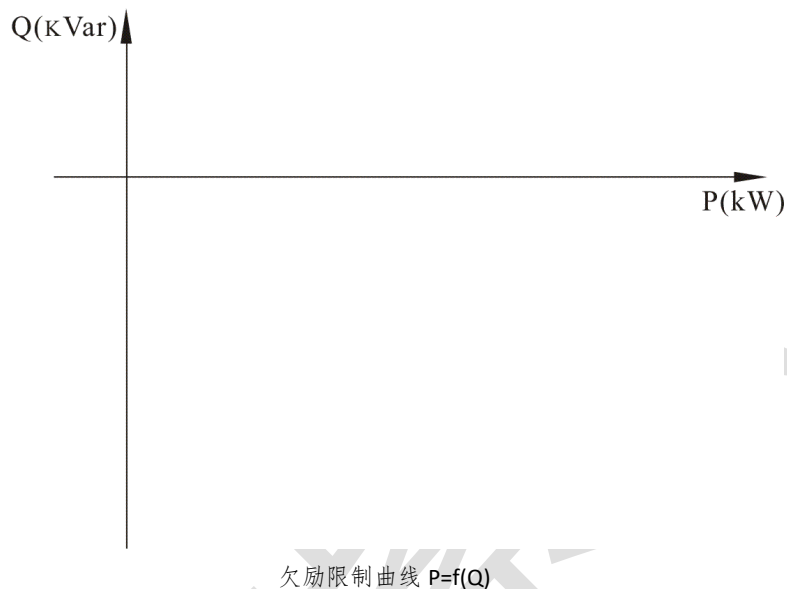
对于自复励的发电机，因有复励分量，可以不装设欠励限制。

总之，欠励限制器的任务就是确保在任何情况下，限制发电机的进相无功不超过允许范围，当进相无功超过允许范围时，欠励限制器将限制励磁电流的减少。

#### 实验步骤：

- 1、发电机组起励建压，使原动机转速为**1500rpm**，发电机电压为**300V**。
- 2、发电机组和系统间的线路采用单回线，使电力系统综合自动化试验台上的线路开关**8QF**、**2QF**和**5QF**处于“合闸”状态，其它断路器处于“分闸”状态。
- 3、设置励磁装置的“运行方式”为“恒U<sub>g</sub>”，发电机组起励建压，使原动机转速为**1500rpm**，发电机电压为**300V**。
- 4、调节系统电压为**300V**。
- 5、发电机组与系统并网。
- 6、设置微机励磁装置的欠励限制**Q1=0.5, Q2=1**。投入“欠励限制”
- 7、调节有功功率输出分别为**0**、**50%**和**100%**的额定负载。用减小励磁电流（按励磁装置上的“减磁”键）的方法使发电机组进相运行，直到欠励限制动作，记下此时的有功功率**P**和无功功率**Q**于表中；
- 8、根据实验数据作出欠励限制曲线 **$P=f(Q)$** ，并计算出该直线的斜率和截距。

发电机有功功率 P (kW)	欠励限制动作时的 Q 值 (kVar)
零功率	
0.5	
1.0	



9、发电机组停机。

**思考：**

- 1、简述欠励运行会造成的危害。
- 2、分析欠励无功电流限制的实验原理及其操作方法。
- 3、研究无功电流限制整定特性曲线对确定实际欠励限制整定的作用。

#### 4.3.4 调差特性实验

**实验目的：**

- 1、深入理解调差原理，掌握改变发电机电压调节特性斜率的方法。
- 2、多台机组在同一母线上并联运行时，无功功率分配与无功调节特性的关系。

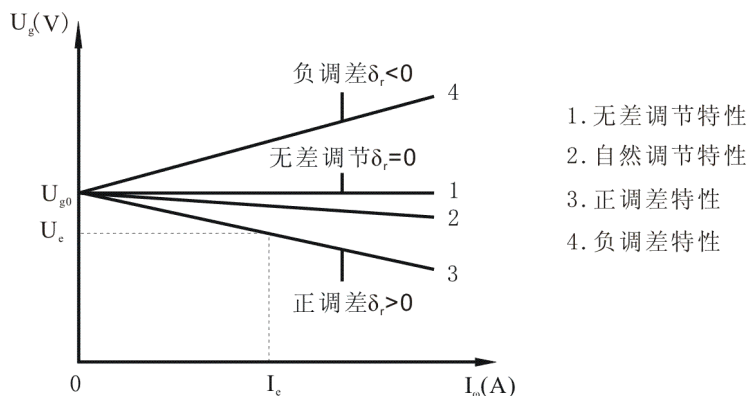
### 3、理解调差系数的涵义及其发电机外特性曲线。

#### 原理与说明：

为了改变发电机外特性曲线，使并列运行的各台机组之间合理分配无功负荷，或者为了维持系统某一点电压恒定，在负荷变化时，要对电力网电压损耗进行补偿，因而设置了无功调差电路。

常用的电流调差电路有两种：一是取两相电流信号；二是取单相电流信号。因为发电机输出端电压主要与负载电流的无功分量有关，故引入的电流信号滞后于相应的电压信号 $90^\circ$ 。

电流调差电路的工作原理：主要是利用电流信号在调差电阻 $R$ 上的压降，迭加到测量电压信号上去，从而使发电机的外特性陡度发生变化。当上述压降叠加后使外特性陡度向右下方向倾斜时，为正调差特性，如图曲线3，表现为负载无功电流增加时，端电压下降，改变正调差系数（即直线陡度），可使并列运行机组之间按合理比例稳定地分配无功负荷；如果将中间电流互感器ZTA的极性反接，则使外特性陡度向右上方倾斜，为负调差特性，如图曲线4，表现为负载无功电流增加时，端电压上升，适用于电力系统要求某点电压恒定、在负荷增加时需要补偿线路和变压器电压损耗的特殊场合；当调差电阻经切换开关短接时，则调差电路基本不起作用，为自然调差，如图曲线2。



发电机外特性曲线

## 实验步骤:

### A. 调差系数的测定

同步发电机的调差调整特性是发电机在不同电压值时，发电机转子电流 $I_e$ 与无功负荷电流 $I_w$ 的关系。发电机的调差系数决定于自动励磁调节系统总的放大系数。调差系数与励磁系统的总放大倍数成反比。它决定并联机组间无功电流的分配关系。

当调差系数大于零即为正调差系数时，表示发电机外特性下倾，即发电机无功电流增加，其极端电压降低。当调差系数小于零即为负调差系数时，表示发电机外特性上翘，即发电机无功电流增加，其极端电压上升。调差系数等于零为无差调节。在实际运行中，发电机一般采用正调差系数，因为它具有系统电压下降而发电机的无功电流增加的这一特性，这对于维持系统稳定运行是十分必要的。至于负调差系数，一般只能在大型发电机-变压器组单元接线时采用。

在励磁装置中，使用的调差公式为（按标么值计算）：

$U_B = U_g \pm K_q * Q$ ，它是将无功功率的一部分叠加到电压给定值上，其中 $U_g$ 为电压给定值， $Q$ 为无功功率， $K_q$ 为调差系数。

**实验步骤:**

1) 启动机组，满足条件后并网运行，并退出同期装置，并网步骤见“准同期并列运行”实验。

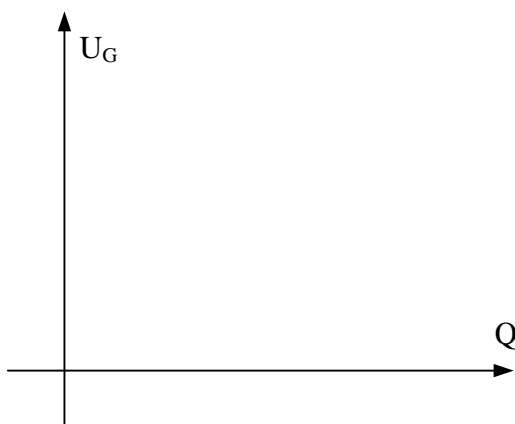
注：调速装置设置为“闭环”方式，励磁装置设置为“恒 $U_G$ ”方式。

2) 用降低系统电压的方法（调节调压器）以增加发电机无功输出，记录一系列机端电压和无功功率的数据，将数据填入表。（如果记录数据时，励磁调节装置上的数值显示有波动，则可以参考电力系统综合自动化试验台上方的电压表和无功表，计算时额定无功功率为1.25kVar，额定电压380V）

3) 作出调节特性曲线，并计算出调差系数。比较计算得出的调差系数与设置的调差系数是否大致相同。

机端电压与无功关系表

	发电机机端电压 ( $U_G$ )	发电机无功输出 ( $Q$ )	无穷大电压	
1				
2				
3				
4				

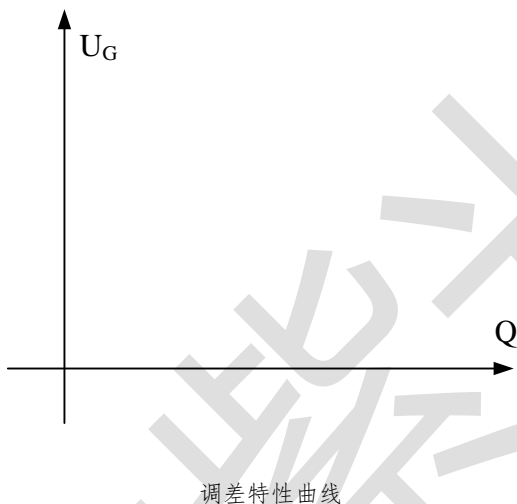


调节特性曲线

### B. 零调差实验

设置调差系数=0。实验步骤同A。

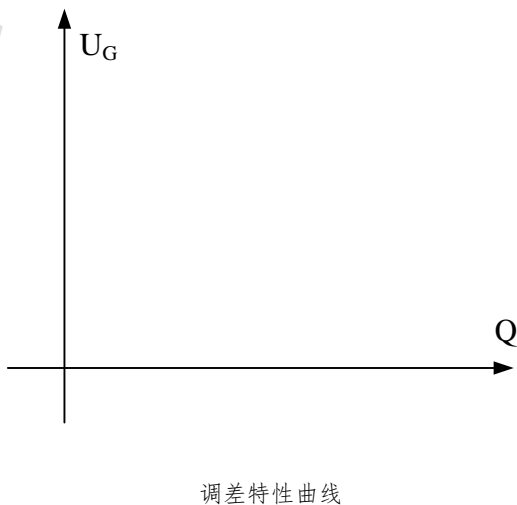
用降低系统电压的方法增加发电机无功输出，记录一系列机端电压、和无功功率的数据，将数据填入表，作出调节特性曲线。



### C. 正调差实验

设置调差系数=5%，实验步骤同A。

用降低系统电压的方法增加发电机无功输出，记录一系列机端电压、和无功功率的数据，将数据填入表，作出调节特性曲线。



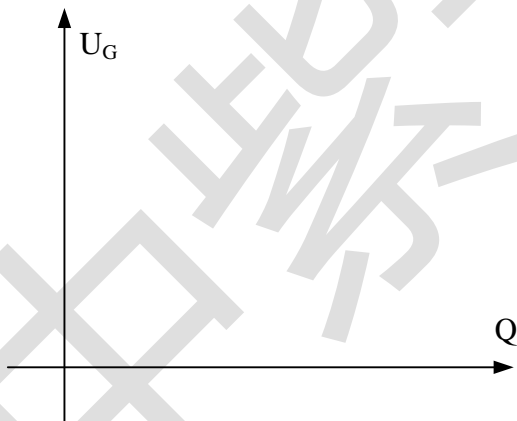
### D. 负调差实验

设置调差系数 = -5%，实验步骤同A。

用降低系统电压的方法增加发电机无功输出，记录一系列机端电压、和无功功率的数据，将数据填入表，作出调节特性曲线。

不同调差系数下机端电压与无功关系表

Kq = 0		Kq = +5%		Kq = -5%	
UG	Q	UG	Q	UG	Q



调差特性曲线

**思考：**

1、分析具有负调差特性的发电机能否在发电机电压母线上并联运行。

2、分析在公共母线上并联运行的多台发电机组中，不允许有两台或两台以上机组具有无差特性，否则无功功率将无法得到合理的分配。但两台具有无差特性的发电机组，如果经过一定的阻抗在行并联，则是允许的。



### 4.3.5 过励限制实验

#### 实验目的：

- 1、掌握可控励磁发电系统过励限制电路原理及其工作特性。
- 2、深入理解过励限制特性曲线及其测试整定方法。

#### 原理与说明：

过励限制是把可控励磁发电系统中可控桥的最大输出电流限制在一定限度内的安全保护措施。因为可控励磁系统调节灵敏，在发电机端电压下降5%时，就能将可控硅导通角开放到最大进行强励。如不加以限制，这时的强励电流约为额定励磁电流的2倍以上，对励磁绕组和可控桥整流元件都可能造成危害。因此必须设置过励限制电路把强励电流限制在强励允许值以内。

为使机组安全运行，对过励磁应按允许发热时间运行，若超过允许时间，励磁电流仍不能降下来，则应由最大励磁限制器执行限制功能。

反时限限制器主要用于限制最大励磁电流。他按照已知的反时限限制特性，即按发电机转子允许发热极限曲线，对发电机转子电流的最大值进行限制，以防转子过热。所谓反时限，即检测电流越大，延时越小，动作越快。

#### 实验步骤：

- 1、发电机组起励建压，使原动机转速为1500rpm，发电机电压为300V。并网。
- 2、设置励磁装置的“过励限制倍数”为表中数值，延时为1S。

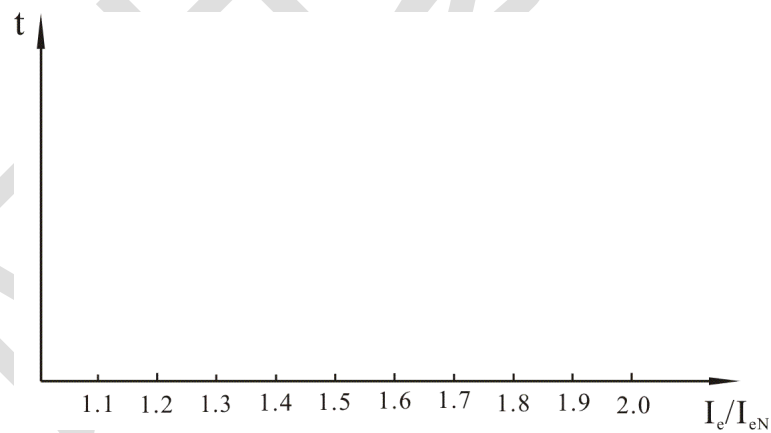
投入“过励限制”。

3、励磁电流可通过按下励磁装置上的“增磁”键来调节。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到表中，观察过励限制动作过程；

注：用降低额定励磁电流定值的方法模拟励磁电流过励。本实验设置额定励磁电流  $I_{eN}$  为 **1.8A**。

4、描出励磁限制特性曲线， $t=f(I_e/I_{eN})$ ；

励磁电流实际值 $I_e$ (A)	过励倍数 ( $I_e/I_{eN}$ )
	1.1 $I_{eN}$
	1.3 $I_{eN}$
	1.5 $I_{eN}$
	1.7 $I_{eN}$
	1.9 $I_{eN}$



励磁限制特性曲线

5、发电机组停机。

思考：

当确定某一过励限制值后，如何从特性曲线的对应输入电压  $U_{ac}$  计算出可控桥交流侧被限制的输入电流值。

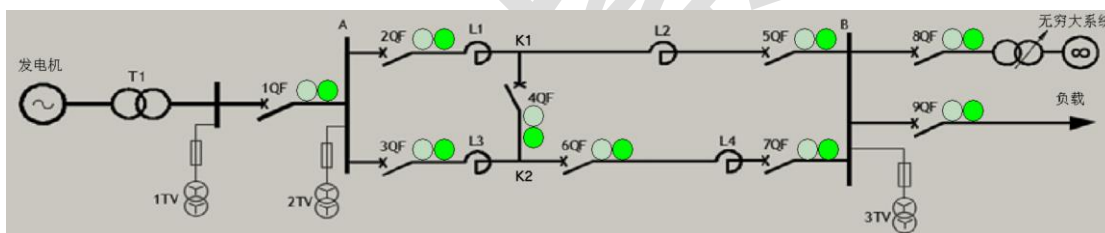
#### 4.4 单机一无穷大系统稳态运行方式实验

##### 实验目的：

- 1、熟悉远距离输电的线路基本结构和参数的测试方法。
- 2、掌握对称稳定工况下，输电系统的各种运行状态与运行参数的数值变化范围。
- 3、掌握输电系统稳态不对称运行的条件、参数和不对称运行对发电机的影响等。

##### 原理与说明：

单机一无穷大系统模型，是简单电力系统分析的最基本，最主要的研究对象。本实验平台建立的是一种物理模型，如下图所示。



单机一无穷大系统示意图

发电机组的原动机采用国标直流电动机模拟，但其特性与电厂的大型原动机并不相似。发电机组并网运行后，输出有功功率的大小可以通过调节直流电动机的电枢电压来调节（具体操作必须严格按照调速器的正确安全操作步骤进行！发电机组的三相同步发电机采用的是工业现场标准的小型发电机，参数与大型同步发电机不相似，但可将其看作一种具有特殊参数的电力系统发电机。

实验平台的输电线路是用多个接成链型的电抗线圈来模拟，其电抗值满足相似条件。“无穷大系统”采用大功率三相自耦调压器，三

相自耦调压器的容量远大于发电机的容量，可近似看作无穷大电源，并且通过调压器可以方便的模拟系统电压的波动。

实验平台提供的测量仪表可以方便的测量（电压，电流，功率，功率因数，频率）并可通过切换开关显示受端和送端的 $P$ ， $Q$ ， $\cos\Phi$ 。

**实验内容：**

#### 4.4.1 单回路稳态对称运行实验

1、输电线路选择L1和L2（即2QF和5QF合闸），系统侧电压 $U_S=300V$ ，发电机组启机，建压，通过可控线路单回路并网输电。

2、调节调速装置的增、减速键，调整发电机有功功率；调节励磁装置的增、减磁键，改变发电机的电压，调整发电机无功功率，使输电系统处于不同的运行状态，为了方便实验数据的分析和比较，在调节过程中，保持 $\cos\Phi=0.8$   $U_S=300V$ 不变。观察并记录线路首、末端的测量表计值及线路开关站的电压值，计算、分析和比较运行状态不同时，运行参数（电压损耗、电压降落、沿线电压变化、无功功率的方向等）变化的特点及数值范围，记录数据于表中。

注：在调节功率过程中发电机组一旦出现失步问题，立即进行以下操作，使发电机恢复同步运行状态：操作微机调速装置上的“减速”键，减少有功功率；增加常规励磁给定，提高发电机电势；单回路切换成双回路。

#### 3、发电机组的解列和停机

保持发电机组的 $P=0$ ， $Q=0$ ，此时按下1QF分闸按钮，再按下控制柜上的灭磁按钮，按下调速装置的“减速”键，转速减小到0时，关闭

电源。

$\text{COS}\Phi=0.8$      $U_s=300\text{V}$      $P: \text{kW}$      $Q: \text{kVar}$      $U: \text{V}$      $I: \text{A}$

参数 线路结构	P1		Q1		I		US		Usw		ΔU		ΔP		ΔQ	
	单回路	0.5	0	0.91												
1		-0.01	0.87													
1.5																
双回路	0.5															
	1															
	1.5															
	2															

$P_1$ ,  $Q_1$ —送端功率;     $I$ —相平均电流;     $U_{sw}$ —中间站电压  
 $\Delta U$ —电压损耗;     $\Delta P$ —有功损耗;     $\Delta Q$ —无功方向

#### 4.4.2 双回路对称运行与单回路对称运行比较实验

实验步骤基本同按单回路稳态对称运行实验内容，只是将原来的单回线路改成双回路运行。观察并记录数据于表中，并将实验结果与单回路稳态对称运行实验运行比较和分析。

**思考：**

- 1、整理实验数据，说明单回路输电和双回路输电对电力系统稳定运行的影响，并对实验结果进行理论分析。
- 2、根据不同运行状态的线路首、末端和中间开关站的实验数据、分析、比较运行状态不同时，运行参数变化的特点和变化范围。

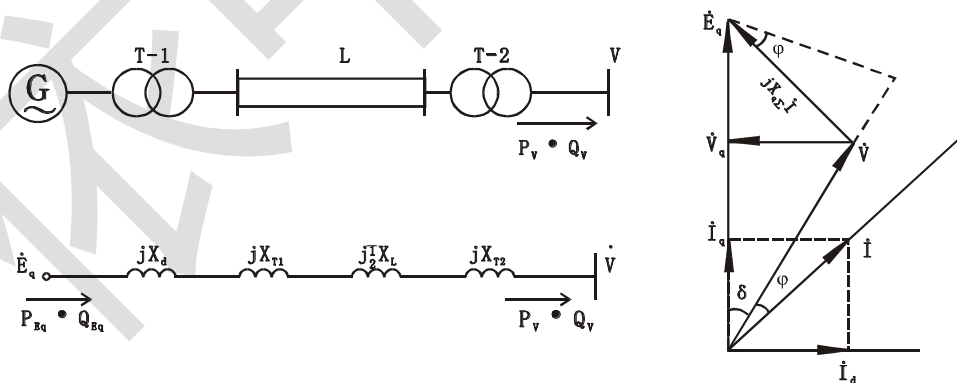
## 4.5 电力系统功率特性和功率极限实验

### 实验目的：

- 1、加深理解发电机功率特性和功率极限的概念。
- 2、通过实验了解提高电力系统功率极限的措施。
- 3、初步掌握电力系统物理模拟实验的基本方法；
- 4、加深理解功率极限的概念，在实验中体会各种提高功率极限措施的作用；
- 5、通过对实验中各种现象的观察，结合所学的理论知识，培养理论结合实际及分析问题的能力。

### 原理与说明：

下图为一个简单电力系统示意图，其中发电机通过升压变压器T1、输电线路和降压变压器T2接到无限大容量系统，为了分析方便，往往不计各元件的电阻和导纳。



简单电力系统的等值电路及相量图

设发电机至系统d轴和q轴总电抗分别为 $X_{d\Sigma}$ 和 $X_{q\Sigma}$

(1) 隐极发电机功率的特性：发电机电势 $E_q$ 点的功率为：

$$P_{Eq} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

发电机输送到系统的功率为：

$$P_v = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

$$Q_v = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma}} \cos \delta - \frac{V^2}{X_{d\Sigma}}$$

发电机无调节励磁时，电势 $E_q$ 为常数，从上公式可知：

$$P_{Eq,m} = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma}}$$

当发电机装有励磁调节器时，为了维持发电机端压水平，发电机电势 $E_q$ 随运行情况而变化。

(2) 凸极发电机功率的功率特性：

$$P_{Eq} = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \times \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta$$

随着电力系统的发展和扩大，电力系统的稳定性问题更加突出，而提高电力系统稳定性和输送能力的最重要手段之一是尽可能提高电力系统的功率极限，从简单电力系统功率极限的表达式看，提高功率极限可以通过发电机装设性能良好的励磁调节器以提高发电机电势、增加并联运行线路回路数或串联电容补偿等手段以减少系统电抗、受端系统维持较高的运行电压水平或输电线采用中继同步调相机或中继电力系统以稳定系统中继点电压等手段实现。

实验内容：

#### 4.5.1 无调节励磁时，功率特性和功率极限的测定

##### A. 网络结构变化对系统静态稳定的影响

在相同运行条件下（即系统电压 $U_x$ 、发电机电势 $E_q$ 保持不变，即

并网前 ( $U_x = E_q$ )，测定输电线单回路和双回路运行时，发电机的功一角特性曲线，功率极限值和打到功率极限时的功角值。同时观察并记录系统中其他运行参数（如发电机端电压等）的变化。将两种情况下的结果加以比较和分析。

### 实验步骤：

- 1、合上实验台上的3QF、6QF、7QF、8QF，构成单回线路。
- 2、启动机组，设置励磁装置运行方式为“恒IL”，满足条件后并网运行，并网后退出同期装置，并网步骤见“准同期并列运行实验”。
- 3、功率角为0度的观察：调速装置上可以读到功角读数，由于机组的机械特性，在并网0功率的时候，需要注意此时的功角是否在5左右，如若不对，请进入调速装置参数设置设置功角补偿参数。
- 4、通过调速装置逐步增加发电机输出的有功功率，发电机不调节励磁，观察功角的大小。
- 5、观察并记录系统中运行参数的变化，填入表中。
- 6、输电线路为双回路(合上实验台2QF、5QF，即可构成双回路)，重复上述步骤，填入表中。

单回线方式机组运行参数

$\delta$	0°	30°	45°	60°	90°
P					
I <sub>g</sub>					
U <sub>g</sub>					
I <sub>fd</sub>					
Q					

双回线方式机组运行参数

$\delta$	0°	30°	45°	60°	90°
P					
I <sub>g</sub>					



Ug					
Ifd					
Q					

### B. 发电机电势 $E_q$ 不同对系统静态稳定的影响

在同一接线及相同的系统电压下，测定发电机电势  $E_q$  不同时 ( $E_q < U_x$  或  $E_q > U_x$ ) 发电机的功一角特性曲线和功率极限。

#### 实验步骤：

- 1、设置输电线单回线运行，并网前  $E_q < U_x$ 。
- 2、启动机组，满足条件后并网运行，并网后退出同期装置，并网步骤见“准同期并列运行实验”。
- 3、调节调速装置，使发电机输出有功功率为零。
- 4、逐步增加发电机输出的有功功率，而发电机不调节励磁。
- 5、观察并记录系统中运行参数的变化，填入表中。
- 6、设置输电线单回线运行，并网前  $E_q > U_x$ ，重复上述步骤，填入表中。

单回线运行方式，并网前  $E_q < U_x$  时各运行参数

$\delta$	0°	10°	20°	40°	50°
P					
Ig					
Ug					
Ifd					
Q					

单回线运行方式，并网前  $E_q > U_x$  时各运行参数

$\delta$	0°	10°	20°	40°	50°
P					
Ig					
Ug					
Ifd					
Q					

#### 4.5.2 手动调节励磁时，功率特性和功率极限的测定

给定初始运行方式，在增加发电机有功输出时，手动调节励磁保持发电机端电压恒定，测定发电机的功一角曲线和功率极限，并与无调节励磁时所得的结果比较分析，说明励磁调节对功率特性的影响。

##### 实验步骤：

- 1) 设置输电线单回线运行。
- 2) 将调速装置的工作方式设为“闭环”，将励磁装置的工作方式设为“恒IL”。
- 3) 启动机组，满足条件后并网运行，并网后退出同期装置，并网步骤见“准同期并列运行实验”。
- 4) 调节有功功率和无功功率均为0。
- 5) 调节调速装置，逐步增加发电机输出的有功功率。并手动操作控制屏上的“增磁”或“减磁”按钮，进而调节励磁装置保持发电机机端电压恒定或无功输出为零。
- 6) 观察并记录系统中运行参数的变化，填入表中。
- 7) 设置输电线双回线运行，重复步骤1)~6)，将结果填入表中。

单回线运行方式，手动调节励磁时各运行参数

$\delta$	0°	10°	20°	30°	40°
P					
lg					
Ug					
lfd					

双回线运行方式，手动调节励磁时各运行参数

$\delta$	0°	10°	20°	30°	40°
P					
lg					
Ug					
lfd					

### 4.5.3 自动调节励磁时，功率特性和功率极限的测定

- 1) 设置输电线单回线运行。
- 2) 将调速装置的工作方式设为“闭环”，将励磁装置的工作方式设为“恒UG”（即自动调节励磁方式）。
- 3) 启动机组，满足条件后并网运行，并网后退出同期装置，并网步骤见“准同期并列运行实验”。
- 4) 调节有功功率和无功功率均为0。
- 5) 调节调速装置，逐步增加发电机输出的有功功率。并手动操作控制屏上的“增磁”或“减磁”按钮，进而调节励磁装置保持发电机机端电压恒定或无功输出为零。
- 6) 观察并记录系统中运行参数的变化，填入表中。
- 7) 设置输电线双回线运行，重复步骤1)~6)，将结果填入表中。

单回线运行方式，自动调节励磁时各运行参数

$\delta$	0°	10°	20°	30°	40°
P					
Ig					
Ug					
I <sub>fd</sub>					

双回线运行方式，自动调节励磁时各运行参数

$\delta$	0°	30°	45°	60°	90°
P					
Ig					
Ug					
I <sub>fd</sub>					

### 4.5.4 单回路、双回路输送功率与功角关系

根据前面实验数据，分析单回路、双回路输送功率与功角关系。

### 4.5.5 提高电力系统静态稳定性

根据前面实验数据，分析提高电力系统静态稳定性的措施，自动

励磁调节对系统静态稳定性有何影响。

**思考：**

1、根据实验数据，并作出各种运行方式下的 $U_{sw}(\delta)$ ， $P(\delta)$ ， $Q(\delta)$ 特性曲线，并加以分析。

2、通过实验记录分析的结果对功率极限的原理进行阐述，同时将理论计算和实验记录进行对比，说明产生误差的原因。

3、分析、比较各种运行方式下发电机的功一角特性曲线和功率极限各有什么特点。

4、根据实验过程，分析功角指示器的工作原理。

5、根据实验数据分析无功功率随有功增加而变化的原因。

6、根据实验数据分析提高系统静态稳定性的措施有哪些？

7、实验中，当发电机濒临失步时应采取哪些挽救措施才能避免电机失步？