

EXPERIMENT INSTRUCTION of POWER SYSTEM ANALYSIS

# 《电力系统分析》

# 实验指导书

黄肇 罗庆跃主编

电气工程系《电力系统分析》课程自编教材

# 前 言

实验教学是高等教育结构中的重要组成部分，它承担着科学研究、知识创新、教学改革和教书育人等学校的主体工作，对于学生综合素质的培养具有不可替代的作用，对学生创新能力的培养，具有一定的地位和作用。

电力系统是由多台发电机、变压器、输电线路和负荷等元器件组成，电力系统自动控制装置、继电保护、调度自动化系统都是为电力系统的经济、安全稳定运行服务，故此电力系统综合实验，让学生了解发电、输电、配电、用电的全过程，对系统有一个全局认识。还能做课程设计、毕业设计实验以及本科生的生产实习。

电力系统综合实验台是一个将主要专业课程的理论与实践相结合，既能进行专业课程的教学实验，又能进行专业知识应用与研究的教学实验基地，有利于提高学生创新思维与实践能力，能更好地培养出高素质的应用型人才。

由于水平有限，书中错误及不妥之处在所难免，敬请批评指正（[huangpowers@163.com](mailto:huangpowers@163.com)）。

# 目 录

第一部分 《电力系统稳态分析》实验指导书.....	1
实验注意事项.....	1
实验一 单机一无穷大系统稳态运行方式实验.....	4
实验二 单机带负荷实验.....	8
实验三 复杂电力系统运行方式实验.....	11
第二部分 《电力系统暂态分析》实验指导书.....	16
实验一 电力系统功率特性和功率极限实验.....	16
实验二 电力系统双回路稳态非全相运行实验.....	20
实验三 电力系统暂态稳定实验.....	23
附录一：WDT-III型电力系统综合自动化试验装置简介.....	28
附录二：同步发电机组启动和建压操作简介.....	29

## 实验注意事项

实验台上的指示灯：红色灯亮表示开关在合闸位置，绿色灯亮表示开关在分闸位置。  
切记！

### 一、WDT-III 电力系统综合自动化试验台注意事项

1. 在发动机启动或运行时，不允许打开励磁开关；
2. 在发电机建压后，“励磁方式”开关不允许操作，否则发电机会失磁；
3. 发动机运行时不允许打开原动机开关；
4. 严格禁止非同期并网，例如：不能用线路开关使发动机和无穷大系统联结；
5. 为了保护同期表，通常“同期方式”旋钮不要置到“手动”位置。只有在选择手动励磁方式时才允许同期方式旋钮置到“手动”位置。

### 二、PS-5G 型电力系统微机监控试验系统注意事项

1. 严格禁止非同期并网，必须在本地（WDT-III 电力系统综合自动化试验台）同期合闸，使发动机并网。
2. 网络中不能有两个无穷大系统运行，会造成系统短路，烧坏设备。

### 三、发电机开机操作过程

#### （一）微机自励或微机它励的开机过程

1. 检查调速器上“模拟调节”电位器指针是否指在 0 位置，如不在则应调到 0 位置；
2. 合上操作电源开关，检查实验台界面各开关所处的状态：各开关信号灯应绿灯亮、红灯熄；
3. 按调速器上的“微机方式自动/手动”按钮，选择开机方式（见（三）所述）说明：微机方式自动/手动：选择按钮，如果当前自动灯量，则按一下该按钮，就改为手动，如果当前手动灯量，按一下该按钮，则改为自动；
4. 励磁调节器选择它励、恒 UF 运行方式，合上励磁开关，且将“灭磁”按钮松开（即“灭磁”灯熄灭），这样当发电机频率升到 47Hz 以上时，则自动起励，发电机建压；
5. 把实验台上“同期方式”开关置“断开”位置；
6. 合上系统电压开关和线路开关 QF1, QF3，检查系统电压接近额定值 380V；可调整旁边的自耦变压器调整无穷大母线电压；

7. 合上原动机开关，按“停机/开机”按钮使“开机”灯亮，调速器将手动或自动启动电动机到额定转速；

8. 当机组转速升到 95%以上时，微机励磁调节器自动将发电机电压建压到与系统电压相等。

9. 调整：调整“TGS-04 型微机调速装置”上的“增速”和“减速”按钮来调节发电机转速以调整频率，调整“增磁”和“减磁”按钮来调节发电机励磁电压以调节发电机机端电压。并网之后，调整“增速”和“减速”按钮来调节发电机的有功功率，调整“增磁”和“减磁”按钮来调节发电机的无功功率。

## （二）手动励磁的开机过程

1. 检查调速器上“模拟调节”电位器指针是否指在 0 位置，如不在则应调到 0 位置；

2. 合上操作电源开关，检查实验台界面各开关所处的状态：各开关信号灯应绿灯亮、红灯熄。

3. 按调速器上的“微机方式自动/手动”按钮，选择开机方式；

4. 选择手动起励方式，“手动励磁”调节旋钮反时针旋到零，将“灭磁”按钮按下锁定；

5. 把实验台上“同期方式”开关置“断开”位置；

6. 合上系统电压开关和线路开关 QF1, QF3, 检查系统电压接近额定值 380V；

7. 合上原动机开关，按“停机/开机”按钮使“开机”灯亮，调速器将手动或自动启动电动机到额定转速；

8. 将发电机升到额定转速附近后，再合“励磁开关”，松开“灭磁”按钮（即“灭磁”按钮灯熄灭），进行手动起励。在升到额定转速附近之前，不允许加励磁。顺时针调节“手动励磁”旋钮增加励磁电压，在维持发电机为额定频率时，增加励磁电压，使发电机为额定电压。

## （三）开机方式选择

在试验台的“TGS-04 型微机调速装置”中有三种开机方式供选择，即“模拟方式”、“微机自动方式”、“微机手动方式”。

（1）当选择“模拟方式”时，应首先将指针电位器调至零，此时“输出零”指示灯亮，然后合上“原动机开关”再顺时针旋转指针电位器，当发电机旋转之后，应观察

机组稳定情况，然后缓慢加速到额定转速。

(2) 当选择“微机自动方式”时，先合上“原动机开关”，然后按下“停机/开机”按钮，此时“开机”指示灯亮，“停机”指示灯灭，发电机组自动增速到额定转速。**建议采用这种方式操作。**

(3) 当选择“微机手动方式”时，先合上“原动机开关”，然后按下“停机/开机”按钮，指示灯同样对应转换，按下“增速”按钮，可以看到控制量的大小，监视发电机转速，直至将发电机调整为额定转速。

#### (四) 励磁方式选择

在试验台上有一个“励磁方式”切换开关，它可选择三种励磁方式，即“手动励磁方式”、“微机它励方式”、“微机自并励方式”。

(1) 当选择“手动励磁方式”时，应先将“手动励磁”调节旋钮反时针旋到零，然后合上“励磁开关”，顺时针调节“手动励磁”旋钮增加励磁电压，在维持发电机为额定频率时，增加励磁电压，使发电机为额定电压。

(2) 当选择“微机它励”或“微机自并励”时，微机励磁调节器选择“恒  $U_F$ ”运行方式，然后合上“励磁开关”，松开“灭磁”按钮，调节器自动起励至给定电压。

### 四、发电机停机操作过程

#### (一) 发电机与系统解列

解列前一般需要减负荷减到零值（有功功率和无功功率都等于零），再手动切断发电机出口开关（发电机甩负荷试验除外）。

#### (二) 停机与灭磁

试验完毕，操作调速器减速停机，励磁调节器在频率下降到 43Hz 以下时，将会自动执行低频灭磁功能，实现逆变灭磁。手动励磁方式下，解列后须先将手动励磁旋钮复位到零，然后投入灭磁开关。

## 实验一 单机—无穷大系统稳态运行方式实验

### 一、实验目的

- 1、了解远距离输电线路的基本结构和参数的测试方法（参数 $U$ 、 $P$ 、 $Q$ 、 $I$ ）。
- 2、了解和掌握对称稳定额定状态（ $U_N$ 、 $f_N$ 、 $S_N$ ）情况下，输电系统的各种运行状态与运行参数的数值变化范围。

### 二、原理与说明

单机—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。电力系统稳态对称运行分析，除了包含许多理论概念之外，还有一些重要的“数值概念”。为一条不同电压等级的输电线路，在典型运行方式下，用相对值表示的电压损耗，电压降落等的数值范围，是用于判断运行报表或监视控制系统测量值是否正确的参数依据。因此，除了通过结合实的问题，让学生掌握此类“数值概念”外，实验也是一条很好的、更为直观、易于形成深刻记忆的手段之一。实验用一次系统接线图如图 1-1 所示。

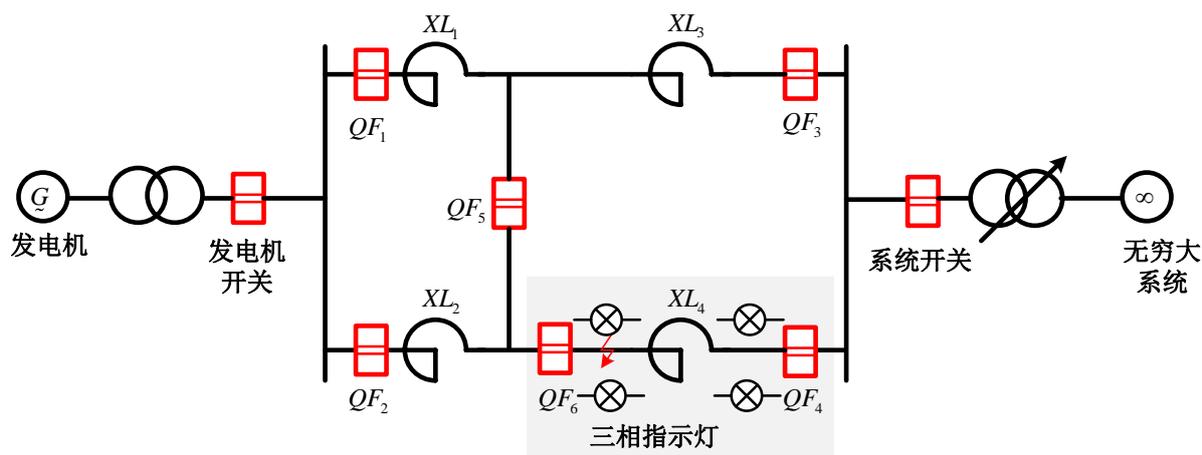


图 1-1 单机-无穷大系统示意图

本实验系统是一种物理模型。原动机采用直流电动机来模拟，当然，它们的特性与大型原动机是不相似的。原动机输出功率的大小，可通过给定直流电动机的电枢电压来调节。实验系统用标准小型三相同步发电机来模拟电力系统的同步发电机，虽然其参数不能与大型发电机相似，但也可以看成是一种具有特殊参数的电力系统的发电机。发电机的励磁系统可以用外加直流电源通过手动来调节，也可以切换到台上的微机励磁调节器来实现自动调节。实验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”母线就直接用实验室的交流电源，因为它是由实际电力系统供电的，因此，它基本上符合“无穷大”母线的条件。

同步发电机输出功率可以改变，系统电压、同步发电机电压也可改变。“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容量，可近似看作无穷大系统时，并且通过调压器可以方便地模拟系统电压的波动。设定单机—无穷大

系统时，系统电压  $U_s$  为 380V 或 400V 不变，功率因数为 0.8。输电线路是用多个接成链型的电抗绕组来模拟，其电抗值满足相似条件。发电机励磁控制方式有微机励磁控制和手动励磁控制等。

为了进行测量，实验台设置了测量系统，以测量各种电量（电流、电压、功率、频率）。为了测量发电机转子与系统的相对位置角（功率角），在发电机轴上装设了闪光测角装置。此外，台上还设置了模拟短路故障等控制设备。

实验台上的测量仪表如下：

(1) 有发电机端（送端）电压  $U_1$ 、功率  $P_1$ 、 $Q_1$ ，功率因数可表示大小和方向，频率为 50Hz。

(2) 有负载端（受端）电压  $U_2$ 、功率  $P_2$ 、 $Q_2$ ，功率因数，如  $\cos\varphi = 0.8$ 、 $\Delta Q = “+”$  表示无功方向接受， $\Delta Q = “-”$  表示无功方向送出，频率为 50Hz。

(3) 中间开关站（ $QF_5$ ）的电压  $U_z$ 。

通电时，依次合实验台总电源开关、三相电源开关，空载合线路上的断路器 QF。停电时，依次断开实验台上的空载合线路上的断路器 QF，三相电源开关，总电源开关。系统为并网运行，采用手动准同期（也可自动准同期）。

同期并网的原理：并网运行应同时满足电压幅差最小、频率差最小、相角差最小三个条件，即  $(U_1 - U_2) \approx 0$ 、 $(f_1 - f_2) \approx 0$ 、 $\Delta\delta \approx 0$ ，方可并网（手动、自动）。

### 三、实验内容和方法

开电源前，调整实验台上的切换开关的位置，确保：三个电压指示为同一相电压或线电压，发电机运行方式为并网运行，发电机励磁方式为手动励磁（或自动励磁），励磁电源为他励，并网方式选择手动同期（或自动准同期）。

通电时的操作，依次合实验台总电源开关、三相电源开关，空载合线路上的断路器 QF 即图 1 中的单回路时合（系统开关、QF4、QF6、QF2）或（系统开关、QF3、QF1）；双回路时合（系统开关、QF4、QF6、QF2、QF3、QF1）。

发电机组起动、建压、并网、双回线输电；保持系统电压  $U_s = 380V$  或  $400V$  不变。

(1) 发电机组起动。

合上原动机开关，通过微机调速器自动起动发电机组至额定转速  $1500rad/min$  或频率为 50Hz。如果转速或频率不满足，手动调节调速器，将转速调至  $1500rad/min$  或频率为 50Hz。

(2) 建压，并网，双回线输电。

建压：发电机励磁控制方式有微机励磁控制（自动、手动励磁）。起励建压选择其中方法之一。

并网运行：并网运行应同时满足电压幅差最小、频率差最小、相角差最小三个条件。同期条件满足后合发电机开关。

#### 1. 单回路稳态对称运行实验

(1) 发电机组手动（自动）准同期并网操作。输电线路选择  $XL_1$ 、 $XL_3$ （需操作开关

$QF_1$ 、 $QF_3$ )或 $XL_2$ 、 $XL_4$ (需操作 $QF_2$ 、 $QF_4$ 、 $QF_6$ )，系统侧电压 $U_s = 380V$ ，发电机机组起动、建压，满足同期条件时手动(自动)合发电机开关，通过可控线路单回路并网输电。

(2) 并网之后，调节调速装置的增、减速按钮，调整发电机有功功率。调节常规励磁装置给定，改变发电机的电压、调节发电机无功功率，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 $\cos\varphi = 0.8$ 、 $U_s = 380V$ 不变。

发电机输出功率设 $P_1 = 0.5kW$ 或 $P_1 = 1.0kW$ ，但发电机的功率要小于 $2kW$ 。观察并记录线路手、末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 $\Delta U$ 、功率损耗 $\Delta P$ 、沿线电压变化、两端无功功率的方向 $\Delta Q$ 等)变化的特点及数值范围，将数据记录于表1-1中，空白处是学生自己确定发电机的功率。

表1-1 稳态对称运行参数表 [ $\cos\varphi = 0.8$ ， $U_s = 380V$ ， $P(kW)$ ， $Q(k\text{ var})$ ， $U(V)$ ， $I(A)$ ]

参数 线路结构	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$	$U_F$	$U_s$	$U_z$	$I$	$\Delta U$	$\Delta P$	$\Delta Q$
单回路	0.5										
	1.0										

(3) 发电机组的解列和停机。调节调速装置和励磁装置，使发电机组有功功率和无功功率为0时，断开发电机开关；降压，调整自耦变压器，使系统电压为0；断网，切断系统的输电网；灭磁，断开实验台上的灭磁开关；停机，按下微机调速装置的停止按钮，使转速减小到零时，即发电机完全停止之后才关闭原动机电源。

(4) 实验台的断电操作。断电时。依次断开实验台上的单相电源开关、三相电源开关和总电源开关。

## 2. 双回路稳态对称运行实验

实验步骤与做单回路稳态对称运行实验的步骤基本相同，只需调节调速装置和励磁装置，在发电机的有功功率和无功功率为零的前提下，将原来的单回线路改成双回路运行(注意操作规程)。观察并记录线路手、末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 $\Delta U$ 、功率损耗 $\Delta P$ 、沿线电压变化、两端无功功率的方向 $\Delta Q$ 等)变化的特点及数值范围，将数据记录于表1-2中，空白处是学生自己确定发电机的功率。

表 1-2 稳态对称运行参数表[ $\cos\varphi = 0.8$ ,  $U_s = 380V$ ,  $P(kW)$ ,  $Q(k\text{ var})$ ,  $U(V)$ ,  $I(A)$ ]

参数 线路结构	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$	$U_F$	$U_s$	$U_z$	$I$	$\Delta U$	$\Delta P$	$\Delta Q$
单回路	0.5										
	1										

#### 四、实验报告

(1) 整理实验数据, 说明单回路送电和双回路送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。

(3) 根据实验数据, 分析输电线路各运行参数的测定方法和参数变化规律。

(4) 思考在调节功率过程中发电机组一旦出现失步问题, 应采出哪些措施。

#### 五、思考题

1. 影响简单系统静态稳定性的因素是哪些?
2. 提高电力系统静态稳定有哪些措施?
3. 何为电压损耗、电压降落?
4. “两表法”测量三相功率的原理是什么? 它有什么前提条件?

## 实验二 单机带负荷实验

### 一、实验目的

- 1、了解和掌握单机带负荷运行方式的特点。
- 2、了解在单机带负荷运行方式下原动机的转速和功角与单机无穷大系统方式下有什么不同。
- 3、通过独立电力网与大电力系统的分析比较实验进一步理解电力系统稳定概念。

### 二、原理与说明

单机带负荷运行方式与单机对无穷大系统运行方式有着截然不同的概念，单机对无穷大系统在稳定运行时，发电机的频率与无穷大频率一样，它是受大系统的频率牵制。随系统的频率变化而变化，发电机的容量只占无穷大系统容量的很小一部分。而单机带负荷它是一个独立电力网。发电机是唯一电源，任何负荷的投切都会引起发电机的频率和电压变化（原动机的调速器，发电机的励磁调节器均为有差调节）此时，也可以通过二次调节将发电机的频率和电压调至额定值。学生可以通过理论计算和实验分析比较独立电力网与大电力系统的稳定问题。具体方法如下：

在停电的状态下，在原有试验台的基础上，将无穷大电源更换成感性负荷，即将调压器副方电缆解开，接上电流大于5安的三相可调电阻，如图3所示：

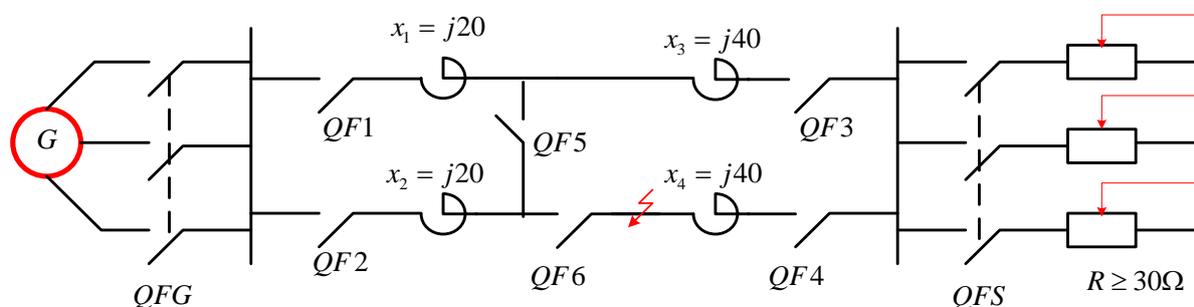


图3 单机带负荷接线图

在做实验时可调电阻R的值不应小于30欧姆，以免电流过大而危及设备的安全！在图3线路中的阻抗值在试验台中有不同的抽头是可以改变的。

**注意：**通电前一定要检查接线是否正确？电阻是否大于30欧姆？三相电阻是否平衡？

### 三、实验项目与方法

测定不同性质的负荷对发电机的电压，频率的影响，并计算出单位功率调差系数。

实验步骤：

- 1、调速器选择微机自动方式，启动机组到额定转速；
- 2、合上发电机开关；
- 3、选择所需要的励磁方式后，发电机建压；
- 4、按下面的实验选择对应的线路。

表 2-1

四种不同接线方式

	QF <sub>1</sub>	QF <sub>2</sub>	QF <sub>3</sub>	QF <sub>4</sub>	QF <sub>5</sub>	QF <sub>6</sub>
接线方式 1(单回路)	1	0	1	0	0	0
接线方式 2(并-单回路)	1	1	1	0	1	0
接线方式 3(单-并回路)	1	0	1	1	1	1
接线方式 4(双回路)	1	1	1	1	0	1

(0: 表示对应线路开关断开状态; 1: 表示对应线路开关闭合状态)

表 2-2

R=60 Ω

	电压 U	电流 I	有功功率 P	无功功率 Q	功率因数 cosφ	原动机转速 N
接线方式 1						
接线方式 2						
接线方式 3						
接线方式 4						

表 2-3

R=45 Ω

	电压 U	电流 I	有功功率 P	无功功率 Q	功率因数 cosφ	原动机转速 N
接线方式 1						
接线方式 2						
接线方式 3						
接线方式 4						

表 2-4

R=30 Ω

	电压 U	电流 I	有功功率 P	无功功率 Q	功率因数 cosφ	原动机转速 N
接线方式 1						
接线方式 2						
接线方式 3						
接线方式 4						

#### 四、实验报告要求

1、通过改变不同线路运行方式及负荷 R 大小，得出有功功率，无功功率。功率因素，计算分析实验结果。

2、根据负荷大小不同时转速的不同，绘出转速和有功功率的关系曲线，计算出原动机的调差系数。

3、分析比较在负荷相同时调速器在不同的运行方式时转速有什么不同？为什么？

## **五、思考题**

1. 单机带负荷与单机无穷大系统有什么不同？
2. 在单机带负荷方式下，在相同的负荷条件下，调速器在手动方式和自动方式时转速有何不同？为什么？
3. 做实验时发电机没有电压为什么可以先合发电机开关？

## 实验三 复杂电力系统运行方式实验

### 一、实验目的

1. 了解和掌握对称稳定情况下，输电系统的网络结构和各种运行状态与运行参数值变化范围。

2. 理论计算和实验分析，掌握电力系统潮流分布的概念。

3. 加深对电力系统暂态稳定内容的理解，使课堂理论教学与实践相结合，提高学生的感性认识。

### 二、原理与说明

现代电力系统电压等级越来越高，系统容量越来越大，网络结构也越来越复杂。仅用单机对无穷大系统模型来研究电力系统，不能全面反映电力系统物理特性，如网络结构的变化，潮流分布，多台发电机并列运行等等。

“PS-5G型电力系统微机监控实验台”是将五台“WDT-111型电力系统综合自动化实验台”的发电机组及其控制设备作为各个电源单元组成一个可变环型网络，如图4所示：

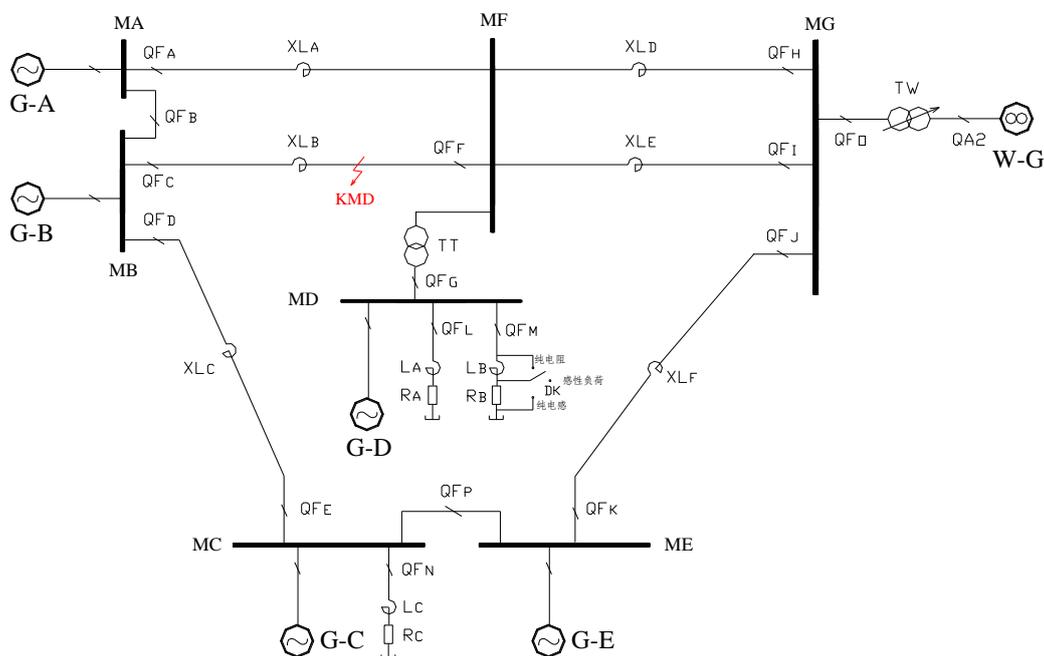


图4 多机系统网络结构图

此电力系统主网按500KV电压等级来模拟，MD母线为220KV电压等级，每台发电机控600MW机组来模拟，无穷大电源短路容量为6000MVA。

A站、B站相联通过双回400km长距离线路将功率送入无穷大系统，也可将母联断

开分别输送功率。在距离 100km 的中间站的母线 MF 经联络变压器与 220kV 母线 MD 相联, D 站在轻负荷时向系统输送功率, 而当重负荷时则从系统吸收功率 (当两组大小不同的 A, B 负荷同时投入时) 从而改变潮流方向。

在不改变网络主结构前提下, 通过分别改变发电机有功、无功来改变潮流的分布, 可以通过投、切负荷改变电力网潮流的分布, 也可以将双回路线改为单回路线输送来改变电力网潮流的分布, 还可以调整无穷大母线电压来改变电力网潮流的分布。

在不同的网络结构前提下, 针对 XLB 线路的三相故障, 可进行故障计算分析实验, 此时当线路故障时其两端的线路开关 QFC、QFI 跳开 (开关跳闸时间可整定)。

### 三、主电气设备的设计参数

#### 1. 同步发电机

序号	性能说明	设计值
1	三相交流同步发电机 (kVA)	2.5
2	定子额定电压 (V)	400
3	定子额定电流 (A)	3.61
4	功率因数 $\cos\varphi$	0.8
5	发电机转速 (r/min)	1500
6	定子线圈电阻 ( $75^\circ$ ) ( $\Omega$ /相)	3.224
7	磁极线圈电阻 ( $75^\circ$ ) ( $\Omega$ )	22.37
8	定子线圈铜耗 ( $75^\circ$ ) (W)	135
9	磁极线圈铜耗 ( $75^\circ$ ) (W)	110
10	定子铁耗 (W)	92
11	转子铁耗 (W)	13.5
12	机械损耗 (W)	74.5
13	附加损耗 (W)	15
14	总损耗 (W)	440
15	效率 (%)	78
16	满载励磁电流 (A)	2.5
17	满载励磁电压 (V)	70
18	定子漏抗 (标么值)	0.0477
19	直轴同步电抗 (标么值)	1.5
20	横轴同步电抗 (标么值)	0.7057
21	直轴瞬时电抗 (标么值)	0.146
22	横轴瞬时电抗 (标么值)	0.7057

23	直轴次瞬时电抗 (标么值)	0.146
24	横轴次瞬时电抗 (标么值)	0.7

## 2. 输电线路

$$XL_A = XL_B = 4\angle 86^\circ \quad (\Omega) \quad (2.5\angle 85.2^\circ, 4\angle 86^\circ, 5.5\angle 86.4^\circ)$$

$$XL_C = 2.5\angle 85.2^\circ \quad (\Omega) \quad (2.5\angle 85.2^\circ, 4\angle 86^\circ, 5.5\angle 86.4^\circ)$$

$$XL_D = XL_E = 12\angle 86^\circ \quad (\Omega) \quad (9\angle 85.6^\circ, 12\angle 86^\circ, 15\angle 86.2^\circ)$$

$$XL_F = 8\angle 86^\circ \quad (\Omega) \quad (6\angle 85.5^\circ, 8\angle 86^\circ, 10\angle 86.2^\circ)$$

**注意：输电线路参数可以通过电抗的抽头更改，如括号内的参数。**

## 3. 联络变压器

变压器容量  $S_N = 2.5kVA$

接线组别  $Y_0/Y_0$

短路阻抗  $U_K = 13\%$

变比  $380V$ 、 $380 \pm 2 \times 2.5\%V$ 、

## 4. 模拟负荷

$$LD_A = (125 + j95)\Omega$$

$$LD_B = 160\Omega, (160 + j105)\Omega, j105\Omega$$

$$LD_C = (120 + j125)\Omega$$

**其中，的参数可以通过三刀三掷刀闸倒换。**

## 四、实验项目与方法

### 1. 网络结构变化对系统潮流的影响

在相同的运行条件下，即各发电机的运行参数保持不变，改变网络结构，观察并记录系统中运行参数的变化，并将结果加以比较和分析。

实验方案同学们自己设计，并记录下各开关状态。

表 3-1

网络结构变化前

	G-A	G-B	G-C	G-D	MA	MB	MG
U							
I							
P							
Q							
$\cos\varphi$							

	QF <sub>A</sub>	QF <sub>C</sub>	QF <sub>D</sub>	QF <sub>G</sub>	QF <sub>H</sub>	QF <sub>I</sub>	QF <sub>J</sub>
U							
I							
P							
Q							
cosφ							

表 3-2

网络结构变化后

	G-A	G-B	G-C	G-D	MA	MB	MG
U							
I							
P							
Q							
cosφ							

	QF <sub>A</sub>	QF <sub>C</sub>	QF <sub>D</sub>	QF <sub>G</sub>	QF <sub>H</sub>	QF <sub>I</sub>	QF <sub>J</sub>
U							
I							
P							
Q							
cosφ							

## 2. 投、切负荷对系统潮流的影响

在相同的网络结构下各发电机向系统输送一定负荷，投入各地方  $LD_A$  和  $LD_B$ 。观察并记录系统中运行参数的变化并将结果加以分析和比较。

网络结构和各发电机输出功率大小由同学们自己设计，并记录下各状态：

表 3-3

投地方负荷前

	G-A	G-B	G-C	G-D	MA	MB	MG
U							
I							
P							
Q							
cosφ							

	QF <sub>A</sub>	QF <sub>C</sub>	QF <sub>D</sub>	QF <sub>G</sub>	QF <sub>H</sub>	QF <sub>I</sub>	QF <sub>J</sub>
U							
I							
P							
Q							
cosφ							

表 3-4

投地方负荷后

	G-A	G-B	G-C	G-D	MA	MB	MG
U							
I							
P							
Q							
$\cos\varphi$							

	QFA	QFC	QFD	QFG	QFH	QFI	QFJ
U							
I							
P							
Q							
$\cos\varphi$							

注： $LD_A$  负荷的性质可以通过台后三刀三掷开关切换。即纯电阻负荷，感性负荷。纯电感负荷。

### 3. 短路对电力系统暂态稳定的影响

同学们自己设计网络结构，发电机运行参数以及切除故障线路的保护动作时间，分析比较实验结果。注意在此多机电力系统中，三相短路时故障电流很大，放线路保护动作时间整定在 0.1 ~ 0.3 秒以内。

## 四、实验报告要求

1. 整理实验数据，分析比较网络结构的变化和地方负荷投，切对潮流分布的影响，并对实验结果进行理论分析

2. 通过实验中观察到的现象，说明提高暂态稳定的措施对系统稳定性作用机理。

## 五、思考题

1. 影响电力系统静态稳定性的因素有哪些？
2. 如何提高电力系统的静态稳定性？
3. 提高电力系统的暂态稳定的措施有哪些？

## 实验一 电力系统功率特性和功率极限实验

### 一、实验目的

- 1、初步掌握电力系统物理模拟实验的基本方法；
- 2、加深理解功率特性和功率极限的概念，在实验中体会各种提高功率极限措施的作用。

### 二、原理与说明

所谓简单电力系统，一般是指发电机通过变压器、输电线路与无限大容量母线联接而且不计各元件的电阻和导纳的输电系统。

(1) 隐极式同步发电机的功率特性

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

(2) 凸极式同步发电机的功率特性

对于简单系统，如发电机至系统 d 轴和 q 轴总电抗分别为  $X_{d\Sigma}$  和  $X_{q\Sigma}$ ，则发电机的功率特性为：

$$P_{Eq} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \times \frac{X'_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X'_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta$$

当发电机装有励磁调节器时，发电机电势  $E_q$  随运行情况而变化。根据一般励磁调节器的性能，可认为保持发电机  $E'_q$  (或  $E'$ ) 恒定。这时发电机的功率特性可表示成：

$$P'_{Eq} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \times \frac{X'_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X'_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta$$

$$\text{或 } P'_{Eq} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta$$

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路采用中枢纽点同步调相机或中枢纽点电力系统调压或稳定系统中枢点电压等手段可提高电力系统稳定性。

### 三、实验项目和方法

接通电源前，调整实验台上的切换开关的位置，确保：三个电压指示为同一相电压或线电压，发电机运行方式为并网运行，发电机励磁方式为手动励磁（或自动励磁），励磁电源为他励，并网方式选择手动同期（或自动准同期）。

1. 自动调节励磁时，功率特性和功率极限的测定

在相同的运行条件下（即系统电压  $U_s$ 、发电机电势保持不变，即并网前  $U_s = E_q$ ），测定输电线为单回线或双回线运行时，发电机的功角特性曲线，功率极限值和达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) 输电线路选择单回线路  $XL2$ 、 $XL4$  运行，系统侧电压和发电机电势； $U_s = E_q = 380V$ ，发电机组起机，建压、并网。
- 2) 发电机与系统并列后，调节发电机使其输出的有功和无功功率为零；
- 3) 功率角指示器调零；通过加速键（+）或减速键（-）调节发电机输出的有功功率为零，此时按下确认键，将调速器功角显示设置为  $0^\circ$ ，如果设置错误，可以按取消键，重新设置。

4) 逐步增加发电机输出的有功功率，而不调节发电机的励磁电流（ $I_f$  恒定），观察并记录系统中运行参数的变化，填入表 3-1 中。功角可以通过微机调速装置或者功角指示装置读取。

**注意：**在功率调节过程中，有功功率应缓慢调节，每次调节后，需等待一段时间，观察系统是否稳定，以取得准确的测量数值。当系统失稳时，减小原动机出力，使发电机拉入同步状态。

表 3-1 单回线路功角与运行参数变化表( $U_s = 380V$ ) (微机自并励方式)

$\delta$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$
$P_1$						
$Q_1$						
$P_2$						
$U_G$						
$U_Z$						
$I_A$						
$I_f$						

5) 将输电线路单回线改为双回线运行，重复上述步骤，填入表 3-2 中。

6) 发电机的解列和停机。调节调速装置和励磁装置，使发电机组有功功率  $P = 0$ ，发电机无功功率  $Q = 0$ ，断开发电机开关；灭磁、断开实验台上的灭磁开关；接下微机调速装置的停止键，使转速减小到零时，关闭原动机电源。

7) 实验台的断电操作。断电时。依次断开实验台上的单相电源开关、三相电源开关和总电源开关。

表 3-2 双回线路功角与运行参数变化表( $U_s = 380V$ ) (微机自并励方式)

$\delta$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$
$P_1$						
$Q_1$						
$P_2$						
$U_G$						
$U_Z$						
$I_A$						
$I_f$						

注： $P_1$ —送端功率，kW； $Q_1$ —送端无功功率； $P_2$ —受端功率； $U_G$ 、 $U_Z$ —发电极侧、中间开关站线电压，V； $I_A$ —发电机相电流，A； $I_f$ —发电机励磁电流，A。无功只需记录其方向。

(2) 微机他励（恒流或恒压控制方式），实验步骤自拟。

表 3-9 单回线路功角与运行参数变化表 (微机他励方式)

$\delta$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$
$P_1$						
$Q_1$						
$P_2$						
$U_G$						
$U_Z$						
$I_A$						
$I_f$						

表 3-10 双回线路功角与运行参数变化表 (微机他励方式)

$\delta$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$
$P_1$						
$Q_1$						
$P_2$						
$U_G$						
$U_Z$						
$I_A$						
$I_f$						

**注意事项:**

1. 调速器处停机状态时, 如果“输出零”灯不亮, 不可开机;
2. 实验结束后, 通过励磁调节使无功输出为零, 通过调速器调节使有功输出为零, 解列之后按下调速器的停机按钮使发电机转送至零。跳开操作台所有开关之后, 方可关断操作台上的操作电源开关。

**四、实验报告要求**

1. 根据实验装置给出的参数以及实验中的原始运行条件, 进行理论计算。将计算结果与实验结果进行比较。
2. 认真整理实验记录, 通过实验记录分析的结果对功率极限的原理进行阐述。同时对理论计算和实验记录进行对比, 说明产生误差的原因。并作出  $U_Z(\delta)$ ,  $P(\delta)$ 、 $Q(\delta)$  特性曲线, 对其进行描述。
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。

**五、思考题**

1. 功率均指示器的原理是什么? 如何调节其零点? 当日光灯供电的相发生改变时, 所得的功角值发生什么变化?
2. 多机系统的输送功率与功角  $\delta$  的关系和简单系统的功一角特性有什么
3. 自并励和他励的区别和各自特性是什么?
4. 自动励磁调节器对系统静态稳定性有何影响?
5. 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?

## 实验二 电力系统双回路稳态非全相运行实验

### 一、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（参数 $U$ 、 $P$ 、 $Q$ 、 $I$ ）。
- (2) 了解和掌握对称稳定额定状态（ $U_N$ 、 $f_N$ 、 $S_N$ ）情况下，输电系统的各种运行状态与运行参数的数值变化范围。
- (3) 了解和掌握输电系统稳态不对称运行的条件；不对称度运行参数的影响；不对称运行对发电机的影响等。

### 二、单机-无穷大系统运行原理

单机-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。本实验台建立的是一种物理模型，如图 2-1 所示。

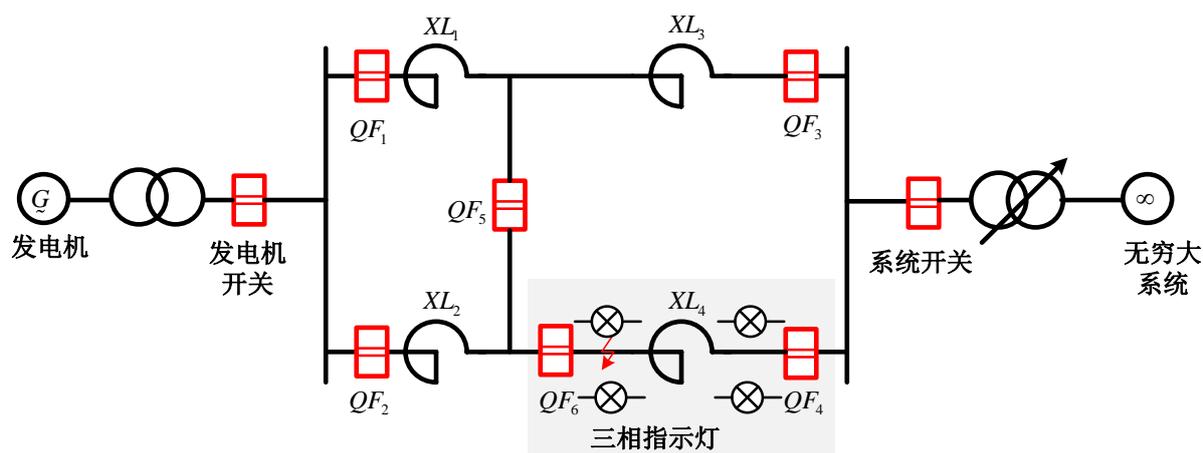


图 2-1 单机-无穷大系统示意图

其原理同单机-无穷大系统稳态实验。

### 三、非全相运行

电力系统不对称运行是指组成电力系统的电气元件三相对称性状态遭到破坏时的运行状态，如三相阻抗不对称，三相负载不对称等。而非全相运行是指不对称的特殊情况，即输电线、变压器及其他电气设备断开一相的工作状态。

电力系统不对称运行状态下导致电压电流对称性破坏，出现了负序电流。当变压器中性点接地时，还会出现零序电流，引起一些不利的影晌。所以必须设置微机保护装置并投入运行。

### 四、实验内容和步骤

接通开电源前，调整实验台上的切换开关的位置，确保：三个电压指示为同一相电

压或线电压，发电机运行方式为并网运行，发电机励磁方式为手动励磁（或自动励磁），励磁电源为他励，并网方式选择手动同期（或自动准同期）。

通电时的操作，依次合实验台总电源开关、三相电源开关，空载合线路上的断路器 QF 即图 1 中的单回路时合（系统开关、QF4、QF6、QF2）或（系统开关、QF3、QF1）；双回路时合（系统开关、QF4、QF6、QF2、QF3、QF1）。

发电机组起动、建压、并网、单回线输电；保持系统电压  $U_S = 300V$  或  $400V$  不变。

(1) 发电机组起动。合上原动机开关，通过微机调速器自动起动发电机组至额定转速  $1500rad/min$ 。如果转速不满足，手动调节调速器，将转速调至  $1500rad/min$ 。

(2) 建压，并网，双回线输电。

建压：发电机励磁控制方式有微机励磁控制（自动、手动励磁）。起励建压选择其中方法之一。

并网运行：并网运行应同时满足电压幅差最小、频率差最小、相角差最小三个条件。同期条件满足后合发电机开关。

## 1. 双回路稳态对称运行实验

(1) 发电机组手动(自动)准同期并网操作。输电线路选择  $XL1$ 、 $XL2$ 、 $XL3$ 、 $XL4$ ，(或  $QF5$  合上开关)，系统侧电压  $U_S = 380V$ ，发电机组起动、建压，满足同期条件时手动(自动)合发电机开关，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。调节常规励磁装置给定，改变发电机的电压、调节发电机无功功率，使输电系统处于不同的运行状态。为了方面实验数据的分析和比较，在调节过程中保持  $\cos\varphi = 0.8$ 、 $U_S = 380V$  不变。发电机输出功率设  $P_1 = 0.5$  或  $P_1 = 1$ 。观察并记录线路手、末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  $\Delta U$ 、功率损耗  $\Delta P$ 、沿线电压变化、两端无功功率的方向  $\Delta Q$  等）变化的特点及数值范围，将数据记录于表 2-1 中。

## 2. 双回路稳态非全相运行实验

(1) 微机保护整定的选择。电流 I 段“投入”，电压闭锁和方向闭锁“退出”，整定动作电流为 2 倍稳态运行时的动作电流，动作时间为 0.5s，重合闸时间为 50~100s；其他保护均退出。

(2) 设置短路故障。实验台右下方面板有短路类型设置模块。由短路类型设置按钮、设置短路持续时间用的数显时间继电器，短路投入接触器 KM 组成。可以设置单相对地、两相对地、相间短路、三相短路故障。

(3) 将短路故障投入，此时微机保护切除故障相，准备合闸，即只有一回线路的两相在运行。观察此状态下的三相电流、电压值，记录在表 2-1 中，与实验 1 进行比较。

(4) 断相运行后，重合闸成功，系统恢复到单回路稳态运行状态。

表 2-1 稳态对称运行参数表[ $\cos\varphi = 0.8$ ,  $U_s = 380V$ ,  $P(kW)$ ,  $Q(kvar)$ ,  $U(V)$ ,  $I(A)$ ]

参数		$P_1$	$Q_1$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_2$	$Q_2$	$S$
		运行状态										
双回路全相运行		0.5										
		1										
双回路非全相运行	A相断路											
	B相断路											
	C相断路											

### 3. 发电机的解列和停机

(1) 发电机组的解列和停机。调节调速装置和励磁装置，使发电机组有功功率  $P=0$ ，发电机无功功率  $Q=0$ ，断开发电机开关；灭磁、断开实验台上的灭磁开关；按下微机调速装置的停止键，使转速减小到零时，关闭原动机电源。

(2) 实验台的断电操作。断电时。依次断开实验台上的单相电源开关、三相电源开关和总电源开关。

## 四、实验报告

(1) 整理实验数据，说明单回路送电和双回路送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。

(3) 比较非全相运行实验前、后实验数据，分析输电线路各运行参数的变化。

## 五、思考题

(1) 不对称运行对同步发电机有哪些影响？如何确定发电机不对称运行时的允许带负载的范围？

(2) 在做不对称运行实验时，可采用不对称负载实验，也可采用输电线路不对称运行实验，他们之间有什么本质差异，为什么？

## 实验三 电力系统暂态稳定实验

### 一、实验目的

1. 通过实验加深对电力系统暂态稳定内容的理解，使课堂理论教学与实践结合，提高学生的感性认识。
2. 学生通过实际操作，从实验中观察到系统失步现象和掌握正确处理措施。
3. 用数字式记忆示波器测出短路时短路电流的非周期分量波形图，并进行分析。

### 二、原理与说明

电力系统暂态稳定问题是指电力系统受到较大的扰动之后，各发电机能否继续保持同步运行的问题。引起电力系统打扰动的原因主要有三点：①负载的突然变化，如投入或切除大容量的负载；②切除或投入系统的主要元件，如变压器、发电机等③发生短路故障。在各种扰动中以短路故障的扰动最为严重，因此常以此作为检验系统是否具有暂态稳定的条件。

(1) 发生故障前，正常运行时发电机功率特性为：

$$P_1 = \frac{E_q U_s}{X_{1\Sigma}} \sin \delta$$

(2) 故障期间，即短路运行时发电机功率特性为：

$$P_2 = \frac{E_q U_s}{X_{2\Sigma}} \sin \delta$$

(3) 故障切除后，发电机功率特性为：

$$P_3 = \frac{E_q U_s}{X_{3\Sigma}} \sin \delta$$

对这三个公式进行比较，我们可以知道决定功率特性发生变化与阻抗和功角特性有关。而系统保持稳定条件是切除故障角  $\delta_c$  小于  $\delta_{\max}$ ， $\delta_{\max}$  可由等面积原则计算出来。本实验就是基于此原理，由于不同短路状态下，系统阻抗  $X_{2\Sigma}$  不同，同时切除故障线路不同也使  $X_{3\Sigma}$  不同， $\delta_{\max}$  也不同，使对故障切除的时间要求也不同。

同时，在故障发生时及故障切除通过强励磁增加发电机的电势，使发电机功率特性中  $E_q$  增加，使  $\delta_{\max}$  增加。相应故障切除的时间也可延长：由于电力系统发生瞬间单相接地故障较多，发生瞬间单相故障时采用自动重合闸，使系统进入正常工作状态。这二种方法都有利于提高系统的稳定性。

### 三、实验项目与方法

(一) 短路对电力系统暂态稳定的影响

1. 短路类型对暂态稳定的影响

本实验台通过对操作台上的短路选择按钮的组合可进行单相接地短路，两相相间短路，两相接地短路和三相短路试验。

固定短路地点，短路切除时间和系统运行条件，在发电机经双回线与“无穷大”电网联网运行时，某一回线发生某种类型短路，经一定时间切除故障成单回线运行。短路的切除时间在微机保护装置中设定，同时要设定重合闸是否投切。

在手动励磁方式下通过调速器的增（减）速按钮调节发电机向电网的出力，测定不同短路运行对能保持系统稳定时发电机所能输出的最大功率，并进行比较，分析不同故障类型对暂态稳定的影响。将实验结果与理论分析结果进行分析比较。 $P_{max}$  为系统可以稳定输出的极限，注意观察有功表的读数，当系统出于振荡临界状态时，记录有功表读数，最大电流读数可以从 YHB - I11 型微机保护装置读出，具体显示为：

GL-XXX 三相过流值； GA-XXX A 相过流值  
GB-XXX B 相过流值； GC-X X X C 相过流值

微机保护装置的整定值代码如下：

- 01: 过流保护动作延迟时间
- 02: 重合闸动作延迟时间
- 03: 过电流整定值
- 04: 过流保护投切选择
- 05: 重合闸投切选择

另外，短路时间  $T_D$  由面板上“短路时间”继电器整定，具体整定参数为表 4-1。

表 4-1

整定值代码	01	02	03	04	05	$T_D$
整定值	0.5 (s)	/	5.00(A)	On	Off	1.0(s)

微机保护装置的整定方法如下：按压“画面切换”按钮，当数码管显示 [PA - ] 时，按压触摸按钮“+”或“-”输入密码，待密码输入后，按下按键“ $\Delta$ ”，如果输入密码正确，就会进入整定值修改画面。进入整定值修改画面后，通过“ $\Delta$ ”“7”先选 01 整定项目，再按压触摸按钮“+”或“-”选择当保护时间 (S)；通过“ $\Delta$ ”“V”选 03 整定项目，再按压触摸按钮“+”或“-”选择当过电流保护值；通过“ $\Delta$ ”“V”选 04 整定项目，再按压触摸按钮“+”或“-”选择当过电流保护投切 ON；通过“ $\Delta$ ”选 05 整定项目，再按压触摸按钮“+”或“-”选择重合闸投切为 OFF。（详细操作方法 WDT - I11 综合自动化试验台使用说明书。）

表 4-2 短路切除时间  $t = 0.5s$  短路类型：单相接地短路

接线方式	QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6
方式一	1	1	1	1	1	1
方式二	1	1	1	1	0	1

(0: 表示对应线路开关断开状态 1: 表示对应线路开关闭合状态)

表 4-3 方式一 短路切除时间  $t = 0.5s$

参数 运行状态		$P_1$	$Q_1$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_{max} (W)$	最大短路 电流 (A)
		全相运行的稳态值						
短路 故障 类型	A 相短路接地	0.5	0					
		1	0					
	B 相短路接地	0.5	0					
		1	0					
	C 相短路接地	0.5	0					
		1	0					
	AB 两相短路	0.5	0					
		1	0					
	BC 两相短路	0.5	0					
		1	0					
	AC 两相短路	0.5	0					
		1	0					
AB 两相短路 接地	0.5	0						
	1	0						
BC 两相短路 接地	0.5	0						
	1	0						
AC 两相短路 接地	0.5	0						
	1	0						
三相短路	0.5	0						
	1	0						

2. 故障切除时间对暂态稳定的影响

固定短路地点，短路类型和系统运行条件，通过调速器的增速按钮增加发电机向电网的出力，在测定不同故障切除时间能保持系统稳定时发电机所能输出的最大功率，分析故障切除时间对暂态稳定的影响。

一次接线方式： QF1=1 QF2=1 QF3=1  
QF4=1 QF5=0 QF6=1

表 4-5 短路类型：

过流保护动作时间	$P_{max} (W)$	$I_{dl}$ 最大短路电流 (A)
0.5(s)		
1.0(s)		
1.5(s)		

例：QF1=0 QF2=1 QF3=1 QF4=1 QF5=1 QF6=1  
QF1=1 QF2=1 QF3=0 QF4=1 QF5=1 QF6=1

(二) 研究提高暂态稳定的措施

1. 强行励磁

在微机励磁方式下短路故障发生后，微机将自动投入强励以提高发电机。

在微机励磁方式下短路故障发生后，微机将自动投入强励以提高发电机电势。观察

它对提高暂态稳定的作用。

表 4-4 方式二 短路切除时间  $t = 0.5s$

参数 运行状态		$P_1$	$Q_1$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_{max} (W)$	最大短路 电流 (A)
		全相运行的稳态值						
短路 故障 类型	A 相短路接地	0.5	0					
		1	0					
	B 相短路接地	0.5	0					
		1	0					
	C 相短路接地	0.5	0					
		1	0					
	AB 两相短路	0.5	0					
		1	0					
	BC 两相短路	0.5	0					
		1	0					
	AC 两相短路	0.5	0					
		1	0					
	AB 两相短路 接地	0.5	0					
		1	0					
	BC 两相短路 接地	0.5	0					
		1	0					
	AC 两相短路 接地	0.5	0					
		1	0					
三相短路	0.5	0						
	1	0						

## 2. 单相重合闸

在电力系统的故障中大多数是送电线路（特别是架空线路）的“瞬时性”故障，除此之外也有“永久性故障”。

在电力系统中采用重合闸的技术经济效果，主要可归纳如下：

- ①大提高供电可靠性；
- ②高电力系统并列运行的稳定性；
- ③对继电保护误动作而引起的误跳闸，也能起到纠正的作用。

对瞬时性故障。微机保护装置切除故障线路后，经过延时一定时间将自动重合原线路，从而恢复全相供电，提高了故障切除后的功率特性曲线。同样通过对操作台上的短路按钮组合，选择不同的故障相。

通过调速器的增（减）速按钮调节发电机向电网的出力，观察它对提高暂态稳定的作用，观察它对提高暂态稳定的作用。

其故障的切除时间在微机保护装置中进行修改，同时要设定进行重合闸投切，并设定其重合闸时间。其操作步骤同上，不同的是在 05 整定项目时，按压触摸按钮“+”或“-”选择投合闸投切 on，并选 02 整定项目时，按压触摸按钮“+”或“-”设定重合闸动作延时时间。瞬时故障时间由操作台上的短路时间继电器设定，当瞬时故障时间小于保护动作时间时保护不会动作；当瞬时故障时间大于保护动作时间而小于重合闸

时间，能保证重合闸成功，当瞬时故障时间大于重合闸时间，重合闸后则认为线路为永久性故障加速跳开整条线路。

表 4—6

整定值代码	01	02	03	04	05	$T_D$
保护不动作	0.2	1.5	5.00	on	On	0.1
重合闸	0.2	1.5	5.00	on	On	1.0
永久故障	0.2	1.5	5.00	on	on	3.0

### （三）异步运行和再同步的研究

1. 在发电机稳定异步运行时，观察并分析功率，发电机的转差，振荡周期及各表的读数变化的特点。

2. 在不切除发电机的情况下，研究调节原动机功率，调节发电机励磁对。

注意事项：

1. 在做单相重合闸实验时，进行单相故障操作的时间应该在接触器合闸 10 秒之后进行，否则，在故障发生时跳三相，微机保护装置会显示“GL-X X X”，且不会进行重合闸操作。

2. 实验结束后，通过励磁装置使无功至零，通过调速器使有功至零，解列之后按下调速器的停机按钮使发电机转速至零。跳开操作台所有开关之后，方可关断操作台上的电源关断开关，并断开其他电源开关。

3. 对失步处理的方法如下：通过励磁调节器增磁按钮，使发电机的电压增大；如系统没处于短路状态，且线路有处于断开状态的，可并入该线路减小系统阻抗；通过调速器的减速按钮减小原动机的输入功率。

## 四、实验报告要求

1. 整理不同短路类型下获得实验数据，通过对比，对不同短路类型进行定性分析，详细说明不同短路类型和短路点对系统的稳定性的影响。

2. 通过试验中观察到的现象，说明二种提高暂态稳定的措施对系统稳定性作用机理。

## 五、思考题

1. 不同短路状态下对系统阻抗产生影响的机理是什么？
2. 提高电力系统暂态稳定的措施有哪些？
3. 对失步处理的方法（注意事项 3 中提到）的理论根据是什么？
4. 自动重合闸装置对系统暂态稳定的影响是什么？

## 录一：WDT-III型电力系统综合自动化试验装置简介

电力系统综合自动化实验台是一个自动化程度很高的多功能实验平台，它由发电机组、实验操作台、无穷大系统等设备组成。如附图1所示，发电机与无穷大之间采用双回路输电线路，并设有中间开关站，通过中间开关站和单回、双回线路的组合，使发电机与无穷大系统之间可构成四种不同联络阻抗，供系统实验分析比较时使用（如第三章图2所示）。



附图1 电力系统综合自动化试验台外形图

### 1. 发电机组

它是由同在一个轴上的三相同步发电机（ $S_N=2.5\text{kVA}$ ， $V_N=400\text{V}$ ， $n_N=1500\text{r.p.m}$ ），模拟原动机用的直流电动机（ $P_N=2.2\text{kW}$ ， $V_N=220\text{V}$ ）以及测速装置和功率角指示器组成。直流电动机、同步发电机经弹性联轴器对轴联结后组装在一个活动底盘上构成可移动式机组。具有结构紧凑、占地少、移动轻便等优点，机组的活动底盘有四个螺旋式支脚和三个橡皮轮，将支脚旋下即可开机实验。

### 2. 试验操作台

它是由输电线路及保护单元、功率调节和同期单元，仪表测量和短路故障模拟单元等组成。

输电线路采用具有中间开关站的双回路输电线路模型，并对其中一段线路设有“YHB-III型微机保护”，此线路的过流保护还具有单相自动重合闸功能。功率调节和同期单元，由“TGS-04型微机调速装置”、“WL-04B微机励磁调节器”、“HGWT-03微机准同期装置”等微机型的自动装置和其相对应的手动装置组成。

仪表测量和短路故障模拟单元由各种测量表计及其切换开关、各种带灯操作按钮以及观测波形用的测试孔和各种类型的短路故障操作等部分组成。在做电力系统试验时，

全部的操作均在试验操作屏台上进行。

### 3. 无穷大系统

无穷大电源是由15kVA 的自耦调压器组成。通过调整自耦调压器的电压可以改变无穷大母线的电压。

试验操作台的“操作面板”上有模拟接线图、操作按钮和切换开关以及指示灯和测量仪表等。操作按钮与模拟接线图中被操作的对象结合在一起，并用灯光颜色表示其工作状态，具有直观的效果。红色灯亮表示开关在合闸位置，绿色灯亮表示开关在分闸位置。

本试验装置主要是为开设与电力系统运行(稳态及暂态)有关的教学实验而设计的。虽然试验装置中的发电机、原动机、励磁系统及输电线路，并未按与大型实际电力系统的相似条件来，进行物理仿真，然而，它们不失为一个真实的“一机一无穷大”的简单电力系统，并且可以定性地、反复地、直观地实验，观测实际电力系统的各种运行状态，而且由于小型发电机与大型发电机参数(标么值)的差别。在实验中可以观测与教科书中对大型发电机所作的分析差别，这更有利于引导学生进行思考，从而进一步加深对电力系统运行状态特性的理解，也有利于培养学生的科学思维能力，有利于对学生进行实际操作和实验研究能力的培训和训练。

## 附录二：同步发电机组启动和建压操作简介

实验前首先检查WDT-III型电力系统综合自动化试验台、同步发电机组、感应调压器是否具备开机条件，符合要求后合试验台上“操作电源”开关，此时反映各开关位置的绿色指示灯亮，同时4台微机装置上电，数码管均能正确显示。

### 1. 开机方式选择

在试验台的“TGS-04型微机调速装置”中有三种开机方式供选择，即“模拟方式”、“微机自动方式”、“微机手动方式”。

(1) 当选择“模拟方式”时，应首先将指针电位器调至零，此时“输出零”指示灯亮，然后合上“原动机开关”再顺时针旋转指针电位器，当发电机旋转之后，应观察机组稳定情况，然后缓慢加速到额定转速。

(2) 当选择“微机自动方式”时，先合上“原动机开关”，然后按下“停机/开机”按钮，此时“开机”指示灯亮，“停机”指示灯灭，发电机组自动增速到额定转速。

(3) 当选择“微机手动方式”时，先合上“原动机开关”，然后按下“停机/开机”按钮，指示灯同样对应转换，按下“增速”按钮，可以看到控制量的大小，监视发电机转速，直至将发电机调整为额定转速。

### 2. 励磁方式选择

在试验台上有一个“励磁方式”切换开关，它可选择三种励磁方式，即“手动励磁方式”、“微机它励方式”、“微机自并励方式”。

(1) 当选择“手动励磁方式”时，应先将“手动励磁”调节旋钮反时针旋到零，然后合上“励磁开关”，顺时针调节“手动励磁”旋钮增加励磁电压，在维持发电机为额定频率时，增加励磁电压，使发电机为额定电压。

(2) 当选择“微机它励”或“微机自并励”时，微机励磁调节器选择“恒 $U_F$ ”运行方式，然后合上“励磁开关”，松开“灭磁”按钮，调节器自动起励至给定电压。

### 3. 无穷大电流和线路开关操作

(1) 合上无穷大电源“系统开关”。观察“系统电压”表是否为实验要求值，调整自耦调压器的把手，顺时针增大或逆时针减少输出至无穷大母线的电压，调整到实验

的要求值（一般为380V）

（2）合上线路开关“QF1”和“QF3”则发电机的母线上得电，此时可以从微机准同期控制器上观察到系统的频率和电压，同时也能看到发电机的频率和电压。

#### 4. 同期方式选择

在试验台上有一个“同期方式”切换开关，它提供三种同期方式供选择，即“手动同期方式”、“全自动同期方式”、“半自动同期方式”。

（1）当“同期方式”选择为“手动”方式时，则“发电机开关”两侧的电压施加到“同期表”上，根据“同期表”中的“电压差”和“频率差”调整发电机的转速和电压，使之接近为零。然后，在“相角差”趋向零时的“导前角”时间合闸，即发电机与系统并列。

（2）当“同期方式”选择为“全自动”方式时，然后按下“微机准同期控制器”上的“同期命令”，则发电机“调频”、“调压”和“合闸出口”均由微机准同期控制器完成。

（3）当“同期方式”选择为“半自动”方式时，则准同期控制器通过指示灯的亮或者熄，指示实验人员进行“升压”、“降压”、“增速”、“减速”操作。当合闸条件满足时，准同期控制器发出合闸命令，实现同步发电机同期并列操作。

说明：有关实验中的接线方式改变及操作位置、参数整定等，以及注意事项，在《WDT-III电力系统综合自动化试验台使用说明书》中已作了说明，这里不再赘述。学生在实验前，必须先认真阅读该《使用说明书》方可进行实验。