

# 《电气工程基础》实验指导书

## 目 录

前 言.....	2
<b>第一部分：电力系统综合实验注意事项</b>	
一、 电工操作安全守则.....	3
二、 学生实验守则.....	4
<b>第二部分：实验内容</b>	
一、 电力系统设备认识实验.....	5
二、 电力系统功率特性和功率极限实验	
2. 1 无调节时功率特性和功率极限的测定.....	8
2. 2 手动、全自动调节励磁时，功率特性和功率极限的测定.....	9
2. 3 全自动调节励磁时，功率特性和功率极限的测定.....	10
三、 电力系统暂态稳定分析实验	
3. 1 短路对电力系统暂态稳定的影响.....	15
3. 2 研究提高暂态稳定的方法.....	17

## 前 言

实践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，它对于学生综合素质的培养具有不可替代的作用，尤其是对于学生创新能力的培养，具有其独特的地位和作用。

本实验讲义根据加强实践教学环节、拓宽专业知识面的教学改革的需要而编写的专业综合实验讲义，包含三个部分：电力系统综合实验守则、实验内容和附录。在电力系统综合实验守则中我们重点电工操作安全守则和学生操作注意事项，在实验内容这部分，主要详细给出了每个实验的操作步骤、分析方法和实验要求等等。最后在附录部分，就该实验中用到的设备做简单的说明，便于参考。

本讲义内容的编写是在该实验设备指导说明书的基础上进行必要的改进，以便于适应学生的理解的同时力求深入浅出，理论联系实际，注重学生的动手能力，并且具有重点突出，层次分明，逻辑性强，便于自学。

# 第一部分：电力系统综合实验守则

## 一 电工操作安全守则

1. 使用动力电时，应先检查电源开关、电机和设备各部分是否良好。如有故障，应先排除后，方可接通电源。

2. 启动或关闭电器设备时，必须将开关扣严或拉妥，防止似接非接状况。使用电子仪器设备时，应先了解其性能，按操作规程操作，若电器设备发生过热现象或有焦糊味时，应立即切断电源。

3. 人员较长时间离开房间或电源中断时，要切断电源开关，尤其要注意切断加热电器设备的电源开关。

4. 电源或电器设备的保险烧断时，应先查明烧断原因，排除故障后，再按原负荷选用适宜的保险丝进行更换，不得随意加大或用其它金属线代用。

5. 注意保持电线和电器设备的干燥，防止线路和设备受潮漏电。

6. 实验室内不应有裸露的电线头；电源开关箱内，不准堆放物品，以免触电或燃烧。

7. 实验时先接好线路，再插上电源，实验结束时必须先切断电源，再拆线路。

8. 要警惕实验室内发生电火花或静电，尤其在使用可能构成爆炸混合物的可燃性气体时，更需注意。如遇电线走火，切勿用水或导电的酸碱泡沫灭火器灭火，应切断电源，用沙或二氧化碳灭火器灭火。

9. 没有掌握电器安全操作的人员不得擅自移动电器设施，或随意拆修电器设备。

10. 使用高压动力电时，应遵守安全规定，穿戴好绝缘胶鞋、手套，或用安全杆操作。

11. 有人触电时，应立即切断电源，或用绝缘物体将电线与人体分离后，再实施抢救。

实验示范中心

## 二 学生实验守则

1. 进入实验室要遵守实验室各项规章制度，保持安静，不准吸烟和随地吐痰，不乱丢纸屑和杂物。
2. 不得乱动与本实验无关的仪器设备，实验中要遵守操作规程，注意安全，以免损坏设备。
3. 实验前，要认真阅读实验指导和复习有关理论内容，了解实验目的、内容及步骤，接受教师提问和检查。
4. 准备就绪，必须经指导教师同意，方可动用仪器设备，如对设备使用有疑问，应及时向指导教师提出，不得自行摆弄。实验中如出现事故应立即向指导教师报告，并停机检查原因，保护现场。
5. 实验中要严肃认真，细心观察，记录实验数据，实验完毕须将实验结果交指导教师审阅通过。
6. 如由于违反操作规程而造成仪器设备损坏，按《仪器设备管理办法》有关规定处理。

电气工程课程组

## 第二部分 实验内容

### 实验一 电力系统及自动化综合试验系统基本操作实验

#### 一、适用专业

电气工程及自动化专业、自动化专业

#### 二、计划学时

3 学时

#### 三、实验目的

1. 熟悉该综合试验台的组成部分和基本特点。
2. 掌握该实验设备的基本操作。

#### 四、实验设备

1. WDT-III 电力系统综合自动化试验台。
2. PS-5G 型电力系统微机监控试验系统。

#### 五、实验预习

1. 认真阅读 WDT-III 电力系统综合自动化试验台和 PS-5G 型电力系统微机监控试验系统的使用说明书
2. 研读电力系统有关方面的书籍。

#### 六、实验步骤和数据记录

##### 实验 1.1 试验台组成设备的熟悉。

请参考 WDT-III 电力系统综合自动化试验台说明书和 PS-5G 型电力系统微机监控试验系统。

##### 实验 1.2 该实验系统基本操作

请参考 WDT-III 电力系统综合自动化试验台说明书和 PS-5G 型电力系统微机监控试验系统说明书。

#### 七、实验报告要求

1. 简单说明该系统基本组成原理。
2. 比较各种开机和停机方法的相同和不同点。

#### 八、思考题

1. YHB-III 型微机线路保护装置的工作原理是什么？
2. TGS-04 型微机调速装置的工作原理是什么？
3. WL-04B 微机励磁调节器的工作原理是什么？
4. HGWT-03 微机准同期控制装置的工作原理是什么？

## 实验二 电力系统功率特性和功率极限实验

### 一、适用专业

电气工程及自动化专业、自动化专业

### 二、计划学时

3 学时

### 三、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. 加深理解功率极限的概念，在实验中体会各种提高功率极限措施的作用；
3. 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。

### 四、实验设备

1. WDT-III 电力系统综合自动化试验台

### 五、实验原理

#### (一) 发电机的功率特性方程

发电机输出的电磁功率和功率角的关系，称为发电机的功率特性。这是分析电力系统稳定性问题的一个重要方法。

#### 1. 隐极式发电机的功率特性方程

隐极式发电机的转子是对称的，因而它的纵轴同步电抗和横轴同步电抗是相等的，当不计各元件的电阻及对地导纳支路时，发电机至系统总电抗为  $X_{d\Sigma}$ 。

①以空载电动势和同步电抗表示的功率特性方程

$$P_{Eq} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (5-1)$$

当发电机与无限大容量母线相连时，母线电压  $U$  定值，如果发电机有自动调节励磁装置，并保持  $E_q$  定值，则式 (5-1) 中将只有一个变量——功率角  $\delta$ ，可做出发电机的功率特性曲线，如图 5-1 所示。

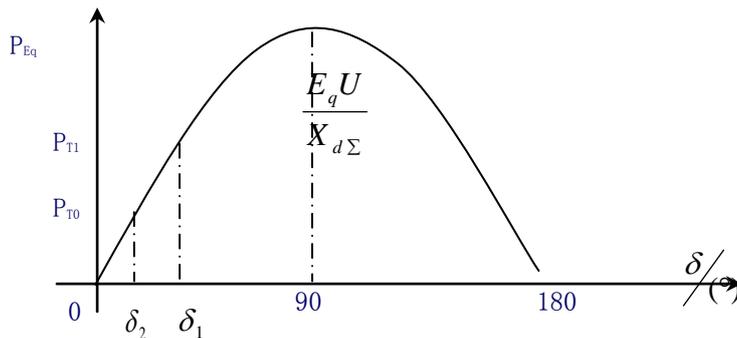


图 2-1 发电机的功率特性曲线

由图可见，发电机功率特性曲线为一正弦曲线，其最大值为  $P_{Eq-\max} = E_q U / X_{d\Sigma}$ ，也称功率极限。

功率角  $\delta$  在电力系统稳定问题的研究中占有特别重要的地位。它除了表示电动势  $\dot{E}_q$  和电压  $\dot{U}$  之间的相位差，即表征系统的电磁关系之外，还表示了各发电机转子之间的相对空间

位置。 $\delta$ 角随时间的变化描述了各发电机转子间的相对运动。如两个发电机电气角速度相同，则 $\delta$ 角保持不变。如增大送端发电机的原动机功率，使 $P_1 > P_0$ ，则由于发电机转子上的转子平衡遭到破坏，发电机转子加速，发电机转子间的相对空间位置便要发生变化，功率角 $\delta$ 增大，直至达到新的平衡点。

②以暂态电动势和暂态电抗表示的功率特性方程

在分析暂态稳定或近似地分析某些有自动调节励磁装置的静态稳定时，往往以横轴暂态电动势 $E'_q$ 和纵轴暂态电抗 $X'_d$ 表示发电机。在这种情况下功率特性方程为：

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \left( \frac{X_{d\Sigma} - X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta \quad (5-2)$$

当发电机与无限大容量母线相连时， $U$ =定值，且发电机装有自动调节励磁装置，并能保持 $E'_q$ =定值。取不同的 $\delta$ 值代入式（6-8）中，可绘制出这种情况下发电机的功率特性曲线。

由于纵轴暂态电抗和其同步电抗不等，即 $X'_{d\Sigma} \neq X_{d\Sigma}$ ，出现了一个按两倍功率角正弦 $\sin 2\delta$ 变化的功率分量，一般称暂态磁阻功率。由于它的存在，使功率特性曲线发生了畸变，而使功率极限略有增加，并出现在功率角大于 $90^\circ$ 处。

2. 凸极式发电机的功率特性方程

如发电机为凸极机，则其纵轴和横轴同步电抗不相等。当不计各元件的电阻及对地导纳时，发电机至系统d轴总电抗为 $X_{d\Sigma}$ ，q轴总电抗为 $X_{q\Sigma}$ 。

①以空载电动势和同步电抗表示的功率特性方程

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \right) \sin 2\delta \quad (5-3)$$

对于无自动励磁调节装置的发电机与无限大容量系统相连时，则有 $E_q$ =定值， $\dot{U}$ =定值。由于纵横轴同步电抗不相等 $X_{d\Sigma} \neq X_{q\Sigma}$ ，出现了一个按两位功率角的正弦 $\sin 2\delta$ 变化的功率分量。即为磁阻功率。由于磁阻功率的存在使功率特性曲线畸变，从而使功率极限有所增加，但这时功率极限出现在功率角小于 $90^\circ$ 处。

②以暂态电动势和暂态电抗表示的功率特性方程

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \left( \frac{X_{q\Sigma} - X'_{d\Sigma}}{X_{q\Sigma} X'_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta \quad (5-4)$$

(二) 简单电力系统的功率特性

1. 简单电力系统的功率特性方程

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。

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：

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \times \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (5-5)$$

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：

$$P'_{Eq} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \times \frac{X'_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X'_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (5-6)$$

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

这时功率极限为

$$P'_{Em} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \quad (5-7)$$

## 2. 提高功率极限的措施

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：①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②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③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。

## 六、实验预习

1. 预习发电机的功率特性方程；提高功率极限的措施；
2. 预习简单电力系统的功率特性方程的分析；

## 七、实验步骤和数据记录

### 实验 2.1 无调节励磁时功率特性和功率极限的测定

1. 网络结构变化对系统静态稳定的影响（改变  $x$ ）

在相同的运行条件下（即系统电压  $U_\infty$ 、发电机电势保持  $E_q$  保持不变，即并网前  $U_\infty = E_q$ ），测定输电线单回线和双回线运行时，发电机的功一角特性曲线，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) 输电线路为单回线；
- (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；
- (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 2-1 中；
- (6) 输电线路为双回线，重复上述步骤，填入表 2-2 中。

表 2-1 单回线

$\delta$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
$I_A$	0									
$U_Z$										
$U_F$										
$I_{fd}$										
Q	0									

表 2-2 双回线

$\delta$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
$I_A$	0									
$U_Z$										
$U_F$										
$I_{fd}$										
Q	0									

注意:

(1) 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。

(2) 当系统失稳时, 减小原动机出力, 使发电机拉入同步状态。

2. 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) 输电线为单回线, 并网前  $E_q < U_x$ ;
- (2) 发电机与系统并列后, 调节发电机使其输出有功功率为零;
- (3) 逐步增加发电机输出的有功功率, 而发电机不调节励磁;
- (4) 观察并记录系统中运行参数的变化, 填入表 2-3 中;
- (5) 输电线为单回线, 并网前  $E_q > U_x$ , 重复上述步骤, 填入表 2-4 中

表 2-3 单回线 并网前  $E_q < U_x$

$\delta$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
$I_A$	0									
$U_Z$										
$U_F$										
$I_{fd}$										
Q	0 <sup>-</sup>									

表 2-4 单回线 并网前  $E_q > U_x$

$\delta$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
$I_A$	0									
$U_Z$										
$U_F$										
$I_{fd}$										
Q	0 <sup>+</sup>									

实验 2.2 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



U <sub>Z</sub>										
U <sub>F</sub>										
I <sub>fd</sub>										
Q	0									

2. 微机它励（恒流或恒压控制方式），实验步骤自拟。

表 2-9 单回线 微机它励方式

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I <sub>A</sub>	0									
U <sub>Z</sub>										
U <sub>F</sub>										
I <sub>fd</sub>										
Q	0									

表 2-10 双回线 微机它励方式

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I <sub>A</sub>	0									
U <sub>Z</sub>										
U <sub>F</sub>										
I <sub>fd</sub>										
Q	0									

**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速至零。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。

**八、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。

**九、思考题**

1. 功率角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δ的关系和简单系统的功一角特性有什么区别？
3. 自并励和它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？

## 实验三 电力系统暂态稳定实验

### 一、适用专业

电气工程及自动化专业、自动化专业

### 二、计划学时

3 学时

### 三、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。

### 四、实验设备

1. WDT-III 电力系统综合自动化试验台

2. PS-5G 型电力系统微机监控试验系统

### 五、实验原理

#### (一) 电力系统暂态稳定性概念

电力系统具有静态稳定, 说明在受到微小干扰时, 具有自动恢复原来状态的能力。而当发电机受到大的干扰时(比如发生短路故障、切除大容量的发电机、输电或变电设备等), 能否继续保持同步运行, 就属于暂态研究的问题了。

电力系统遭受大的扰动后, 由于系统的结构和参数发生了较大的变化, 因而系统的功率分布及各发电机输出的电功率也随之发生突然的变化。但是, 由于原动机和调速机构有一定的惯性, 需要经过一定的时间以后才能改变原动机输出的机械功率, 这样就破坏了发电机与原动机之间的功率平衡, 在发电机组的转轴上便会出现不平衡转矩。当发电机输出的电功率突然减小时, 发电机组转子就要加速, 转速逐渐升高。当发电机的输出电功率突然增大时, 发电机组转子就要减速, 转速逐渐降低。由于电力系统中各发电机转子转动惯量不一样, 因而各机组轴上的不平衡转矩变化情况也不一样。因此, 将会在各发电机转子之间产生不同的相对运动。

电力系统遭受大的扰动以后, 产生两种不同的后果。一种是暂态过程逐渐衰减, 系统各发电机组之间相对运动逐渐消失, 使系统过渡到一个新的稳态运行状态, 各发电机仍然可以保持同步运行, 此时, 电力系统是暂态稳定的; 另一种后果是在暂态过程中某些发电机之间的相对角度随时间不断增大, 它们之间始终存在着相对转速。因此, 会产生系统功率和电压的剧烈振荡, 使一些发电机和负荷不能继续运行甚至导致系统解列, 此时, 各发电机运行失去了同步, 电力系统是暂态不稳定的。

#### (二) 等面积定则

在正常运行情况下, 若原动机输入功率为  $P_1=P_0$ , 如图 6-1 所示, 发电机的工作点为点 a, 与此对应的功率角为  $\delta_0$ 。

短路瞬间, 发电机的工作点应在短路时的功率特性  $P_{11}$  上。由于转子具有惯性, 功率角不能突变, 发电机输出的电磁功率(即工作点)应由  $P_{11}$  上对应于  $\delta_0$  的点 b 确定, 设其值为  $P_{(0)}$ 。这时原动机的功率  $P_1$  仍保持不变, 于是出现了过剩功率  $\Delta P_{(0)} = P_1 - P_E = P_0 - P_{(0)} > 0$ , 它是加速性的。

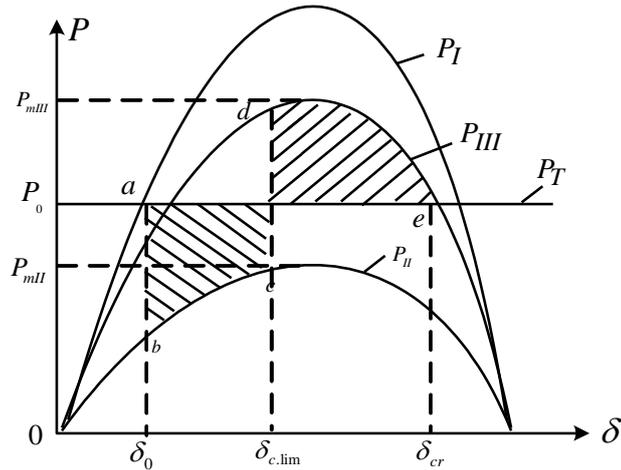


图 3-1 功率特性曲线

在加速性的过剩功率作用下，发电机获得加速，使其相对速度 $\Delta\omega = \omega - \omega_k > 0$ ，于是功率角 $\delta$ 开始增大。发电机的工作点将沿着 $P_{II}$ 由 $b$ 向 $c$ 移动。在变动过程中，随着 $\delta$ 的增大，发电机的电磁功率也增大，过剩功率则减小，但过剩功率仍是加速性的，所以， $\Delta\omega$ 不断增大。

如果在功率角为 $\delta$ 时，故障线路被切除，在切除瞬间，由于功率角不能突变，发电机的工作点便转移到 $P_{III}$ 上对应于 $\delta$ 的点 $d$ 。此时，发电机的电磁功率大于原动机的功率，过剩功率 $\Delta P_e = P_e - P_m < 0$ ，变成减速性的了。在此过剩功率作用下，发电机转速开始降低，虽然相对速度 $\Delta\omega$ 开始减小，但它仍大于零，因此功率角继续增大，工作点将沿 $P_{III}$ 由点 $d$ 向 $f$ 变动。发电机则一直受到减速作用而不断减速。

如果到达点 $f$ 时，发电机恢复到同步速度，即 $\Delta\omega = 0$ ，则功率角 $\delta$ 抵达它的最大值 $\delta_{max}$ 。虽然此时发电机恢复了同步，但由于功率平衡尚未恢复，所以不能在点 $f$ 确立同步运行的稳态。发电机在减速性不平衡转矩的作用下，转速继续下降而低于同步速度，相对速度改变符号，即 $\Delta\omega < 0$ ，于是功率角 $\delta$ 开始减小，发电机工作点将沿 $P_{III}$ 由点 $f$ 向点 $d$ 、 $s$ 变动。

在转子的角度从 $\delta$ 摇摆到 $\delta$ 的过程中，由于过剩功率的存在，使转子动能增加，它在数值上等于过剩功率对功率角的积分，即图 7-1 中由 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $e$ 所围成的面积，通常称之为“加速面积”，它既代表转子在加速过程中储存的动能，又等于过剩转矩对转子所做的功，以 $W_+$ 表示，则有

$$W_+ = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{mI} \sin \delta) d\delta \quad (6-1)$$

与加速面积对应，在图 7-1 中由 $e$ 、 $d$ 、 $f$ 、 $g$ 围成的面积称为“减速面积”，它既代表转子在减速过程中所消耗的动能，又等于减速性的过剩转矩所做的功，以 $W_-$ 表示，则有

$$W_- = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta \quad (6-2)$$

在减速期间，当发电机转子耗尽了它在加速期间所储存的全部动能增量时， $\Delta\omega = 0$ ，它的功率角达到最大值 $\delta_{max}$ ，显然， $\delta_{max}$ 可由下式决定：

$$W_+ + W_- = 0$$

$$\text{即} \quad \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{mI} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta = 0 \quad (6-3)$$

在图 7-1 中，最大可能减速面积显然等于由 $e$ 、 $d$ 、 $s'$ 所围成的面积。如果最大可能减速面积小于加速面积，则系统必定失去稳定。所以，根据最大可能减速面积必须大于加速面积的原则，可以判断电力系统是否具有暂态稳定性。从图 7-1 还可以看出，故障切除角 $\delta$ 愈小，加速面积就愈小，最大可能减速面积就愈大，保持系统稳定的可能性也就愈大。反之，故障切除角 $\delta$ 愈大，加速面积就愈大，最大可能减速面积就愈小，保持暂态稳定就愈困难。

因此，总可以找到一个切除角，当在此角度下切除短路故障时，恰好使最大可能减速面积同加速面积相等，这时系统将处于稳定的极限情况，通常称此切除角为极限切除角。

### （三）实验原理及提高系统的稳定性分析

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。在各种扰动中以短路故障的扰动最为严重。

正常运行时发电机功率特性为： $P_1 = (E_0 \times U_0) \times \sin\delta_1 / X_1$ ；

短路运行时发电机功率特性为： $P_2 = (E_0 \times U_0) \times \sin\delta_2 / X_2$ ；

故障切除发电机功率特性为： $P_3 = (E_0 \times U_0) \times \sin\delta_3 / X_3$ ；

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 $X_2$ 不同，同时切除故障线路不同也使 $X_3$ 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 $E_0$ 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。

## 六、实验预习

1. 预习电力系统暂态稳定性概念；
2. 预习等面积定则

## 七、实验步骤和数据记录

### 实验 6.1 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，测定不同短路运行时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-III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-xxx 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 3-1。

表 3-1

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“△”，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“△”“▽”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“△”“▽”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“△”“▽”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“△”“▽”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-III 综合自动化试验台使用说明部分。）

表 3-2 短路切除时间  $t=0.5s$  短路类型：单相接地短路

QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6	$P_{max}$ (W)	最大短路电流 (A)
1	1	1	1	0	1		
0	1	0	1	0	1		
1	1	0	1	1	1		
0	1	1	1	1	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 3-3 短路切除时间  $t=0.5s$  短路类型：两相相间短路

QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6	$P_{max}$ (W)	最大短路电流 (A)
1	1	1	1	0	1		
0	1	0	1	0	1		
1	1	0	1	1	1		
0	1	1	1	1	1		

表 3-4 短路切除时间  $t=0.5s$  短路类型：两相接地短路

QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6	$P_{max}$ (W)	最大短路电流 (A)
1	1	1	1	0	1		
0	1	0	1	0	1		
1	1	0	1	1	1		
0	1	1	1	1	1		

表 3-5 短路切除时间  $t=0.5s$  短路类型：三相短路

QF1	QF2	QF3	QF4	QF5	QF6	$P_{max}$ (W)	最大短路电流 (A)
1	1	1	1	0	1		
0	1	0	1	0	1		
1	1	0	1	1	1		
0	1	1	1	1	1		

## 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 3-6 短路类型：

过流保护动作时间	$P_{max}$ (W)	$I_{d1}$ 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

## \*实验 3. 2 研究提高暂态稳定的方法（选做）

### 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电势。观察它对提高暂态稳定的作用。

### 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 3-7

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

**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-xxx”，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。

**八、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。

**九、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？