

电力系统综合实验 A

实验指导书

华北电力大学

二零零八年三月

前 言

1. 实验总体目标

该课是为了适应现代化电力系统对“复合型”高级技术人才的需要而设置的一个教学环节。通过该环节的学习，可以帮助学生进一步认识电力系统的各种物理现象并增强对电力系统相关课程理论的理解；可以培养学生的实际操作能力，分析问题和解决问题的能力。

2. 适用专业

电气工程及其自动化专业各方向、电力工程与管理专业

3. 先修课程

电路理论、电机学、线性代数、自动控制理论 B、电力系统分析基础、电力系统暂态分析、电力系统稳定

4. 实验课时分配

实验项目	学时
实验一 同步发电机准同期并列实验	2 天
实验二 单机一无穷大系统稳态运行方式实验	2 天
实验三 电力系统功率特性和功率极限实验	2 天
实验四 电力系统暂态稳定实验	2 天
实验五 复杂电力系统运行方式实验	2 天

5. 实验环境

- (1) WDT-III 型电力系统综合自动化实验台，三台；
- (2) PS-5G 型电力系统微机监控实验台，一台；
- (3) 打印机一部。

6. 实验总体要求

- (1) 对教师的要求：
 - 1) 教师要自己动手做所有的实验；
 - 2) 在实验开始的前一周，指导实验的教师要将与实验有关的文件上传到校园网的电子课堂，并通知学生下载；
 - 3) 实验开始前，给学生讲实验的任务，纪律要求，实验要求等。
- (2) 对学生的要求：
 - 1) 实验前要预习实验内容；
 - 2) 实验时遵守实验室的规章制度，不要违反实验设备的操作规程；
 - 3) 认真做记录和观察实验现象，实验后整理数据，分析原因，回答思考题。

7. 本实验的重点、难点及教学方法建议

五个实验内容都是重点。

难点是学生不能把理论课的知识转化为实践操作以及对实验数据的分析。

对教学方法的建议：将课堂知识与实验内容联系起来，启发学生积极思考，用于动手做实验，自己设计一些实验方案。

目录

实验一	同步发电机准同期并列实验	4
实验二	单机一无穷大系统稳态运行方式实验	8
实验三	电力系统功率特性和功率极限实验	11
实验四	电力系统暂态稳定实验	15
实验五	复杂电力系统运行方式实验	19

实验一 同步发电机准同期并列实验

一、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. 掌握微机准同期控制器及模拟式综合整步表的使用方法；
3. 熟悉同步发电机准同期并列过程；

二、实验类型

综合型

三、实验仪器

WDT-III 型电力系统综合自动化实验台。

四、实验原理

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。

五、实验内容和要求

(一) 机组启动与建压

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，检查实验台上各开关状态：各开关信号灯应绿灯亮、红灯熄。调速器上“并网”灯和“微机故障”灯均为熄灭状态，“输出零”灯亮；
3. 按调速器上的“微机方式自动/手动”按钮使“微机自动”灯亮；
4. 励磁调节器选择它励、恒 UF 运行方式，合上励磁开关；
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，调速器将自动启动电动机到额定转速；
8. 当机组转速升到 95% (47.5Hz) 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。

(二) 观察与分析

1. 操作调速器上的“增速”或“减速”按钮调整机组转速，记录微机准同期控制器显示的发电机和系统频率。观察并记录旋转灯光整步表上灯光旋转方向及旋转速度与频差方向及频差大小的对应关系；
2. 将“同期方式”旋钮旋转至“手动”方式，观察并记录不同频差方向，不同频差大小时的模拟式整步表的指针旋转方向及旋转速度、频率平衡表指针的偏转方向及偏转角度的大小的对应关系；
3. 操作励磁调节器上的“增磁”或“减磁”按钮调节发电机端电压，观察并记录不同电压差方向、不同电压差大小时的模拟式电压平衡表指针的偏转方向和偏转角度的大小的对应关系；
4. 调节转速和电压，观察并记录微机准同期控制器的频差闭锁、压差闭锁、相差闭锁灯亮和熄灭的规律；

(三) 手动准同期

1. 按准同期并列条件合闸

将“同期方式”转换开关置“手动”位置。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。操作过程如下：

1. 观察微机准同期控制器上显示的发电机电压和系统电压，相应操作微机励磁调节器上的“增磁”或“减磁”按钮进行调压，直至“压差闭锁”灯熄灭。
2. 观察微机准同期控制器上显示的发电机频率和系统频率，相应操作微机调速器上的“增速”或“减速”按钮进行调速，直至“频差闭锁”灯熄灭。
3. 此时表示压差、频差均满足条件，观察整步表上旋转灯位置，当旋转至 0° 位置（正中）前某一合适时刻时，即可合闸。观察合闸时的冲击电流。

2. 偏离准同期并列条件合闸

本实验项目仅限于实验室进行，不得在电厂机组上使用!!!

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（下标 F 表示发电机，下标 X 表示系统）：

(1) 电压差相角差条件满足，频率差不满足，在 $f_F > f_X$ 和 $f_F < f_X$ 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，以及冲击电流 I_m 的大小，分别填入表 1；注意：频率差不要大于 0.5HZ。

(2) 频率差相角差条件满足，电压差不满足， $U_F > U_X$ 和 $U_F < U_X$ 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，以及冲击电流 I_m 的大小，分别填入表 1；注意：电压差不要大于额定电压的 10%。

(3) 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，以及冲击电流 I_m 的大小，分别填入表 1-1。注意：相角差不要大于 30 度。

表 1-1

	$f_F > f_X$	$f_F < f_X$	$U_F > U_X$	$U_F < U_X$	超前	滞后
P (kW)						
Q (kVAR)						

I_m (A)						
-----------	--	--	--	--	--	--

注：有功功率 P 和无功功率 Q 也可以通过微机励磁调节器的显示观察。

(四) 半自动准同期

将“同期方式”转换开关置“半自动”位置，按下准同期控制器上的“同期”按钮即向准同期控制器发出同期并列命令，此时，同期命令指示灯亮，微机正常灯闪烁加快。准同期控制器将给出相应操作指示信息，运行人员可以按这个指示进行相应操作。调速调压方法同手动准同期。“频差闭锁”时调节调速器上的“增速”或“减速”按钮；“压差闭锁”时调节励磁控制器上的“增磁”或“减磁”按钮；“相差闭锁”时调节“增速”或“减速”按钮就增大相对运动，使得尽快减小相差闭锁后再调节“增速”或“减速”按钮使之接近同步速。

当压差、频差条件满足时，整步表上旋转灯光旋转至接近 0° 位置时，整步表圆盘中心灯亮，表示全部条件满足，准同期控制器会自动发出合闸命令，“合闸出口”灯亮，随后 DL 灯亮，表示已经合闸。同期命令指示灯熄，微机正常灯恢复正常闪烁，进入待命状态。

(五) 全自动准同期

将“同期方式”转换开关置“全自动”位置；按下准同期控制器的“同期”按钮，同期命令指示灯亮，微机正常灯闪烁加快，此时，微机准同期控制器将自动进行均压、均频控制并检测合闸条件，一旦合闸条件满足即发出合闸命令。

在全自动过程中，观察当“升速”或“降速”命令指示灯亮时，调速器上有什么反应；当“升压”或“降压”命令指示灯亮时，微机励磁调节器上有什么反应。当一次合闸过程完毕，控制器会自动解除合闸命令，避免二次合闸；此时同期命令指示灯熄，微机正常灯恢复正常闪烁。

(六) 停机

当同步发电机与系统解列之后，按调速器的“停机/开机”按钮使“停机”灯亮，即可自动停机，当机组转速降到 85% 以下时，微机励磁调节器自动逆变灭磁。待机组停稳后断开原动机开关，跳开励磁开关以及线路和无穷大电源开关。切断操作电源开关。

(七) 实验报告要求

1. 比较手动准同期和自动准同期的调整并列过程；
2. 分析合闸时发电机有功无功在不同条件下有何差异；
3. 分析合闸冲击电流的大小与哪些因素有关；
4. 回答思考题。

六、注意事项

1. 手动合闸时，仔细观察整步表上的旋转灯，在旋转灯接近 0° 位置之前某一时刻合闸。
2. 当面板上的指示灯、数码管显示都停滞不动时，此时微机准同期控制器处于“死机”状态，按一下“复位”按钮可使微机准同期控制器恢复正常。
3. 微机自动励磁调节器上的增减磁按钮按键只持续 5 秒内有效，过了 5 秒后如还需调节则松开按钮，重新按下。
4. 在做三种同期切换方式时，做完一项后，需做另一项时，断开发电机机端断路器开关，然后选择“同期方式”转换开关。

七、思考题

1. 相序不对(如系统侧相序为 A、B、C，而发电机侧相序为 A、C、B)，能否并列？为什么？
2. 电压互感器的极性如果有一侧(系统侧或发电机侧)接反，会有何结果？
3. 准同期并列与自同期并列，在本质上有何差别？如果在这套机组上实验自同期并列，应如何操作？
4. 合闸冲击电流的大小与哪些因素有关？频率差变化或电压差变化时，正弦整步电压的变化规律如何？
5. 当两侧频率几乎相等，电压差也在允许范围内，但合闸命令迟迟不能发出，这是一种什么现象？应采取什么措施解决？
6. 在 $f_F > f_X$ 或者 $f_F < f_X$ ， $U_F > U_X$ 或者 $U_F < U_X$ 下并列，机端有功功率表及无功功率表的指示有何特点？为什么？

实验二 单机—无穷大系统稳态运行方式实验

一、实验目的

1. 了解和掌握对称稳定情况下，输电系统的各种运行状态与运行参数的数值变化范围；
2. 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、实验类型

综合型

三、实验仪器

WDT-III 型电力系统综合自动化实验台。

四、实验原理

电力系统稳态对称和不对称运行分析，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，除了通过结合实际的问题，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 2 所示。

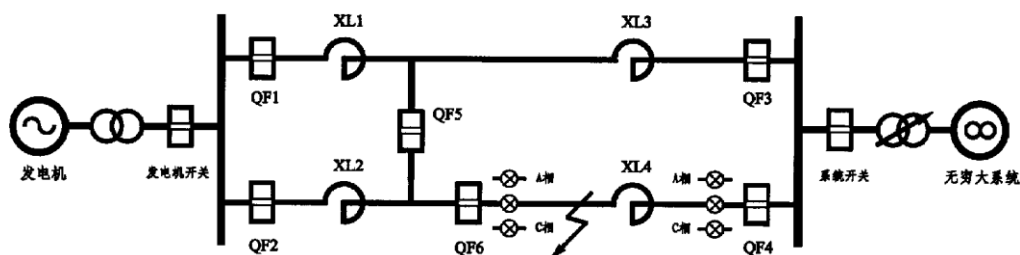


图 2 一次系统接线图

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。

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。

五、实验内容和要求

1. 单回路稳态对称运行实验

在本章实验中，原动机采用手动模拟方式开机，励磁采用手动励磁方式，然后启机、建压、并网后调整发电机电压和原动机功率，使输电系统处于不同的运行状态（输送功率的大小，线路首、末端电压的差别等），观察记录线路首、末端的测量表计值及线路开关站的电压值，计算、分析、比较运行状态不同时，运行参数变化的特点及数值范围，为电压损耗、

电压降落、沿线电压变化、两端无功功率的方向（根据沿线电压大小比较判断）等。

2. 双回路对称运行与单回路对称运行比较实验

按实验 1 的方法进行实验 2 的操作，只是将原来的单回线路改成双回路运行。将实验 1 的结果与实验 2 进行比较和分析。

表 2-1

	P	Q	I	U_F	U_Z	U_S	ΔU
单回路							
双回路							

注： U_Z —中间开关站电压；

ΔU —输电线路的电压损耗；

3. 单回路稳态非全相运行实验

确定实现非全相运行的接线方式，断开一相时，与单回路稳态对称运行时相同的输送功率下比较其运行状态的变化。

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，具体整定参数为下表。

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“ Δ ”，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“ Δ ”“ ∇ ”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“ Δ ”“ ∇ ”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“ Δ ”“ ∇ ”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“ Δ ”“ ∇ ”选 05 整定项目，再按压触摸按钮“+”或“-”选择重合闸投切为 OFF。

具体操作方法如下：

- (1) 首先按双回路对称运行的接线方式（不含 QF5）；
- (2) 输送功率按实验 1 中单回路稳态对称运行的输送功率值一样；
- (3) 微机保护定值整定：动作时间 0 秒，重合闸时间 100 秒；
- (4) 在故障单元，选择单相故障相，整定故障时间为 $0'' < t < 100''$ ；
- (5) 进行单相短路故障，此时微机保护切除故障相，准备重合闸，这时迅速跳开“QF1”、“QF3”开关，即只有一回线路的两相在运行。观察此状态下的三相电流、电压值与实验 1 进行比较；

(6) 故障 100ms 以后，重合闸成功，系统恢复到实验 1 状态。

表 2-2

	P	Q	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C
全相运行值 1								
非全相运行值 1								
全相运行值 2								
非全相运行值 2								
全相运行值 3								
非全相运行值 3								
全相运行值 4								
非全相运行值 4								

四、实验报告要求

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的前、后实验数据，分析输电线路输送功率的变化。

六、注意事项

1. 在发电机建压后，“励磁方式”开关不允许动，否则发电机会失磁
2. 严格禁止非同期并网，如不能用线路开关使发动机和无穷大系统联结
3. 为了保护同期表，“同期方式”选择钮不要置到“手动”位置。只有在选择手动同期时才置到“手动”位置。
4. 发动机运行时，不允许打开励磁开关
5. 发动机运行时不允许打开原动机开关

七、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？

实验三 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。

二、实验类型

综合型

三、实验仪器

WDT-III 型电力系统综合自动化实验台。

四、实验原理

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：

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

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：

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

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

这时功率极限为

$$P'_{Em} = \frac{E'U}{X_{d\Sigma}}$$

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。

五、实验内容和要求

（一）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_x 、发电机电势保持 E_q 保持不变, 即并网前 $U_x=E_q$), 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) 记录功率角指示器的刻度;
- (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 3-1 中;
- (6) 输电线路为双回线, 重复上述步骤, 填入表 3-2 中。

表 3-1 单回线

δ	0°	20°	40°	60°	80°	90°
P	0					
I_A	0					
U_Z						
U_F						
I_{fd}						
Q	0					

表 3-2 双回线

δ	0°	20°	40°	60°	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 3-3 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 3-4 中。

表 3-3

δ	单回线			并网前 $E_q < U_x$		
	0°	20°	40°	60°	80°	90°
P	0					
I_A						
U_Z						
U_F						
I_{fd}						
Q						

表 3-4

δ	单回线			并网前 $E_q > U_x$		
	0°	20°	40°	60°	80°	90°
P	0					
I_A						
U_Z						
U_F						
I_{fd}						
Q						

(二) 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) 单回线输电线路；
- (2) 发电机与系统并列后，使 $P=0$ ， $Q=0$ ， $\delta=0$ ，校正初始值；
- (3) 逐步增加发电机输出的有功功率，调节发电机励磁，保持发电机端电压恒定或无功输出为零；
- (4) 观察并记录系统中运行参数的变化，填入表 3-5 中。

表 3-5

δ	单回线			手动调节励磁			
	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°
P	0						
I_A	0						
U_Z							
U_F							
I_{fd}							
Q	0						

(三) 自动调节励磁时，功率特性和功率极限的测定

将自动调节励磁装置接入发电机励磁系统，测定功率特性和功率极限，并将结果与无调节励磁和手动调节励磁时的结果比较，分析自动励磁调节器的作用。

1. 微机自并励（恒流或恒压控制方式），实验步骤自拟；

表 3-6 单回线 微机自并励方式

	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°
δ	0°						
P	0						
I_A	0						
U_Z							
U_F							
I_{fd}							
Q	0						

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—角特性曲线和功率极限。

六、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。

七、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—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？

实验四 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的措施

二、实验类型

综合型

三、实验仪器

WDT-III 型电力系统综合自动化实验台

四、实验原理

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： $P_1 = (E_0 \times U_0) \times \sin\delta / X_1$ ；

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

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

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 δ_c 小于 δ_{max} ， δ_{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， δ_{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 δ_{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。

五、实验内容和要求

本实验需要发电机手动调速，在发电机启动时就要选择手动调速（模拟方式或微机手动方式）。

（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} （不是电磁功率的最大值）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 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“△”，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。

表 4-2 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	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 4-3 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	1	1	1	1		

表 4-4 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	1	1	1	1		

表 4-5 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	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 4-6 短路类型：单相短路

短路切除时间	$P_{\max}(W)$	Id1 最大短路电流(A)
1.0 (s)		

(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电势。观察它对提高暂态稳定的作用。在相同的运行方式和故障情况下，分别采取手动励磁和微机自动励磁方式，观察发电机端电压的变化。

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	$P_{\max}(W)$
1	1	1	1	0	1	

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) 大大提高供电可靠性；
- (2) 提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 5-7

整定值代码	01	02	03	04	05	T_D
重合闸	0.5	1.5	5.00	on	on	1.0

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	$P_{\max}(W)$
1	1	1	1	0	1	

（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，调节发电机励磁对振荡周期，发电机转差的影响，并牵入再同步。

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。

六、注意事项

1. 在发电机启动时采用手动调速

2. 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。

3. 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。

4. 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。

七、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 4 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？

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。

C 站，一方面经 70KM 短距离线路与 B 站相联，另一方面与 E 站并联经 200KM 中距离线路与无穷大母线 MG 相联，本站还有地方负荷。

此电力网是具有多个节点的环形电力网，通过投切线路，能灵活的改变接线方式，如切除 XLC 线路，电力网则变成了一个辐射形网络，如切除 XLF 线路，则 C 站、E 站要经过长距离线路向系统输送功率，如 XLC、XLF 线路都断开，则电力网变成了 T 型网络等等。

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、QFF 跳开（开关跳闸时间可整定）。

五、实验内容和要求

（一）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

1. 环网运行，其他负荷都投入，只有地方负荷 B 不投入
2. 开环运行，切除 XLC 线路，QFD，QFE 打开。并且地方负荷 B 不投入
3. 保持环网运行，但双回线改为单回线，并且地方负荷 B 不投入

（二）投、切负荷和电源对系统潮流的影响

1. 网络结构 1（所有开关都投入）的情况下，投地方负荷 B。
2. 在 2.1 基础上退出发电机 D。

上述实验数据由实验台的打印机打印，因此这里不再列有表格

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。

六、注意事项

1. 严格禁止非同期并网，如不能用线路开关使发动机和无穷大系统联结
2. 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。
3. 网络中不能有两个无穷大系统运行。

七、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？