

浙江大学实验报告

专业：电气工程及其自动化

姓名：潘谷雨

学号：3220102382

日期：2024.10.13

地点：教二 105

课程名称：电力系统稳态分析 指导老师：王康元 成绩：

实验名称：同步发电机准同期并列实验、单机-无穷大系统实验

一、实验目的和要求

- 1、了解和掌握三相对称稳态情况下，输电系统各种运行状态与运行参数的数值变化范围
- 2、理解同步发电机准同期并列原理，掌握准同期并列条件，掌握准同期并列过程
- 3、掌握微机准同期控制器及模拟式综合整步表的使用方法

二、实验内容和原理

1.同步发电机准同期并列实验

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。根据并列操作自动化程度的不同，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频差，不断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匀均频控制脉冲。所有条件满足时，在整定的越前时刻送出合闸脉冲。

2.单机-无穷大系统实验

通过本实验了解和掌握电力系统稳态对称运行特性，在巩固理论概念的同时，掌握“数值概念”，如在典型运行方式下，用相对值表示的电压损耗、电压降落等数值范围，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等。

三、主要仪器设备（系统、软件或平台）

发电机组、实验操作台、无穷大系统

四、操作方法与实验步骤

1.同步发电机准同期并列实验

- (1) 按照步骤进行机组微机启动和建压
- (2) 按准同期并列条件合闸
- (3) 偏离准同期并列条件合闸

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-发电机、X-一无穷大系统):

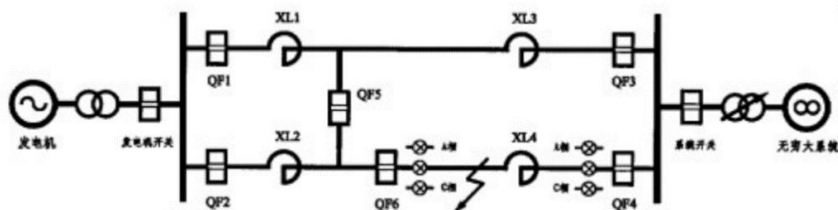
电压差相角差条件满足，频率差不满足：在 $f_F > f_X$ 和 $f_X > f_F$ 时手动合闸，观察并记录实验台上的有功功率表 P 和无功功率表 Q 指针偏转方向及偏转角度大小。注意:频率差小于 0.5Hz。

频率差相角差条件满足，电压差不满足：在 $V_F > V_X$ 和 $V_X > V_F$ 时手动合闸，观察并记录实验台上的有功功率表 P 和无功功率表 Q 指针偏转方向及偏转角度大小。注意:电压差小于 10%额定电压频率差。

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的有功功率表 P 和无功功率表 Q 指针偏转方向及偏转角度大小。注意相角差小于 30 度。

- (4) 半自动准同期，全自动准同期，停机

2.单机-无穷大系统实验



- (1) 按照步骤进行机组手动启动和建压
- (2) 并网
- (3) 稳态对称实验

并网后，按照不同运行方式的线路开关状态进行线路开关的合闸和分闸，通过调节调速装置上的指针电位器来调整发电机输出的有功功率、通过调节“手动励磁”旋钮来调整发电机输出的无功功率，分别使输电系统处于不同的运行状态（不同大小的有功功率、不同方向的无功功率）进行实验。

在每一种运行状态下，分别按所列开关状态进行线路开关的合闸和分闸，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、比较运行方式不同时，运行参数变化的特点及数值范围——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。同时针对不同运行状态下的实验结果进行分析。

- (4) 停机

五、实验数据记录和处理

1. 同步发电机准同期并列实验

- (1) 准同期并列条件合闸时三相电流变化几乎为 0
 - (2) 偏离准同期并列条件合闸的定性分析
- 根据实验要求，偏离准同期并列条件合闸数据记录如图 1.1 所示，其中有偏离的有功与无功功率与无偏离情况比较，表中的变化量为二者相减得出。

偏离情况		无功功率 (kvar)	有功功率 (kW)
频率差不满足	+0.3Hz	-0.2	+0.6
	-0.3Hz	-0.2	-0.7
电压差不满足	8V	+0.4	+0.2
	-8V	-0.5	-0.2
相角差不满足	顺时针	-0.1	+0.5
	逆时针	-0.2	-0.6

图 1.1 偏离准同期并列条件合闸数据记录

结果分析：

频率差不满足：与无偏离情况相比，当 $f_f > f_x$ 合闸时，有功功率正向变化较明显；当 $f_f < f_x$ 合闸时，有功功率负向变化较明显。无功功率均有微小幅度负方向变化，由此可以判断频率差对系统有功的影响较大。

电压差不满足：与无偏离情况相比，当 $V_f > V_x$ 合闸时，无功功率较明显正向变化；当 $V_f < V_x$ 合闸时，无功功率较明显负向变化。有功功率均有微小变化。由此可以判断电压差对有功功率影响较大。

相角差不满足：当相角差大于 0（顺时针）时，有功功率正向变化；当相角差小于 0（逆时针）时，有功功率负向变化。无功功率均负向变化。由此可以判断相角差对系统有功、无功功率均有影响。

2. 单机-无穷大系统实验

- 根据实验要求，测量三种运行方式下电网稳态情况。
- (1) 运行方式一
- 线路工况如图 2.1，得到图 2.2 所示三相电流与线路首、末端的测量表计值及线路开关站的电压值。

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

图 2.1 运行方式一线路工况

P(w)	Q(VA)	发电机电压 UF(V)	开关站电压 (V)	系统电压(V)	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
500	100	372.4	374	380	0.879	0.886	0.872
500	-100	320.3	342	380	1.089	1.152	1.156
1000	200	349.2	346	380	2.250	2.188	2.195

图 2.2 运行方式一线路工况

(2) 运行方式二

线路工况如图 2.3, 得到图 2.4 所示三相电流与线路首、末端的测量表计值及线路开关站的电压值。

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

图 2.3 运行方式二线路工况

P(w)	Q(VA)	发电机电压 UF(V)	开关站电压 (V)	系统电压(V)	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
500	100	381.3	375	380	0.961	0.954	1.036
500	-100	356.6	365	380	1.206	1.213	1.234
1000	200	382.5	375	380	1.820	1.847	1.902

图 2.4 运行方式二线路工况

(3) 运行方式三

线路工况如图 2.5, 得到图 2.6 所示三相电流与线路首、末端的测量表计值及线路开关站的电压值。

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

图 2.5 运行方式三线路工况

P(w)	Q(VA)	发电机电压 UF(V)	开关站电压 (V)	系统电压(V)	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
500	100	375.9	372	380	0.981	0.975	1.009
500	-100	332.6	340	380	1.247	1.227	1.261
1000	200	360.7	355	380	1.697	1.711	1.725

图 2.6 运行方式三线路工况

结果分析:

电压损耗是指从发电机端到系统端的电压差;电压降落是指从发电机端到开关站端的电压差各工况电压损耗与电压降落数据如图 2.7 所示。

P(W)	Q(VA)	电压损耗(V)			电压降落(V)		
		运行方式一	运行方式二	运行方式三	运行方式一	运行方式二	运行方式三
500	-100	59.7	23.4	47.4	21.7	8.4	7.4
500	100	7.6	-1.3	4.1	1.6	-6.3	-3.9
1000	200	30.8	-2.5	19.3	-3.2	-7.5	-5.7

图 2.7 各工况电压损耗与电压降落数据记录

从表中可以看出,无功功率的增加通常会减少电压损耗和电压降落,与理论相符,因为

无功功率的增加可以提高系统的电压水平，从而减少电压损耗。沿线电压的变化与无功功率的方向密切相关。无功功率为正时，无功功率从发电机流向系统，沿线电压上升；无功功率为负时，沿线电压下降。

运行方式的比较：运行方式 2 在所有情况下都有最小的电压损耗。运行方式 1 在有功功率为 500W，无功功率为-100VAR 时，有最大的电压损耗，这可能是由于无功功率的负值导致电压降落增加。

六、分析与思考

同步发电机准同期并列实验：

1、比较手动准同期和自动准同期的调整并列过程

手动准同期：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；自动准同期：只需要按下准同期控制器的“同期”按钮，“同期命令”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、均频控制并检查合闸条件，一旦合闸条件满足即发出合闸命令。

手动准同期并列过程需要人的观察来判断是否满足并列条件，需要手动调整转速和励磁，然后确定合闸的时机；而自动准同期通过自动装置来完成上述调节过程。

2、相序不对时能否并列？为什么？

不能并列。因为相序不对时，并列点三相中至多只有一相能保证相位相同，其余两相存在较大的相位差，并列时会产生较大的冲击电流。会导致开关跳闸、电网络跳闸、甚至是网域大部分停电等重大事故。

3、电压互感器的极性如果一侧接反，会有说明结果？

根据自动准同期装置要在变压器二次侧电压差不多同相位时才会合闸，此时并列点两侧电压实际相位差接近 180° ，会产生很大的冲击电流，损坏发电机。

4、合闸冲击电流的大小与哪些因素有关？

冲击电流产生的原因使由于合闸时并列点两侧的电压瞬时值不相等。影响冲击电流大小的因素有：并列点两侧的电压幅值；合闸时并列点两侧电压的电压差；合闸点两侧电压的频率差。

5、在 $f_F > f_X, f_X > f_F$ 或 $V_F > V_X, V_X > V_F$ 下并列时，机端有功功率表及无功功率表的指示有何特点？为什么？

频率负误差时，有功功率瞬时下降之后回升，无功功率几乎不变；频率正误差时，有功功率瞬时上升后回落，无功功率几乎不变；电压负误差时，无功功率瞬时下降后回升，有功功率几乎不变；电压正误差时，无功功率瞬时上升后回落，有功功率几乎不变。

脱网时，发电机转速与频率成正比；并网后，发电机频率与电网频率相同，转速变化导致有功功率的变化。脱网时，发电机的励磁与电压成正比；并网后，发电机的电压和电网电压相同，励磁变化导致无功功率的变化。

单机-无穷大系统实验：

1、根据不同运行方式下的线路首、末端和中间开关站的实验数据，分析、比较运行方式不同时，运行参数变化的特点和变化范围。

单回路送电的电压损耗和电压降落，比双回路送电的电压损耗和电压降落要大。因此电力系统在双回路送电时比单回路送电时更加稳定。

(1) 保证励磁不变的情况下，同一回路，随着有功输出的增加，三相电流也在增加（ $I_A/B/C$ 电流基本相同），这是因为输出功率 $P = UI \cos \theta$ ，机端电压不变，所以电流随着功率的增加

而增加；

(2) 励磁不变情况下，同一回路，随着有功输出功率的增大，首端电压减小，电压损耗也在减小。

(3) 出现电压压降落为负的情况是因为系统倒送功率给发电机的原因。

(4) 单回路供电和双回路供电对电力系统稳定性均有一定的影响，单回路送电的电压损耗和电压降落比双回路明显更高，因此双回路要稳定一些，单回路稳定性较差。在单回路运行时电压降落为 (22.6V-38.5V)；双回路运行时，电压降落为 (9.4V-17.9V)。运行方式 3，合上开关 QF5，打开 QF3 时，由于相比于运行方式 1 多并列一个电抗，系统稳定性提高，电压降落 (14.9V-30.8V) 也比运行方式 1 小一些。

2、什么是电压损耗、电压降落？举例说明其计算方法。

电压损耗：始末端电压数值差，常常以百分比形式表示，
$$\frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100\%$$

电压降落：始末端电压相量差，
$$d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \Delta U + j\delta U$$

例如：相量 $U_1 \angle \varphi_1$ ， $U_2 \angle \varphi_2$ ，电压降落为 $U_1 \angle \varphi_1 - U_2 \angle \varphi_2$ ；电压损耗为 $|U_1 - U_2|$ 。

3、影响简单系统静态稳定性的因素有哪些？

电力系统静态稳定是指电力系统受到小干扰后，不发生非周期性的失步，自动恢复到起始运行状态的能力。电力系统的静态稳定性是电力系统正常运行时的稳定性。电力系统静态稳定性的基本性质说明：静态储备越大，则静态稳定性越高。

影响电力系统静态稳定的因素主要有来自各方面的小扰动，包括负荷的变化、负荷以及开关等的切换等。此外还有发电机电势、系统电压、系统元件电抗等因素。

4、提高电力系统静态稳定有哪些措施？

电力系统具有静态稳定性是系统正常运行的必要条件。要提高系统的静态稳定性，主要是提高输送功率的极限。从简单电力系统的功率极限表达式 $PM = EV/X$ 来看，可以从提高发电机的电势 E 、提高系统电压 V 和减小系统元件电抗这三方面入手。具体措施有：减少系统各元件的电抗（发电机、变压器、线路等电抗），采用串联电容补偿、采用分裂导线和提高输电线路的电压等级；提高系统电压水平；改善电力系统的结构；采用串联电容器补偿；采用自动励磁调节装置；采用直流输电等。

七、实验心得与体会

本次实验中我们模拟了真实电力系统，了解了电力系统的基本运行，通过观察不同运行方式下的参数变化，我学会了如何分析电力系统的动态行为，同时让我更深刻地理解了电力系统中电压损耗和无功功率的理论知识。通过实际操作，我能够看到理论公式在实际中的应用，以及它们如何影响系统的实际运行。

在实验过程中遇到电压损耗异常与设备操作失误的问题，迫使我运用批判性思维和问题解决技能来找到解决方案，这些技能在工程实践中至关重要。在团队合作中，我学会了如何与同伴沟通和协作，以确保实验的顺利进行，对于未来的职业生涯非常宝贵。