

2024 年秋季电力系统实验—启动、并列及解列实验

一、实验目的

了解发电机工作原理；熟悉发电机启动、并列及解列的操作步骤；掌握同步发电机并列、解列需要满足的条件以及非正常并列与解列对发电机的影响；能够借助 Matlab 或 Python 等工具分析录波数据。

二、实验原理

2.1 同步发电机工作原理

发电机通常由定子、转子、端盖及轴承等部件构成。定子由定子铁芯、线包绕组、机座以及固定这些部分的其他结构件组成。转子由转子铁芯（或磁极、磁扼）绕组、护环、中心环、滑环及转轴等部件组成。同步发电机是将机械能转换为电能，其基本原理是利用电磁感应法将旋转的磁场转化为电能。其工作过程如下：通过直流励磁给转子提供磁场，当转子旋转时，转子内的磁场会随之旋转，同时在定子线圈中产生感应电动势。

2.2 发电机并列条件

2.2.1 同期概念

投入同步发电机与电网的连接开关（同期开关），将发电机与电网连接时所具备的条件，称为发电机同期。

2.2.2 同期方式

同步发电机同期方式主要有 3 种，分别为：**准同期**、**自同期**、**非同期**（通常不允许的操纵方式）。

（1）准同期

准同期操作步骤：当同步发电机转子转速升至额定转速后，给同步发电机施加励磁并适当调整励磁大小，使同步发电机的机端电压幅值、电压相角和频率与并列点（同期点）系统侧的电压幅值、电压相角及频率大小相近时，闭合同期开关把同步发电机投入电网。

准同期的基本条件：1）发电机机端电压和电网同期点的电压**幅值相近（幅值差不超过 5%~10%）**；2）发电机机端电压和电网同期点的电压**相位相近（相位不超过 3°~5°）**；3）发电机与同期点的**频率相近（频率差不超过 0.2%~0.5%）**；4）发电机与同期点的**相序必须一致**。

思考 1：为什么要满足上述四个条件？

主要目的是保障同步发电机不受冲击电流影响，保持同步发电机的稳定同步运行。

思考 2：不满足准同期条件的后果有哪些？

①**电压幅值不相等**。发电机绕组内会出现相当大的冲击电流，烧坏发电机组。

②**电压相位不一致**。可能产生很大的冲击电流而使发电机烧毁，相位不一致比幅值不一致的情况更为严重。如果相位相差 180° ，近似等于机端三相短路电流的两倍，此时，流过发电机绕组内部电流具有相当大的有功成分，这样会在轴上产生力矩，使设备烧毁或发电机大轴扭曲。

③**频率不等**。同步发电机会产生机械振动，产生拍振电流。因为两个电压相量相对运动，如果这个相对运动比较小，则发电机与电网之间的自整步作用，使发电机拉入同步；但频率相差较大时，因转子惯性冲力过大而不起作用。

思考 3：准同期操作是否可以应用到两个系统的并列？可以。

（2）自同期

自同期操作步骤：当同步发电机的转子转速升至额定转速附近后（**转差率不超过 1~2%**），将同步发电机并入电网，然后发电机**立即**施加励磁，使发电机在很短时间内被自动拉入同步状态。

由于同步发电机未加励磁就投入电网时，相当于电网经过很小的电抗短路，此时会产生较大的冲击电流，引起电网电压的暂降。因此，相关规程规定：**对于单机容量在 100MW 以下的汽轮机组，当冲击电流周期分量不超过额定电流的 0.74 倍时，才允许采用自同期并列。**

（3）非同期

当起动中的发电机在其中电压、相位、频率与系统的电压、相位、频率存在较大差异的情况下（**即不满足发电机准同期条件**），由人为操作或借助于自动装置将带励磁的发电机投入系统。

当发电机出现非同期并列时，合闸瞬间将发生巨大的电流冲击，使发电机发生强烈振动，发出鸣音。严重时可产生 20 多倍的额定电流冲击，会造成发电机定子绕组变形、扭变、绝缘崩裂、定子绕组并头套熔化、定子烧毁，甚至使系统崩毁等严重后果。

2.3 同步发电机解列条件

同步发电机解列时，应该满足以下条件：

- （1）同步发电机输出的有功功率为 0，即同步发电机与电网之间无有功功率交换；
- （2）同步发电机输出的无功功率为 0，即同步发电机与电网之间无无功功率交换。

三、电力系统动模实验平台简介

3.1 动模实验平台

清华大学电力系统动模实验平台是根据**相似性原理**，在电力系统实验室内构建的一套电压等级相对较低（发电机电压 400V、电网电压 800V）的物理仿真平台，用来模拟真实电力系统的运行。主要是将模拟发电机、模拟变压器、模拟输电线路、模拟负荷及其相关控制、测量装置组合在一起，构成一个缩小版的电力系统。可以在这个系统上开展潮流分析、故障分析、暂态分析以及保护与控制等各种电力系统实验。

3.2 电力系统实验系统

本次实验系统采用简单的单机无穷大系统，其结构如图 1 所示。主要包括：模拟同步发电机、模拟升压变压器、模拟输电线路、模拟无穷大系统以及相关开关设备等。

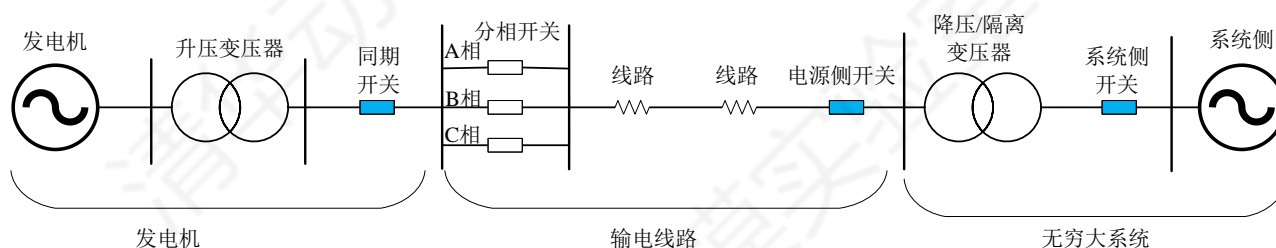


图 1 单机无穷大系统结构示意图

本次实验 2 个组所采用的系统连接关系分别为：

- (1) 第一组：4 号发电机—2 号分相开关—6、7 号线路—2 号无穷大系统
- (2) 第二组：5 号发电机—1 号分相开关—2、3 号线路—1 号无穷大系统

三、实验操作步骤

在动模实验室内，相关实验操作有两种方式，一是通过屏柜面板的本地操作；二是通过监控软件的远程操作。下面分别对模拟同步发电机的启动、并列、解列及停机过程的操作步骤进行详细说明。

3.1 模拟同步发电机启动

3.1.1 启动前的安全检查

- 1) 在模拟机组电源柜（如图 2 所示）中对模拟发电机组的电源开关进行合闸操作。当开关处于绿色 OFF 时，表示开关断开；处于红色 ON 时，表示开关闭合（如图 3 所示）。



图 2 模拟机组电源柜



图 3 发电机组电源开关

2) 围绕发电机组行走一圈，检查发电机组内部是否有异物（如图 4 所示）、外部是否有覆盖物，同时检查发电机组各部分接线是否牢固（如图 5 所示原动机电源线）。检查各环节没有问题，并将各类警示标识牌摆放正确，再进行下一步操作；若发现异常，如发电机组内部有异物，则报告实验室管理人员进行处理，处理完毕，并检查无误后再进行下一步操作。



图 4 检查发电机内部是否有异物图

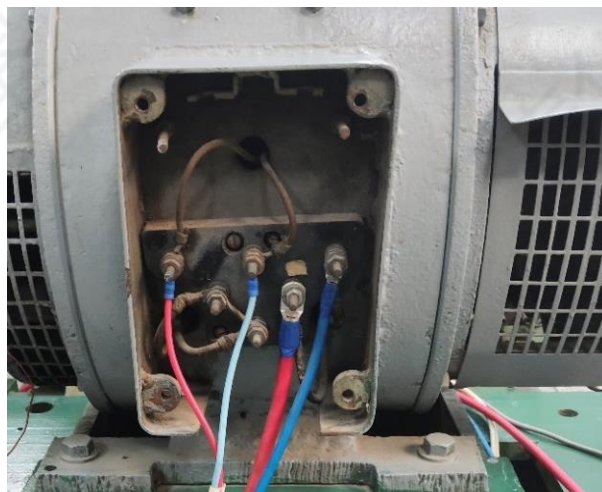


图 5 检查发电机组各部分接线（以原动机电源线为例）

3.1.2 启动步骤

（1）本地操作

1) 启动原动机

①检查发电机组调速面板的“整流-逆变”开关是否拨到“整流”，若未拨到“整流”则将其拨到“整流”（注：此处的“整流”理解为开关闭合，“逆变”理解为开关断开）；

②拨到“整流”后，按下“原动机开关合”按钮（红色），此时在发电机组调速和励磁柜的面板上“电源开关合闸”会亮起红灯、“直流电机励磁电压（即原动机的励磁）”表会有数值（如图 6 所示）。

③按下“起机”按钮，发电机的转子会缓缓转动，在发电机启动过程中需要注意发电机内部有无异常机械杂声，若听见异常声音，则立即将“整流-逆变”开关拨到“逆变”，然后按下“原动机开关分”按钮（绿色），紧急情况下可直接按下“原动机开关分”按钮。若无异常，则进行下一步操作。



图 6 发电机启动面板

④发电机启动后可通过观察调速励磁柜面板中“机组转速”显示的数值，确定发电机当前转速，发电机转子转速会逐步升至100%额定转速（对应频率为50Hz）附近（如图7所示）。若转速稳定后未达到额定转速，则可通过“升速/降速”按钮来调整发电机转速（如图8所示），直至将转速调节至额定转速附近。在额定转速附近旋转运行1~2min后若无异常情况发生，即可进行下一步操作。



图7 观察机组转速

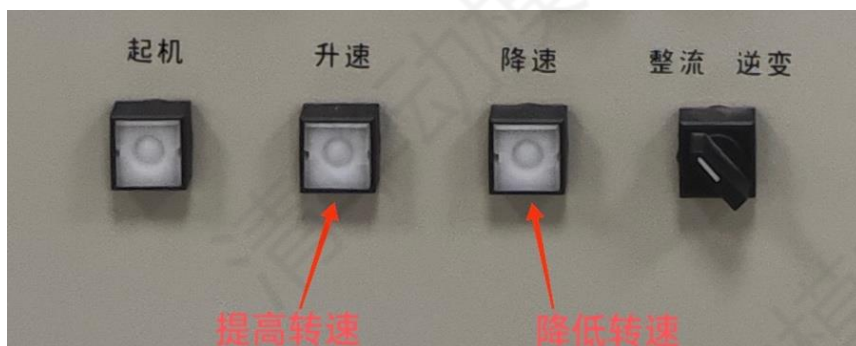


图8 调节转子转速

2) 启动励磁

①检查励磁面板的“整流-逆变”开关是否拨到“整流”，若未拨到“整流”则将其拨到“整流”；拨到“整流”后，按下“灭磁开关合”按钮，此时“灭磁开关合闸”会亮红灯（如图9所示）。

②按下“起励”按钮，同步发电机的机端电压（即升压变压器柜低压侧电压）会到达400V附近（如图10、图11所示）；若发电机的机端电压未达到400V，可通过“增励/降励”按钮调整机端电压（如图12所示）。



图 9 励磁面板



图 10 机端电压显示



图 11 升压变压器柜电压显示

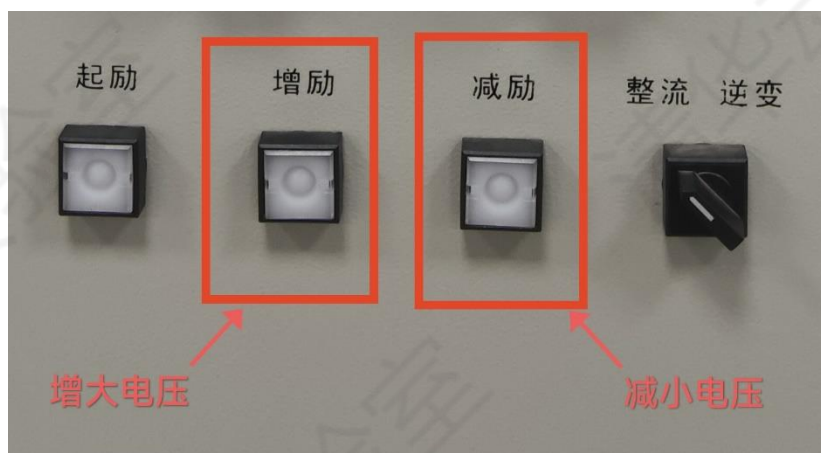


图 12 励磁调节按钮

(2) 远程操作

1) 启动原动机

①在监控软件的左侧项目栏找到“发电机”（以 5 号发电机为例）（如图 13 所示），双击进入发电机操作界面（如图 14 所示）。点击“原动机开关合”按钮，当指示灯由绿色变为成红色，则表示开关合闸成功（如图 15 所示）。注：由于通信等原因，有时可能会合闸失败，此时需要再次点击“原动机开关合”按钮。

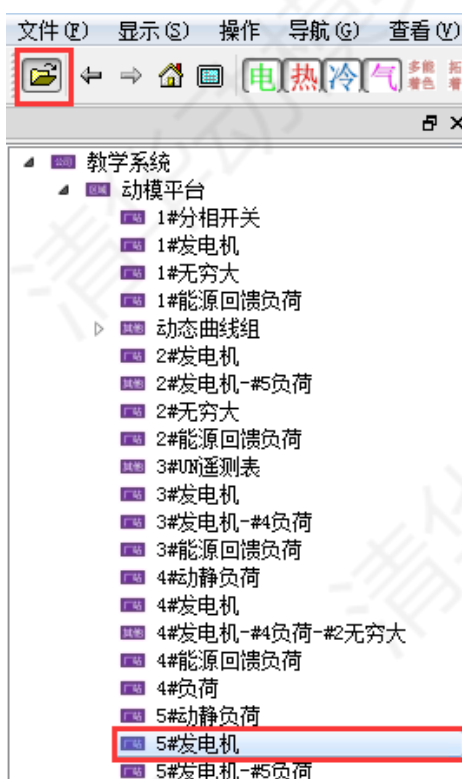


图 13 “发电机”项目栏

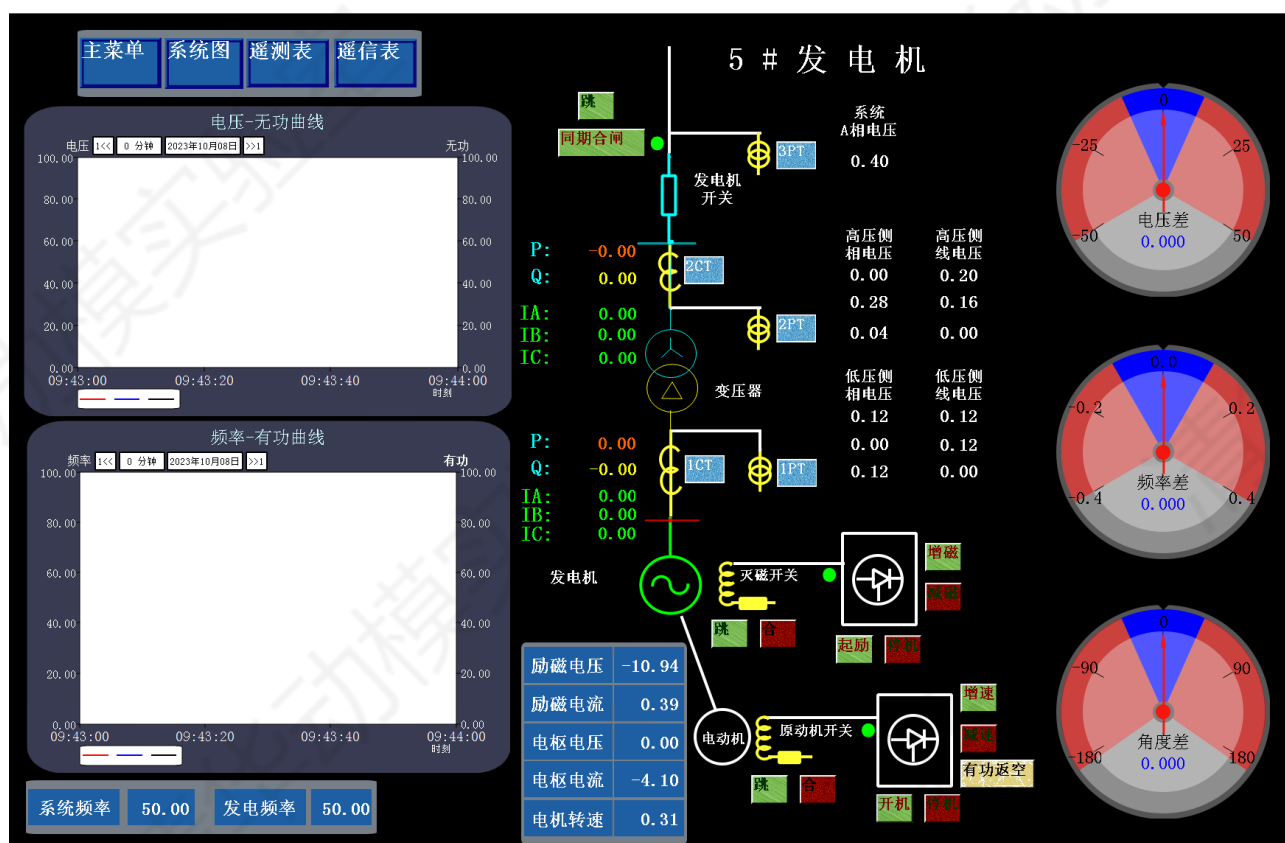


图 14 “发电机”操作界面

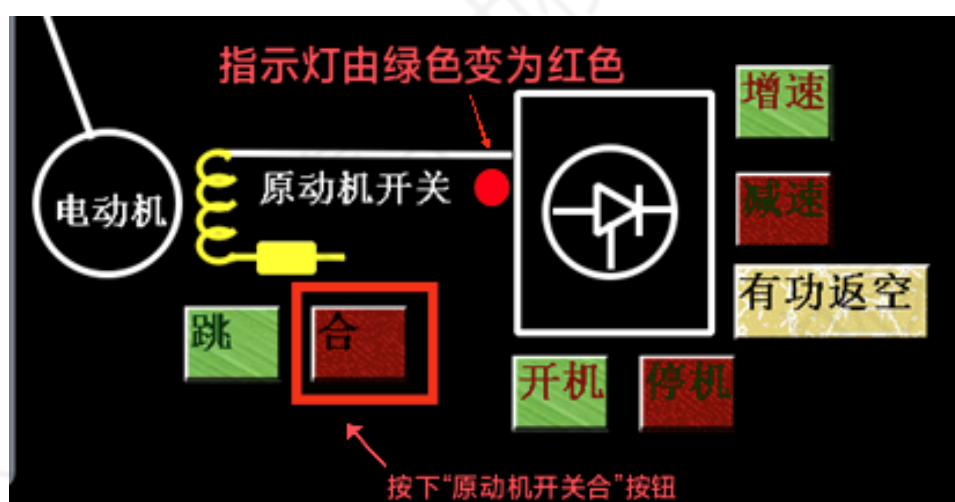


图 15 原动机开关按钮

②点击“开机”按钮，转子转速会逐步增加至 100%额定转速（对应的频率为 50Hz）附近，若“电机转速”未达到额定转速，可通过“增速/减速”按钮以调整转速，直至达到额定转速附近（如图 16 所示）。达到额定转速并稳定运行 1~2 分钟后，再启动励磁；

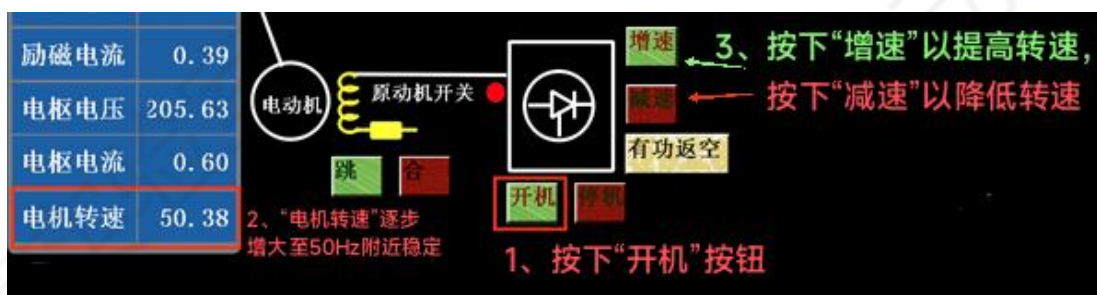


图 16 启动原动机

2) 启动励磁

①点击“灭磁开关-合”按钮，当指示灯由绿变为红，则表示合闸成功，（如图 17 所示）；

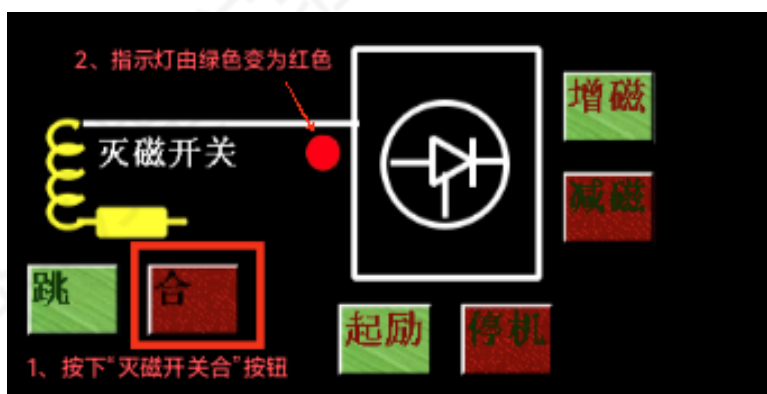


图 17 励磁合闸

②点击“起励”按钮，此时发电机升压变压器低压侧线电压增至 400V 附近，若低压侧线



图 18 投入励磁

电压未达到 400V，则可通过“增磁/减磁”按钮以调整线电压，直至达到发电机升压变压器低压侧线电压 400V（高压侧 800V）附近，如图 18 所示。

同步发电机已启动操作完成，并运行在额定转速和额定电压附近。

3.2 模拟同步发电机并列

3.2.1 并列操作

（1）本地操作

本地操作并列时，可采用自同期并列方式，操作步骤如下：

- 1) 启动原动机，使同步发电机的转速达到额定转速；
- 2) 依次闭合无穷大系统系统侧开关、电源侧开关、线路分相开关；
- 3) 闭合模拟同步发电机的同期开关，立即投入同步发电机励磁（由于同期开关和励磁开关不在同一个柜体内，所以此步骤需要两名实验人员密切配合，才可以进行）。

注：本次实验不采用自同期并列，此操作步骤只作为了解内容。

（2）远程操作

准同期并列的远程操作步骤如下：

- ①按照 3.1.2 节中的操作步骤，完成模拟同步发电机启动；然后在监控软件的项目栏中选择“发电机-负荷-无穷大系统”系统（如图 19 所示），双击进入控制界面（如图 20 所示）。



图 19 “发电机-负荷-无穷大”项目栏

②依次闭合“系统侧开关”、“电源侧开关”、“分相开关”（包括 A、B、C 三相开关）。

注：开关标志由“未填充颜色的矩形边框”变为“填充颜色的矩形边框”（如图 21 所示），则表示合闸成功。

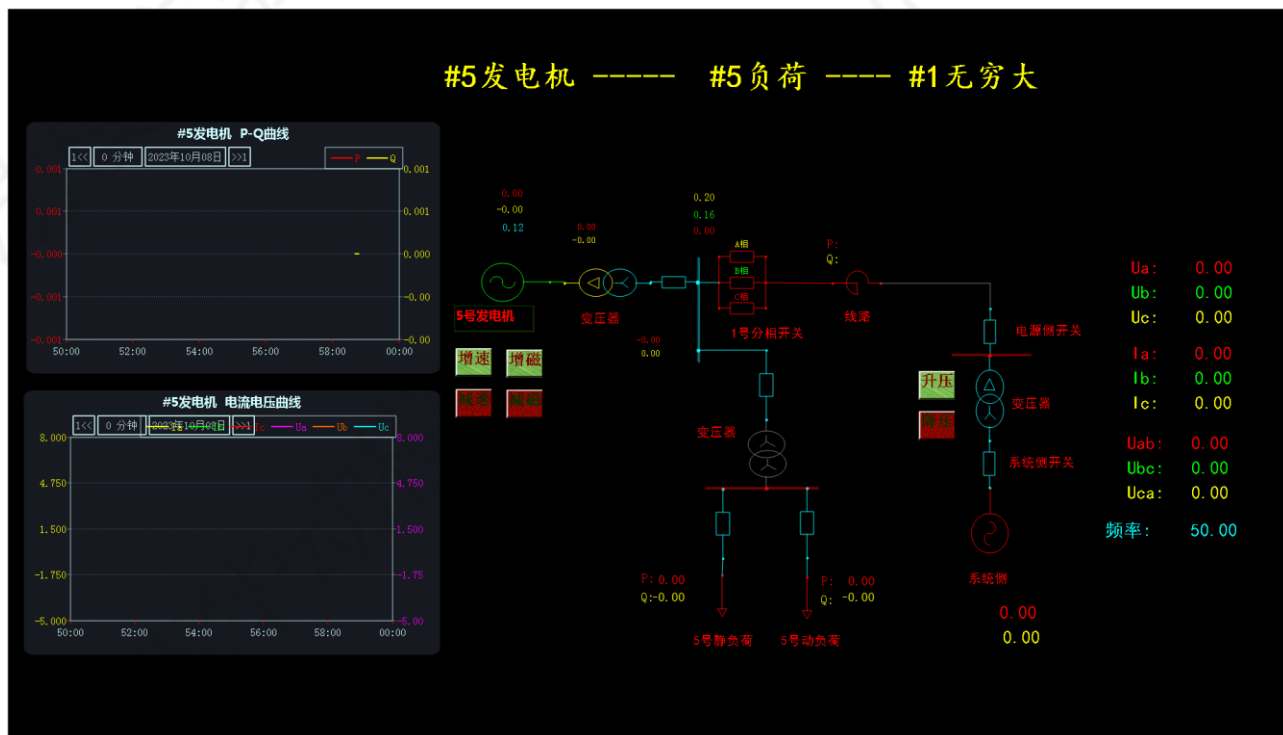


图 20 “发电机-负荷-无穷大”操作界面

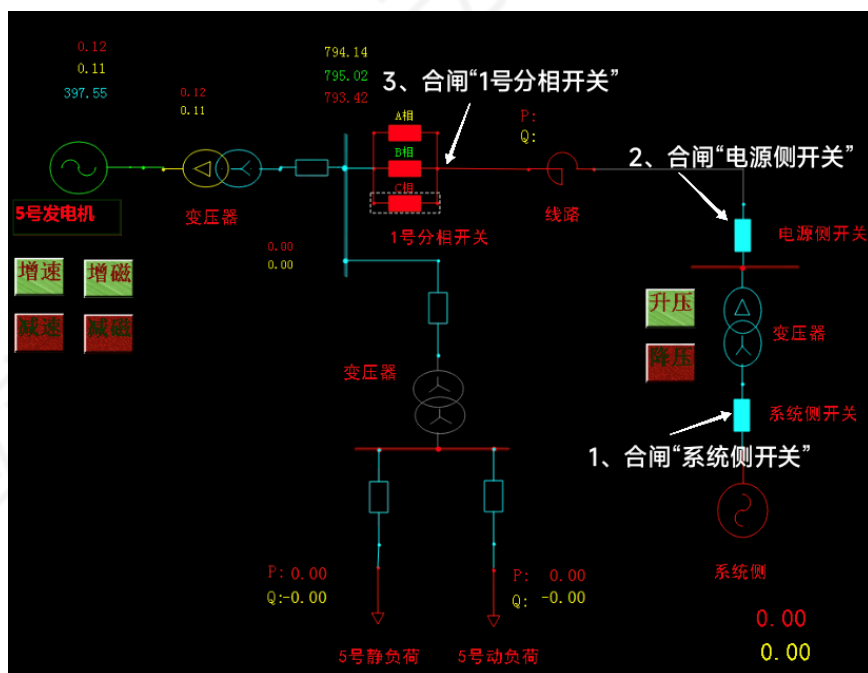


图 21 依次合闸各开关

③无穷大系统侧的开关合闸完成后，从左侧项目栏进入“发电机控制界面”，在界面最右

侧有三个表盘（如图 22 所示），分别代表 2.2.2 节中准同期并列的三个要素，即电压差、频率差和角度差；当三个圆盘的指针在蓝色区域时，表示满足准同期条件，可进行下一步的准同期合闸操作。若指针未处于蓝色区域则可通过“增磁/减磁”按钮调整发电机机端电压（如图 18 所示）、“增速/减速”按钮调整发电机的转速（如图 16 所示）。

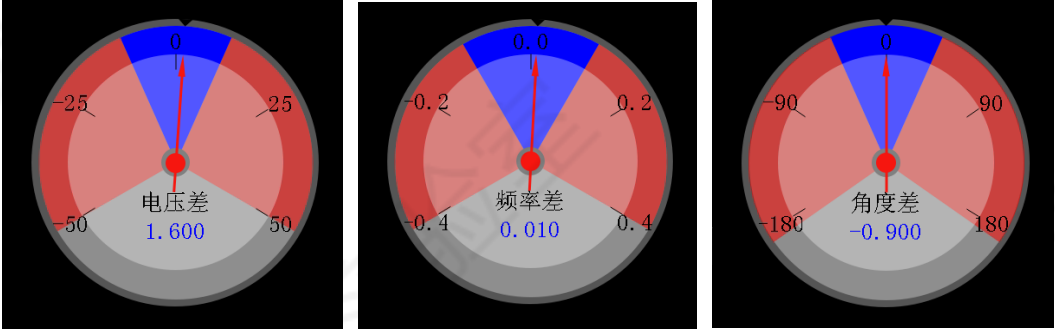


图 22 各差值表盘

④当三个表盘的指针都进入蓝色区域时，点击“同期合闸”按钮，若指示灯由绿色变为红色，则表示同期开关合闸成功，即发电机并列成功，如图 23 所示；若指示灯仍为绿色，则表示同期开关合闸不成功，需要通过调整使发电机满足准同期条件，再次进行合闸操作。

注：由于电压相位具有时变性无法调整，可通过等待或者微调有功功率（增速按钮）的方式，使指针进入蓝色区域，另外，由于同期合闸操作指令具有一定时间延迟，可以在角度差表盘指针快进入蓝色区域时提前进行合闸。

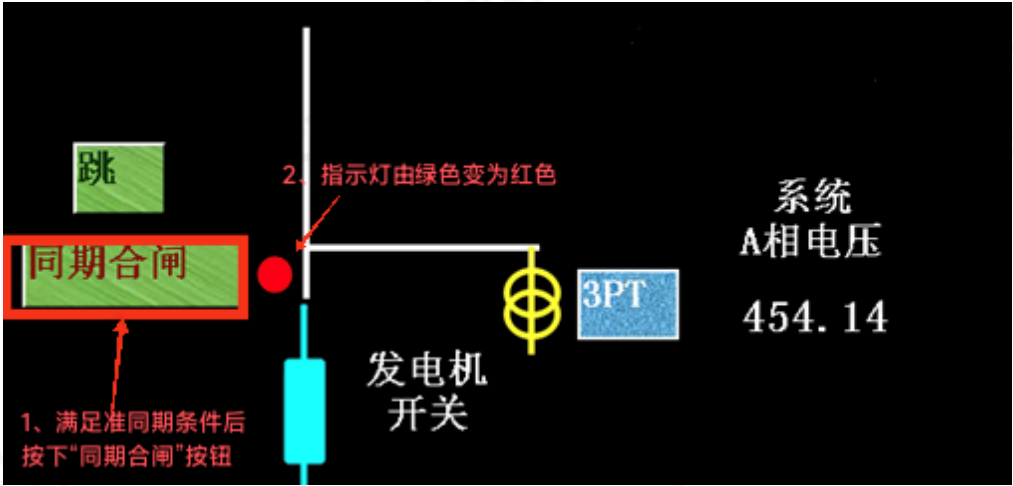


图 23 准同期合闸

模拟同步发电完成同期并列操作，即已与系统连接。

3.3 模拟同步发电机解列及停机

(1) 本地操作

1) 同步发电机解列

①通过调整调速和励磁按钮，将发电机输出的有功功率和无功功率调整至零附近；

②断开发电机的同期开关，使发电机脱离系统，就完成了发电机的解列；

2) 同步发电机停机

①按照上述步骤 1) 的操作完成同步发电机的解列操作；

②关闭励磁。将励磁面板的“整流-逆变”旋钮拨至“逆变”，此时“机端电压”及升压变压器柜的 A 相、B 相、C 相电压都会降至 0V（如图 24、图 25 所示），然后按下“灭磁开关分”按钮，此时“灭磁开关分闸”亮绿灯（如图 26 所示）。



图 24 机端电压



图 25 升压变压器柜



图 26 关闭励磁

③关闭原动机。将发动机启动面板的“整流-逆变”旋钮拨至“逆变”，转速会逐渐降至 0，等待转速完全降至 0 后，再按下“原动机开关-分”按钮，此时“电源开关分闸”亮绿灯（如图 27 所示）。注：此处必须要在发电机转速完全降为 0 后，再按下“原动机开关-分”按钮。



图 27 关闭原动机

(2) 远程操作

1) 发电机解列

①解列前需要将发电机输出的有功功率和无功功率调整至 0 附近,通过点击“增速/减速”按钮调节有功功率大小,以及“增励/减励”按钮调节无功功率的大小(如图 28 所示);

②有功功率和无功功率调整至 0 附近后,点击“跳”按钮,若指示灯由红色变为绿色,即完成了发电机的解列(如图 29 所示)。

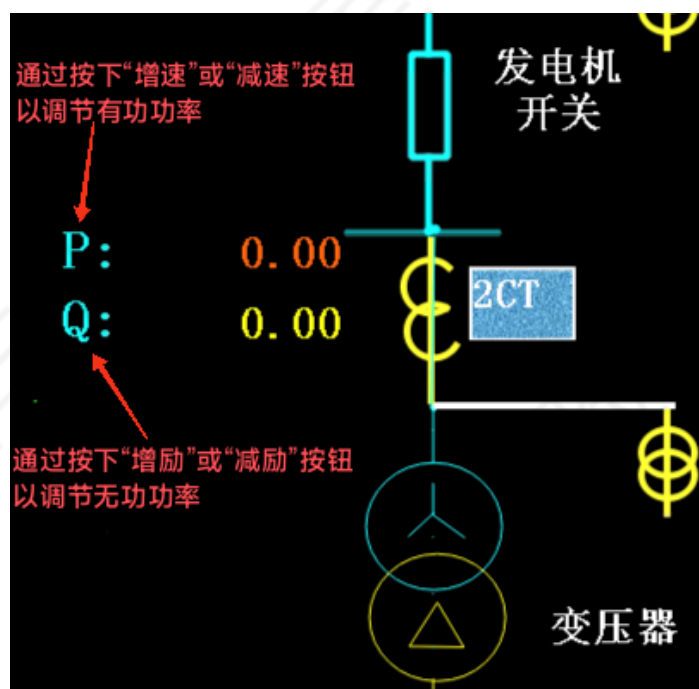


图 28 调节有功和无功功率

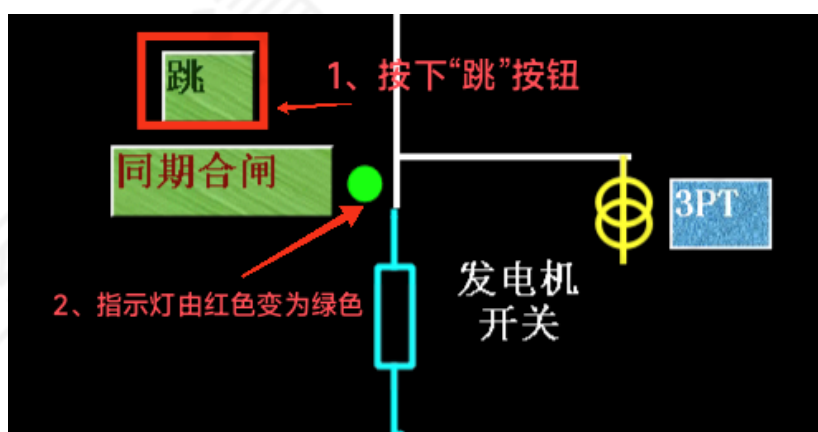


图 29 发电机解列

2) 同步发电机停机

①按照上述步骤 1) 的操作完成同步发电机的解列操作。

②关闭励磁。点击励磁处的“停机”按钮，此时低压侧线电压降至 0V 附近（由于剩磁的存在，故线电压无法完全降至 0V），然后点击“灭磁开关-跳”按钮，此时指示灯将由红色变为绿色（如图 30 所示）。

③关闭原动机。点击原动机处的“停机”按钮，电机转速逐渐降至 0，等待发电机转速完全降至 0 后，点击“原动机开关-跳”按钮，此时指示灯将由红色变为绿色（如图 31 所示）。

注：此处必须要在发电机转速完全降为 0 后，再按下“原动机开关-分”按钮。

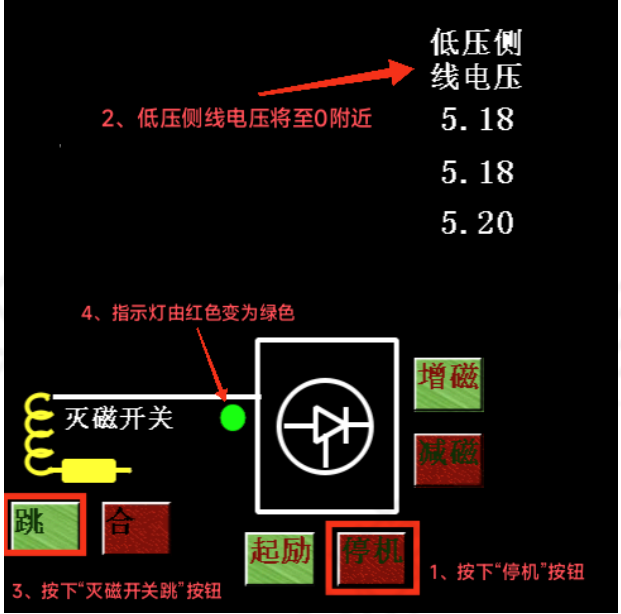


图 30 关闭励磁系统

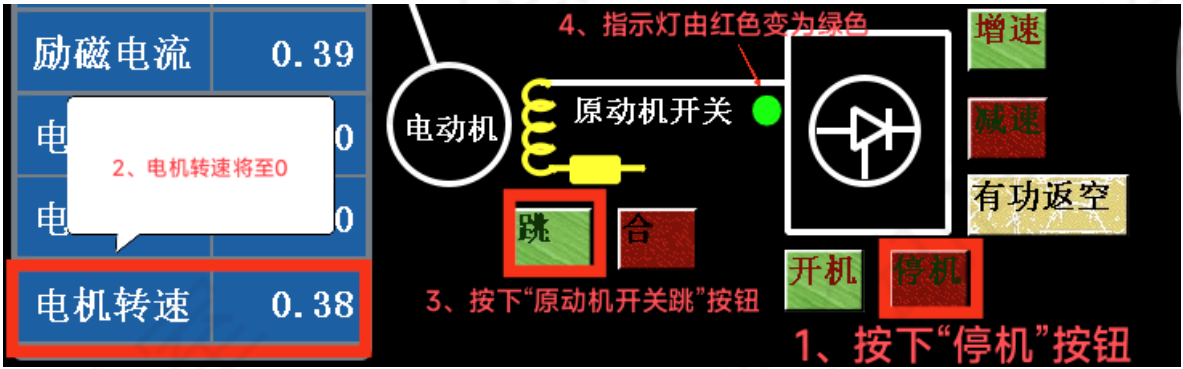


图 31 关闭原动机

④无穷大系统退出。发电机停机完成后，从动模系统监控软件左侧项目栏进入“发电机-负荷-无穷大系统”控制界面，依次跳开“分相开关”、“电源侧开关”、“系统侧开关”（如图 32 所示）

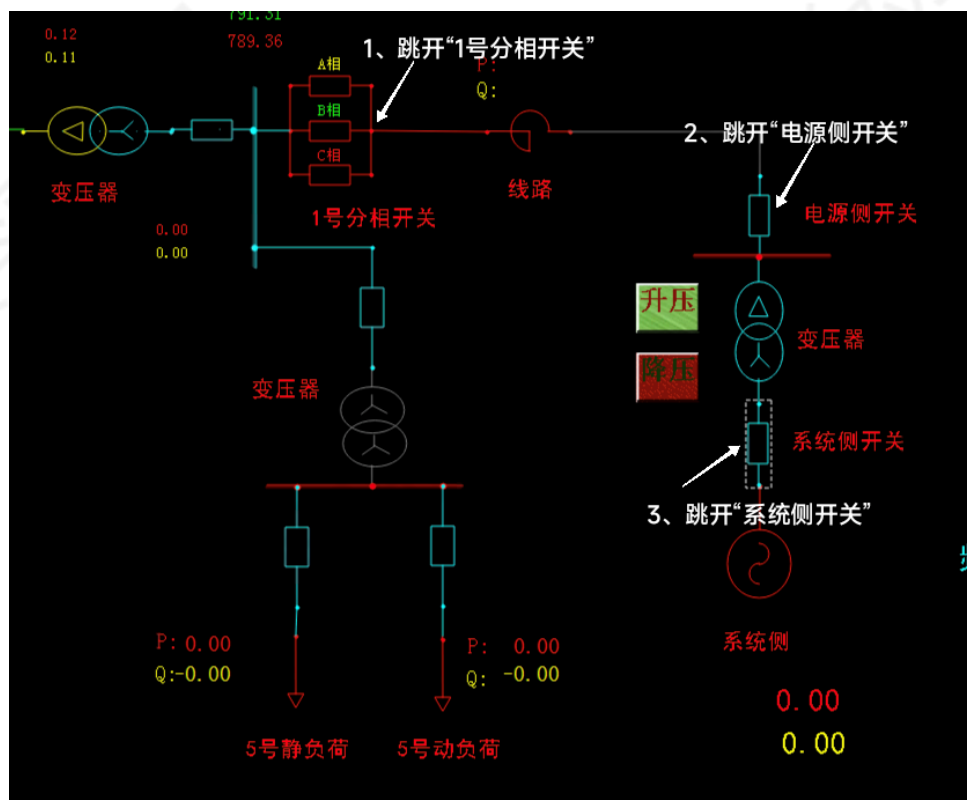


图 32 依次分闸

模拟同步发电机完成解列，即已断开与系统的连接。

3.4 实验内容

由于课上时间有限，实验所需电气设备已按照系统图提前连接好，课上同学们不需要动手自己连接，即可开始实验。课上每个小组需要完成以下 4 个实验（另外有一个正常条件下的并列、解列实验，其实是 5 个实验），课前请先设计好每个实验的操作步骤，避免课上无法完成实验，影响实验成绩。

（1）实验内容 1：发电机机端电压幅值分别高于/低于并列点（即，同期点）系统侧电压（800V）幅值 10%时，进行并列操作，绘制发电机机端电压、电流、功率、频率曲线，与正常并列条件进行对比，分析不同并列条件下对同步发电机的冲击；

（2）实验内容 2：发电机机端频率高于/低于并列点（即，同期点）系统侧频率 0.5Hz 时，进行并列操作，绘制发电机机端电压、电流、功率、频率曲线，与正常并列条件进行对比，分析不同并列条件下对同步发电机的冲击。

（3）实验内容 3：发电机输出有功功率为正（通常不超过 0.5kW）、无功功率为负（不超过负 1kVar，即吸收无功功率）时（此种运行方式为同步发电机进相运行），进行解列操作，

绘制发电机机端电压、电流、功率、频率曲线，对比分析不同并列条件对同步发电机的冲击；

(4) 实验内容 4：发电机输出有功功率为零、无功功率为正值（不超过 1kVar，即发出无功功率）时，进行并列操作，绘制发电机机端电压、电流、功率、频率曲线，对比分析不同并列条件下对同步发电机的冲击。

(5) 对比实验 1、2 及正常操作时的实验结果，分析在何种方式下对同步发电机组的冲击比较大？同样，对比实验 3、4 及正常操作时的实验结果，分析哪种解列方式下对同步发电机组的冲击比较大？

(6) 实验内容 5：调整发电机发出的有功功率，使其增加到 2kW 左右，观察无功功率变化情况；然后，再调整发电机无功功率使其分别为 1kvar 和 -1kvar，观察有功功率变化情况，并分析其原因。

四、实验报告

4.1 实验报告形式

(1) 实验报告提交时间：每次实验课结束后 2 周内提交；

(2) 实验报告格式：格式自由，提交 word 版（实验报告首页注明实验名称、实验时间、小组成员姓名及学号等信息）；

(3) 实验报告提交方式：以电子邮件的方式发送到邮箱 manthu@tsinghua.edu.cn，邮件主题严格按照“2024 秋-电力系统实验报告-姓名 1-姓名 2”的形式；

(4) 动模监控软件后台服务器会实时记录系统运行数据，实验人员需要记录各操作步骤的时间，以便快速从录波数据中找到实验报告所需要的数据。其中，实验报告中所需要的电压、电流等数据，会在每次实验结束后发送到实验课程群。

4.2 实验报告内容

实验报告应包括但不限于以下内容：

(1) 对本次实验目标及内容的理解及主要收获；

(2) 叙述实验内容 1~4 的操作步骤及对应的实验结果，并绘制发电机机端电压、电流、功率、频率曲线，并与系统正常条件并列时的结果进行对比，分析分别在何种并网、解列方式下对发电机组的冲击作用大；

(4) 叙述实验内容 5 的操作步骤及对应的实验结果，并绘制发电机机端电压、电流、功率、频率曲线，分析调整发电机组有功和无功功率时，有功和无功的变化规律及其原因。