

# 2025 年春季学期电力系统实验方案

## 一、实验目的

(1) 基于电力系统物理动态模拟实验平台，研究电力系统静态稳定问题，加深电力系统静态稳定极限的理解。

(2) 基于电力系统物理动态模拟实验平台，分析负荷变化时系统各物理量的动态变化规律，理解电力系统功率平衡概念。

## 二、实验内容

(1) 无自动励磁调节器时（励磁恒定，实验前已设置完成），手动调节发电机转速，改变发电机有功功率，测定发电机的静态稳定极限。操作步骤如下：

- ✓ 励磁系统调节为恒控制角模式，使发电机运作于恒定励磁状态；
- ✓ 通过调节增/减速、增/减磁按钮，使发电机输出功率为 0、电压为额定电压（400V）；
- ✓ 发电机并网操作；
- ✓ 在不调节发电机励磁的状态下，通过增速按钮，不断增加发电机的有功功率，直至发电机失步

注：1) 调节发电机有功功率时，应该缓慢调节，每次调节后，需要等待一段时间，观察系统是否稳定；2) 当发电机失稳后，应该迅速通过调整减速按钮，维持发电机在额定转速；3) 如果发电机因失速而跳闸，则断开并网开关，待发电机停稳后，在发电机励磁调速屏柜上进行复位操作，然后再重新启动发电机。

(2) 在单机无穷大系统中，手动投切静态负荷，观测同步发电机及系统各物理量（电压、电流、频率）的变化过程。

- ✓ 发电机并列运行：调节速度给定和增磁按钮，使发电机  $P=0.3P_N$ 、 $Q=0.3Q_N$ 。分别投入 1 kW、3 kW、5 kW 的电阻负荷（有功功率），观察各电量的变化，记录负荷投入前后的各电量曲线，分析增加的有功负荷由发电机还是系统提供；
- ✓ 发电机并列运行：调节速度给定和增磁按钮，使发电机  $P=0.3P_N$ 、 $Q=0.3Q_N$ 。分别投入 1 kVar、3 kVar、5 kVar 的电感负荷（无功功率），观察各电量的变化，记录负荷投入前后各电量曲线，分析增加的无功负荷由发电机还是系统提供；
- ✓ 发电机并列运行：调节速度给定和增磁按钮，使发电机  $P=0.3P_N$ 、 $Q=0.3Q_N$ 。分别投入 1 kVar、3 kVar、5 kVar 的电容负荷（无功功率），观察各电量的变化，记录负荷投

入前后各电量曲线，分析增加的无功负荷由发电机还是系统提供。

注：1)  $P_N$ 、 $Q_N$  分别为同步发电机的额定有功功率和额定无功功率；2) 有功功率、无功功率分别增加 3 kW、3 kVar 时，对比发电机各物理（电压、频率）的变化。

(3) 在电力系统仿真软件中，构建单机无穷大系统模型，模拟负荷投切、三相短路等扰动情况下，观测发电机及系统各物理量的变化过程。（课下选做，仿真软件任选 CloudPSS、PSS/E、PSASP、BPA、PSCAD、Simulink 等）。

### 三、实验原理

本部分给出了实验设备的操作方法，但不完全是实验内容的操作步骤，同学们需要自己根据实验内容，设计各实验的操作步骤。

#### 3.1 同步发电机组的基本构成

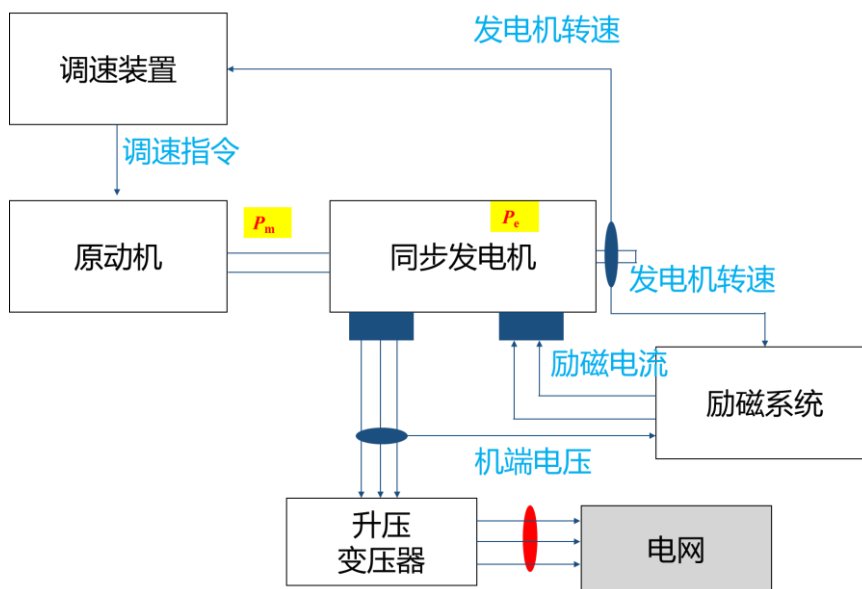


图 1 同步发电机机组结构示意图

##### 3.1.1 调速器作用

为了控制原动机向发电机输出的机械功率，并保持电网的正常运行频率，以及再各并列运行的发电机之间合理分配负荷，每一台原动机配置调速器。调速器一般通过改变气门开度或导叶开度来实现功率和频率的平衡调节，通过改变调速器参数或给定值（给定速度或者给定功率）调整发电机功率-频率调节特征。

##### 3.1.2 励磁装置作用

励磁系统向发电机提供励磁功率，起着调节电压、保持发电机端电压或枢纽点电压恒定得作用。并可控制并列发电机的无功功率分配。

### 3.2 发电机功率特性曲线

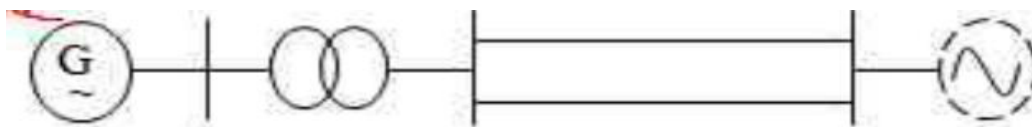


图 2 单机无穷大系统结构示意图

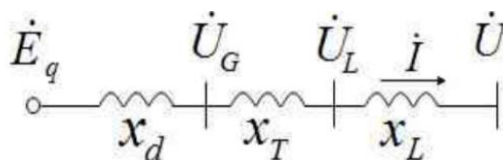


图 3 单机无穷大系统等效电路图

功率特性方程：

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

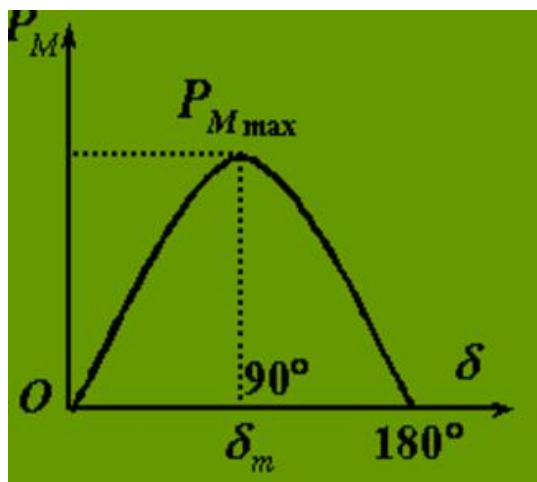


图 4 静态稳定曲线

由图可见，当母线电压  $U$ =定值，如果发电机保持  $E_q$ =定值，则式中将只有一个变量---功率角  $\delta$ ，发电机功率特性曲线为一正弦曲线，其最大值为  $P_{Mmax} = \frac{E_q U}{X_{dc}}$ ，也称功率极限。

$\delta$  角含义

- 两电源电势的相角差，发电机  $q$  轴电势与无穷大系统电源电势之间的相角差。
- 电磁功率的大小与  $\delta$  密切相关，故称  $\delta$  为“功角”或“功率角”。电磁功率与功角的关系式被称为“功角特性”或“功率特性”。
- 功角除了表征系统的电磁关系之外，还表明了各发电机转子之间的相对空间位置。

### 3.3 电力系统稳定性

3.3.1 稳定性概念

电力系统在正常运行状态下，受到小的或大的干扰之后，经过一定时间能否返回到原来稳定运行状态，或者过渡到新的稳定运行状态。如果可以则系统是稳定的，否则系统不稳。

3.3.2 稳定性分类

(1) 按干扰大小分类：

小干扰下的稳定性(静态稳定、动态稳定)，静态稳定不考虑原件及调节器动态、动态稳定计及元件及调节器动态。

大干扰下的稳定性(暂态稳定)

(2) 按物理现象分类：

功角稳定性：电力系统受到扰动后，系统内所有同步电机是否保持同步运行的能力

电压稳定性：维持系统电压在可以接受范围内的能力，即无功平衡的问题

频率稳定性：频率变化是系统负荷与电源之间的功率是否失去平衡

(3) 按研究对象分类：负荷稳定性、电源稳定性。

四、实验平台简介

4.1 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。

4.2 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（带负荷），其结构如图 5 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。

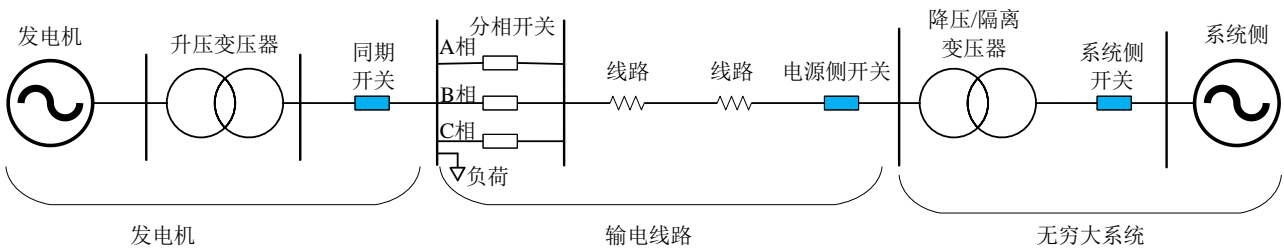


图 5 单机无穷大系统结构示意图

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

4 号机组的额定容量为 10kVA，5 号机组的额定容量为 5kVA，功率因素按照 0.8 估算有功和无功：4 号机组的额定有功功率约为 8 kW，额定无功功率约为 6k var；5 号机组的额定有功功率约为 4 kW，额定无功功率约为 3k var。

## 五、实验设备操作

### 5.1 模拟同步发电机启动

#### (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 6 所示），双击进入发电机操作界面（如图 7 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 8 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 6 “发电机”项目栏

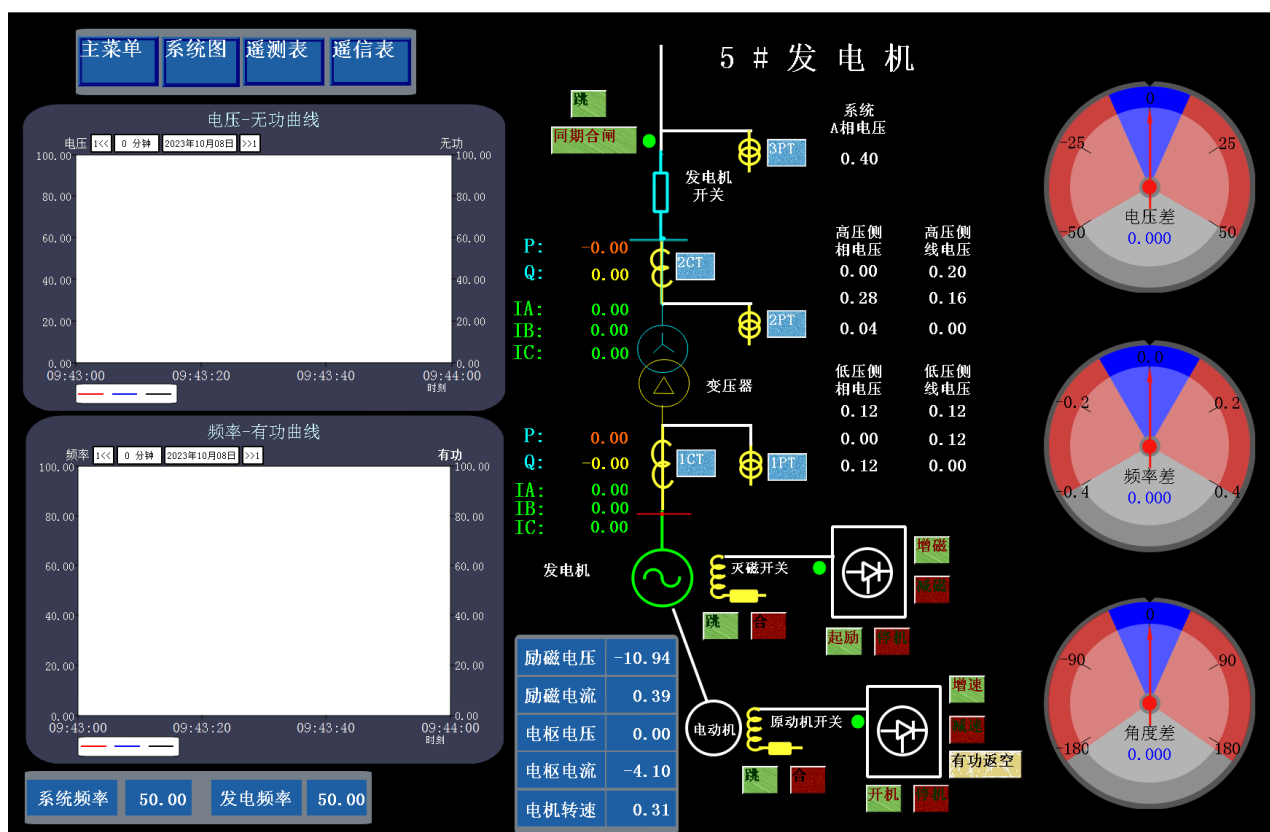


图7 “发电机”操作界面

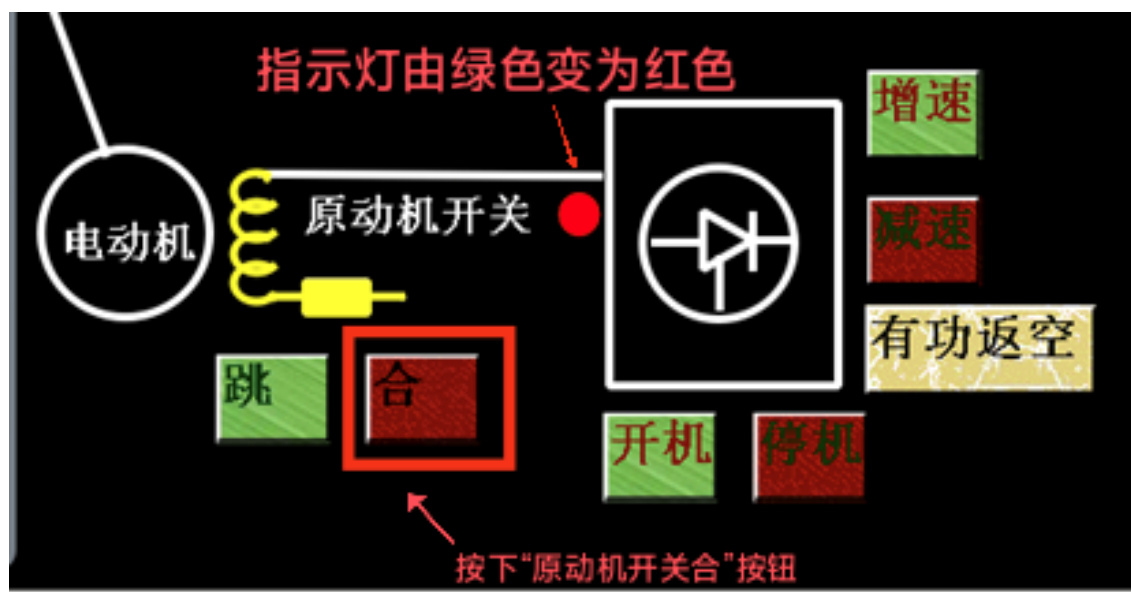


图8 原动机开关按钮

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 9 所示）。达到额定转速并稳定运行 1~2 分钟后，再启动励磁；

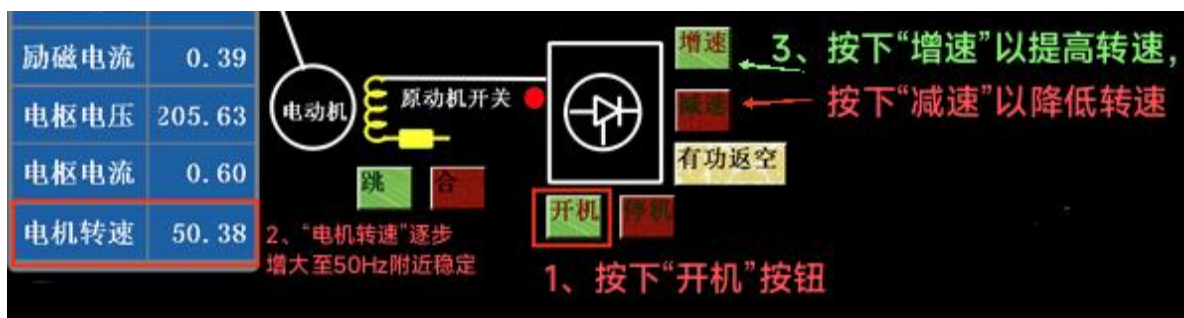


图9 启动原动机

## (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10所示）；

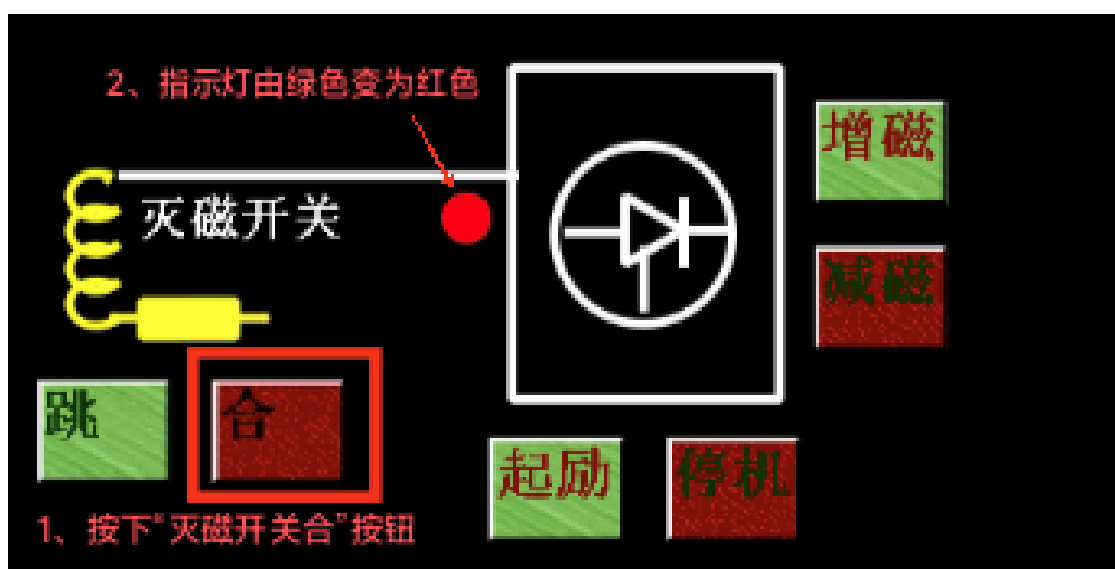


图10 励磁合闸

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11所示。



图 11 投入励磁

**至此，同步发电机已启动操作已完成，并运行在额定转速和额定电压附近。**

## 5.2 模拟同步发电机并网

准同期并网的远程操步骤如下：

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 12 所示），双击进入控制界面（如图 13 所示）。

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 14 所示），则表示合闸成功。





图 12 “发电机-负荷-无穷大”项目栏

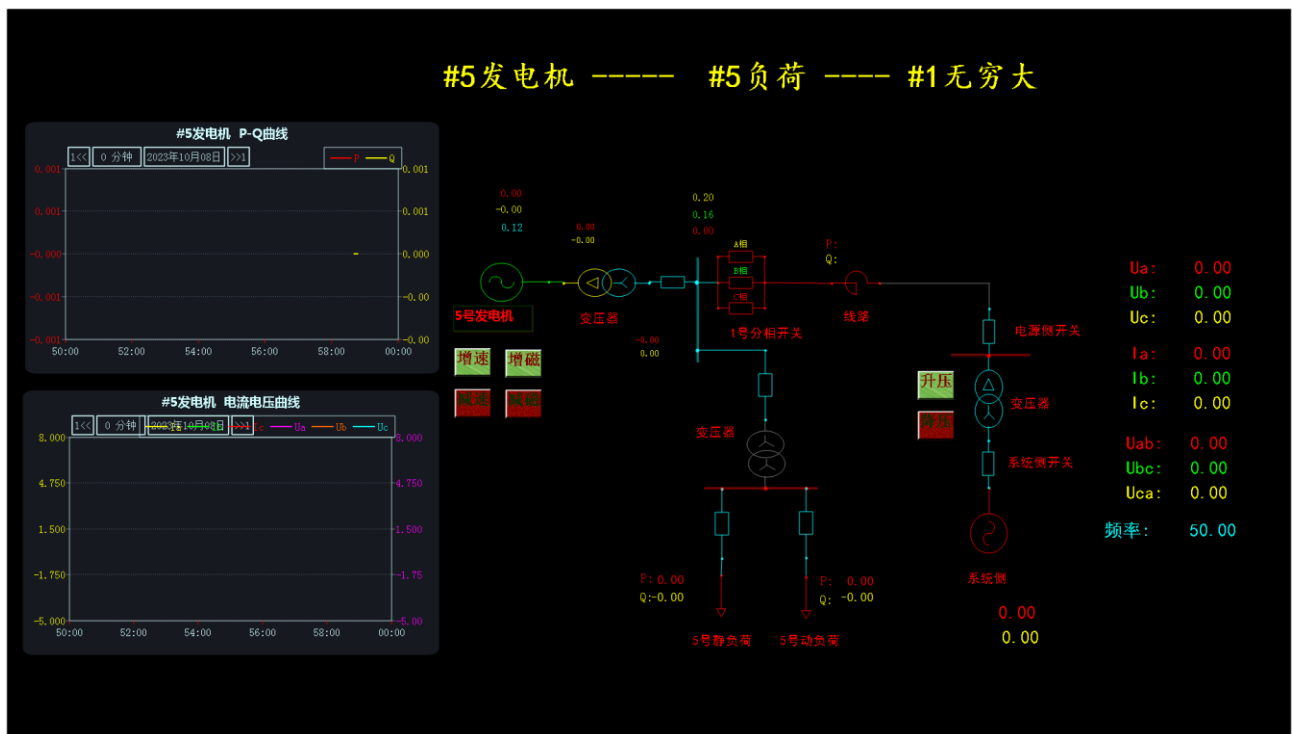


图 13 “发电机-负荷-无穷大”操作界面

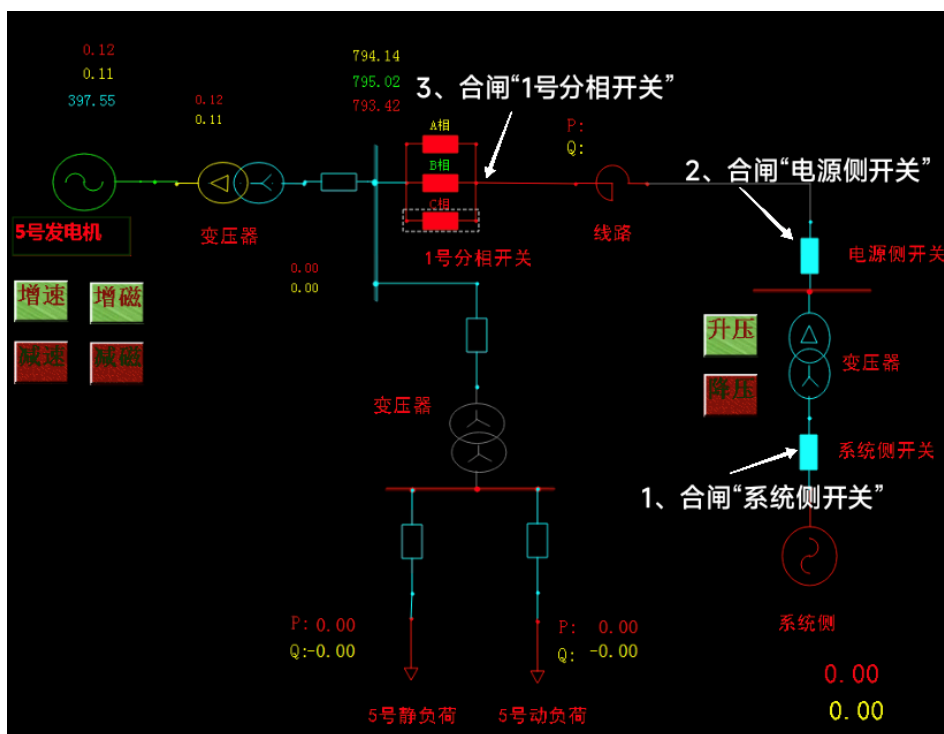


图 14 依次合闸各开关

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 15 所示），分别代表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 16 所示）、“增速/减速”按钮调整发电机的转速（如图 16 所示）。

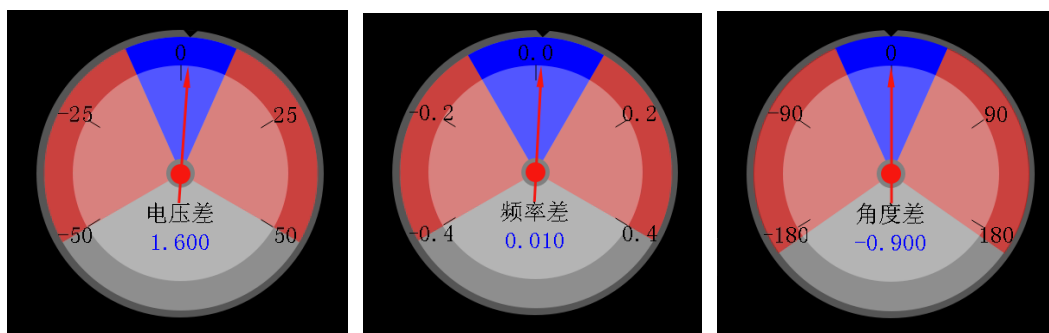


图 15 各差值表盘

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 16 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。

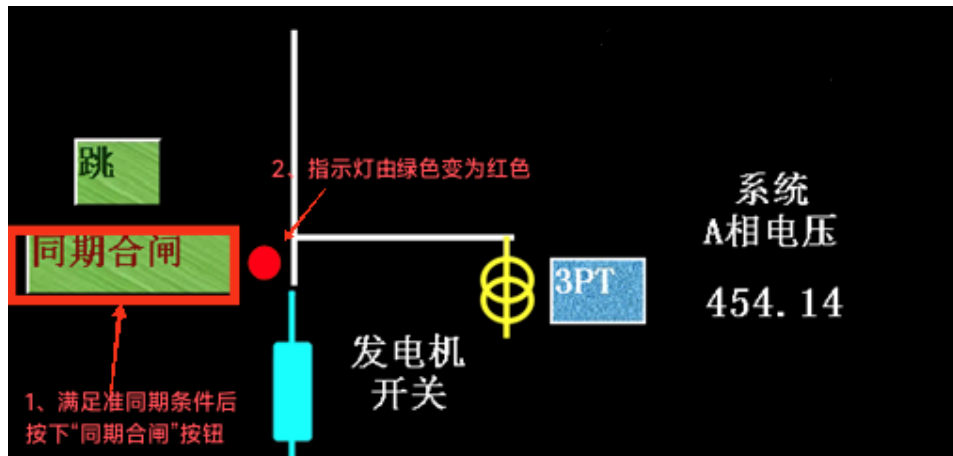


图 16 准同期合闸

**至此，模拟同步发电机已完成同期并列操作，即已与系统连接。**

### 5.3 模拟同步发电机解列及停机

#### (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 17 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,则表示发电机解列成功(如图 18 所示),若指示灯仍为红色,则表示发电机解列未成功,需再次点击“跳”按钮。

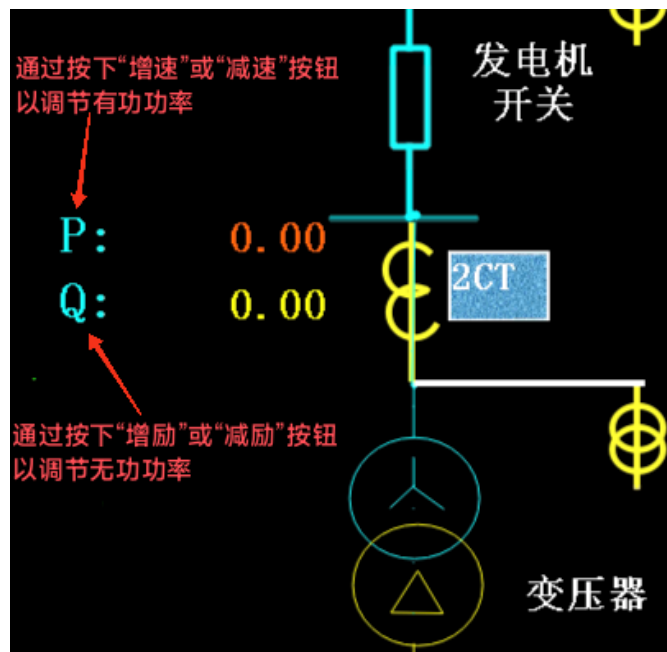


图 17 调节有功和无功功率

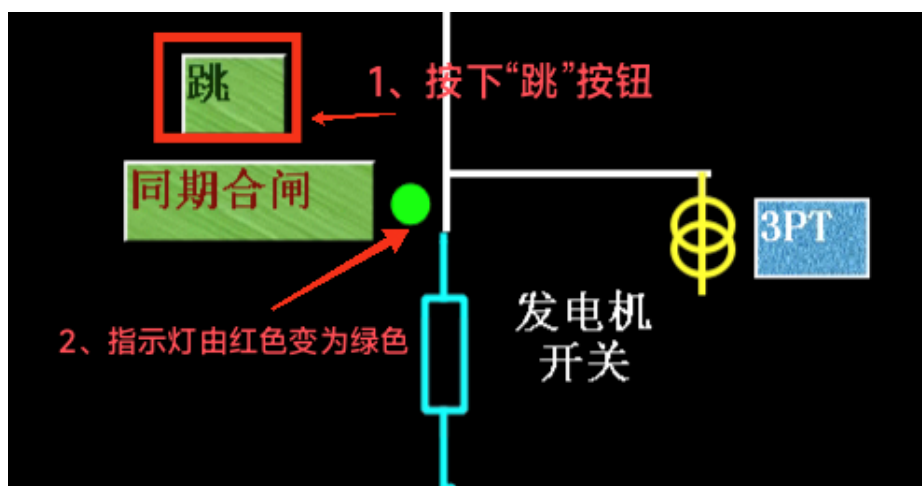


图 18 发电机解列

## (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 19 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 20 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 19 关闭励磁系统

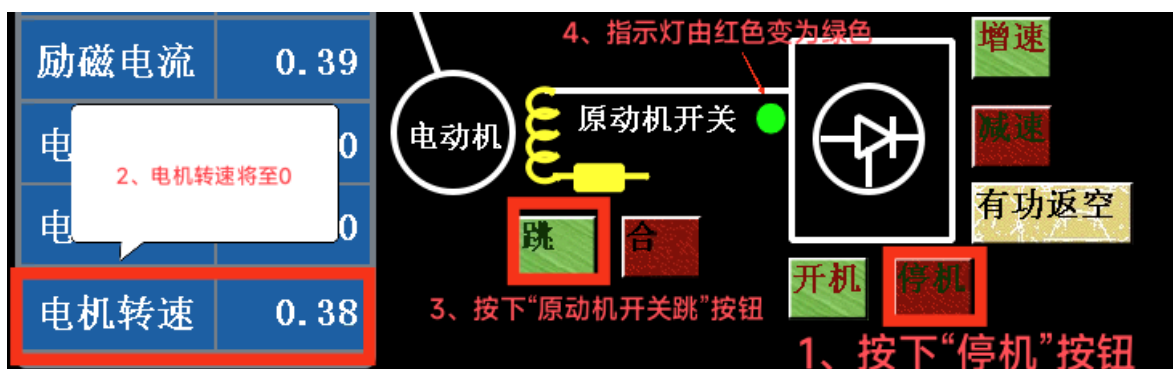


图 20 关闭原动机

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 21 所示）

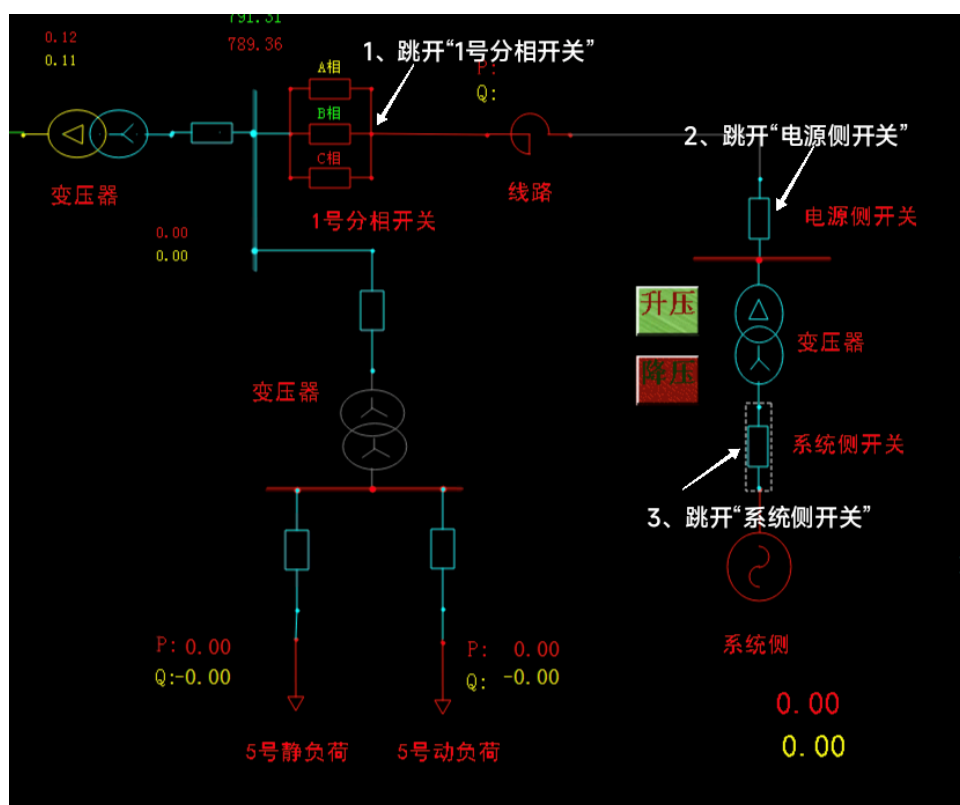


图 21 依次分闸

**至此，模拟同步发电机已完成解列，即已断开与系统的连接。**

## 5.4 负荷操作

### (1) 负荷投运

1) 在监控软件的项目栏中选择相应的静态负荷（4 号、5 号），双击进入操作界面，如图所示。

- 2) 在控制命令区，修改电阻、电感、电容数据。双击对应区域的数值，输入需要设定的数值。注意：输入的投入电阻、电感和电容的组数，每一组对应 333W，比如 A 相输入 1kW 的阻抗负荷，需要在相应位置输入数字 3。
- 3) 设定完成后，依次闭合静负荷分相开关，然后再闭合静负荷设备开关，最后闭合静负荷开关。

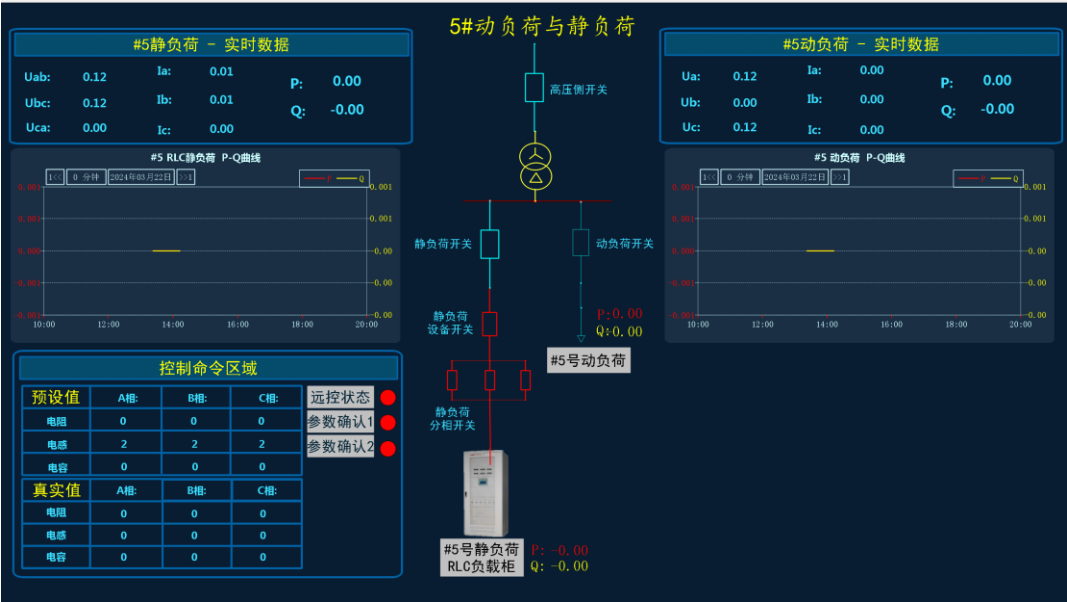


图 22 负荷操作界面

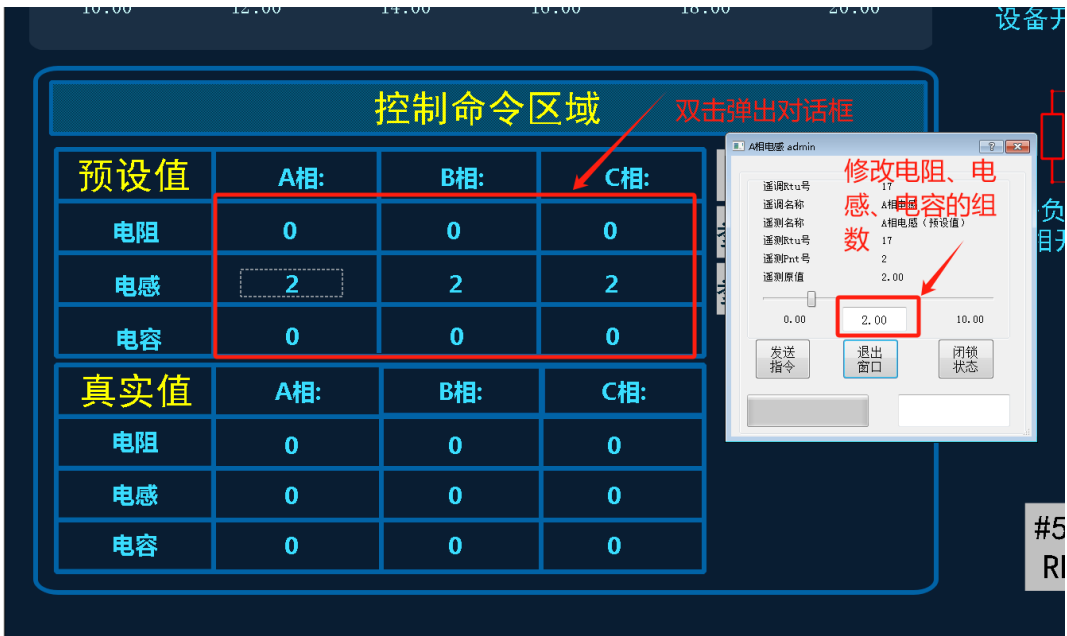


图 23 负荷大小设置

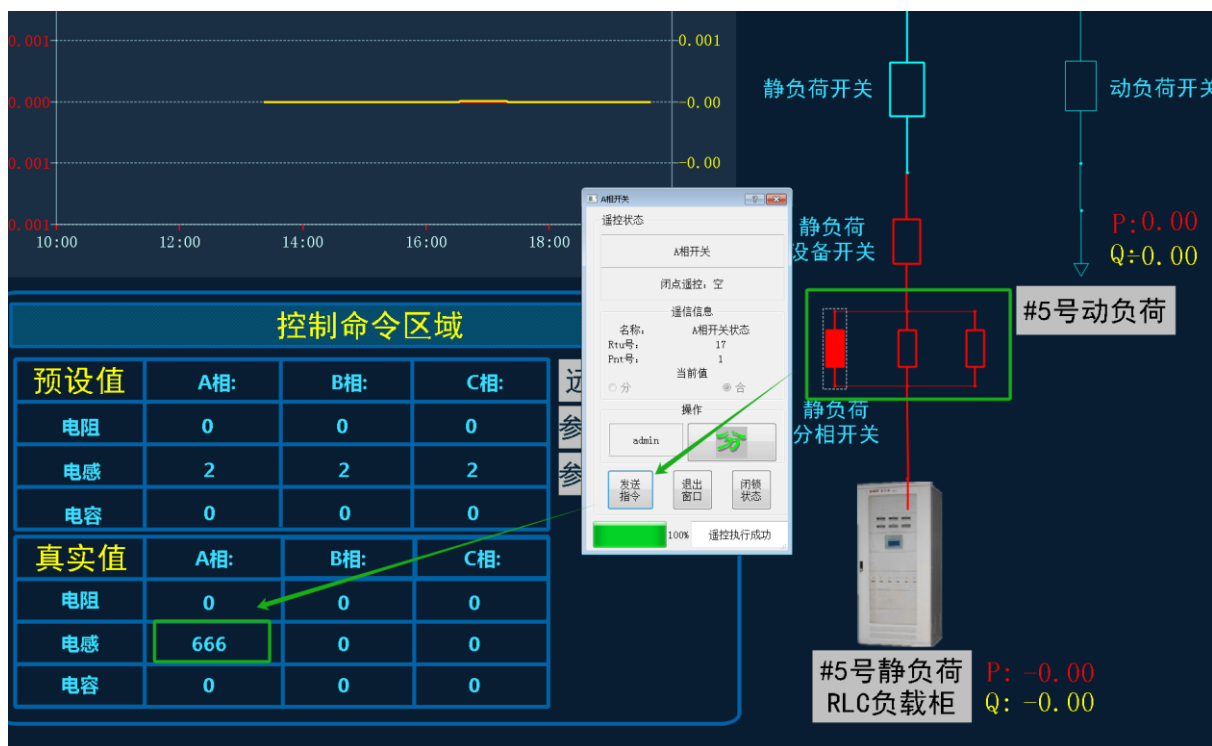


图 24 负荷开关

## (2) 负荷切除

负荷切除步骤与（1）步骤正好相反。

# 六、实验报告

## 6.1 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：提交 word 或 PDF 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，邮件主题采用“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。

## 6.2 实验报告内容及要求

课上完成实验（1）、（2）内容，课后完成相应实验报告，实验（3）数字仿真扩展选作内容，实验成绩总计 15 分，课上操作占 5 分、实验报告占 10 分。实验报告应内容条理清晰、书写规范，主要包括以下内容：

(1) 对本次实验目标及内容的理解;

(2) 叙述各实验的操作步骤, 并绘制发电机机端电压、电流、功率、频率等各物理量的曲线, 并对实验结果进行分析;

(3) 思考题

1) 电力系统静态稳定的概念是什么? 稳定极限与哪些因素有关?

2) 为什么说在  $E_q$  和无穷大系统电压恒定时, 发电机输出的电磁功率只取决于功角?

3) 什么是电力系统大扰动、小扰动?