

大作业任务书

上海交通大学本科课程：《电力系统应用综合实验》（EE300）

授课：汪可友教授、徐晋助理教授

一、大作业要求

1. 基于之前课程理论及作业程序，自行编程，完成单机无穷大系统综合实验，包括以下内容：
 - (1) 同步电机空载、短路特性实验；
 - (2) 单机无穷大系统暂态稳定实验；
 - (3) 发电机同期并网实验。
2. 完成形式：按2人分组，小组共同完成。
3. 截止时间：17周周末（2022-6-12）。
4. 提交材料：大作业报告（注明成员分工及贡献占比）+ 完整代码程序，以小组形式提交。

二、实验系统

搭建如下单机无穷大系统模型：

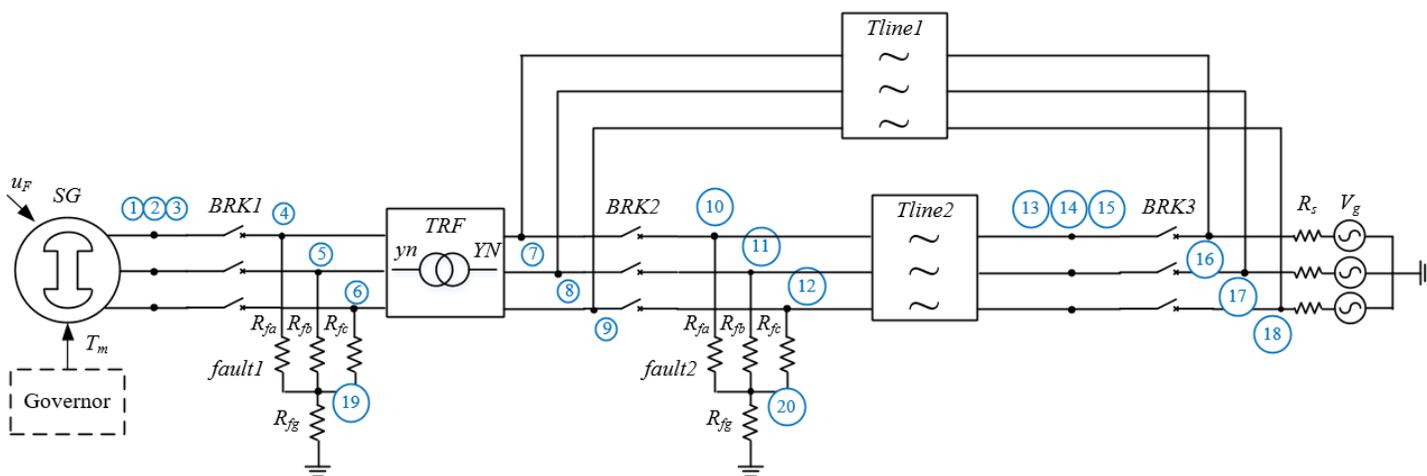


图1 单机无穷大系统拓扑

图1单机无穷大系统中，单台同步发电机（SG）经变压器（TRF）升压后，通过双回输电线与一个电压源相连，电源模型即代表简化了的无穷大系统。同步电机端口处设有断路器（BRK1）及三相接地短路故障（fault1），可配合进行同步电机空载、短路特性实验。双回输电线等长，包括上回线路（Tline1）以及下回线路（Tline2），下回线路首端设置了三相接地短路故障（fault2），两端还设有断路器（BRK2、BRK3）用于切除故障，可进行系统暂态稳定实验。当系统无故障、线路均正常投入时，配合同步机端口断路器（BRK1），可进行发电机同期并网实验（需增设同步机调速系统Governor）。

相关系统参数给出如下：

- (1) 电源参数：线电压有效值 $V_g = 230kV$ ，内阻 $R_s = 0.001\Omega$ ，初始相位（A相）为 $\alpha_0 = 0$ ，频率 $f = 50Hz$ ；

(2) 线路参数：在变压器模块两端需并联缓冲大电阻 $R_{snubber} = 1e3\Omega$ ，未在图1中画出；

(3) 故障参数：限定 $fault1, fault2$ 均为三相接地短路故障： $R_{fa} = R_{fb} = R_{fc} = R_{fg} = 0.001\Omega$ ， $R_{off} = 1e6\Omega$ ，默认初始无故障；

(4) 断路器参数： $R_{on} = 0.001\Omega$ ， $R_{off} = 1e9\Omega$ ，默认初始闭合（同步机空载实验或同期并网实验时，需修改 $BRK1$ 默认初始断开）；

(5) 输电线参数： $Tline1, Tline2$ 完全相同，单位长度参数如下，长度为 $100km$ ，仅分一段：

$R(\Omega/km)$	$L(H/km)$	$C(F/km)$	$R_0(\Omega/km)$	$L_0(H/km)$	$C_0(F/km)$
0.02	1.273e-3	1.273e-11	0.4	3.98e-3	9.55e-12

(6) 变压器参数：给出相关参数如下，采用 $YNyn0$ 连接方式：

$S_n(VA)$	$V_1(V)$	$R_1(\Omega)$	$L_1(H)$	$V_2(V)$	$R_2(\Omega)$	$L_2(H)$	$R_m(\Omega)$	$L_m(H)$
100e6	13.8e3	5e-6	3.788e-4	230e3	1.389e-3	0.1052	1.587e-3	0.5052

(7) 同步机参数：额定容量 $S_n = 100MVA$ ，额定电压 $U_n = 13.8kV$ ，给出相关电机参数如下（均为标么值，以相电压、相电流幅值为定子侧电压、电流基准值）：

x_d	x_{ad}	x_F	x_D	x_{FD}	r_F	r_D	x_0
1.79	1.66	1.722	1.6655	1.66	0.001406	0.004085	1.75
x_q	x_{aq}	x_H	x_Q	r_H	r_Q	r	T_j
1.71	1.58	1.906	1.675	0.01406	0.008223	0	$5.787*100\pi$

视实验要求，再给定初值 U_0, θ_0, ω_0 。

另外，给出调速系统相关系数参数如下（ K_{mH} 为同步机额定容量与系统基准容量之比，实验中取 1）：

K_δ	$T_s(s)$	$T_{CH}(s)$	$T_{RH}(s)$	a
25	0.2	0.2	5	0.25

三、实验内容

1. 同步电机空载、短路特性实验

(1) 同步电机空载实验

仿真时间 20s，仿真步长 $500e-6s$ 。给定同步机初值 $U_0 = 1, \theta_0 = -\frac{\pi}{2}, \omega_0 = 1$ ，锁定同步机转速恒

定为初始转速，同步机按空载初始化，所得励磁电压记为 u_{F0} 。设定BRK1初始状态为断开（data.m里修改输入参数，相应修改ctrl_BRK1、Toff_BRK1，下同）使同步机空载，运行仿真，待结果稳定后，记录此时的励磁电流 I_f 及同步机机端电压三相有效值平均值 U_G ，均为标么值。

按下表，励磁电压改为外部输入，重复实验，记录多组数据填入下表1。

表1 同步电机空载实验数据记录

u_F/u_{F0}	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
I_f								
U_G								

(2) 同步电机短路实验

仿真时间10s，仿真步长500e-6s。给定同步机初值 $U_0 = 1, \theta_0 = -\frac{\pi}{2}, \omega_0 = 1$ ，锁定同步机转速恒定为初始转速，同步机按空载初始化，所得励磁电压记为 u_{F0} 。仿真初始无故障，断路器均闭合，设定 $fault1, t = 0.2s$ 时投入使同步机短路，运行仿真，待结果稳定后，记录此时的励磁电流 I_f 及同步机端口三相短路电流有效值平均值 I_k ，均为标么值。

按下表，励磁电压改为外部输入，重复实验，记录多组数据填入下表2。

表2 同步电机短路实验数据记录

u_F/u_{F0}	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
I_f								
I_k								

(3) 测量同步机直轴同步电抗 x_d

基于上表1、表2数据，在同一张图上绘制同步电机空载特性曲线 $U_G = f(I_f)$ 与短路特性曲线 $I_k = f(I_f)$ 。结合曲线计算同步电机直轴同步电抗 x_d ，计算多组数据取平均值，并与同步机设定参数做比较，简要分析。

2. 单机无穷大系统暂态稳定实验

(1) 稳态仿真

指定同步机输出功率为 $P_G = 0.5, Q_G = 0.1$ ，利用如下函数计算 $xy0$ 坐标系下同步机端口电压、电流分量 U_x, U_y, I_x, I_y （采用matlab 符号运算直接求解二元潮流方程）。

```

function [Ux0,Uy0,Ix0,Iy0] = cal_SG_init_value(PG,QG)
% 由同步机端口输出功率计算端口电压、电流
% 同步机端口经变压器电抗xT、双回输电线电抗xL,与大电网Vg相连
global gTline gTRF
syms Ux Uy

m1=gTline.mTline;xL=m1(1,4)*m1(1,9); %Tline
m2=gTRF.mTRF;k=m2(1,7)/m2(1,4);xT=m2(1,6)*k^2+m2(1,9); %TRF

x=xT+xL/2;Vg=1;

U=Ux+1i*Uy;I=(U-Vg)/(1i*x);S=U*conj(I);

result=vpasolve(real(S)==PG,imag(S)==QG,[Ux,Uy],[1,0]); %符号求解

Ux0=double(result.Ux);Uy0=double(result.Uy);
Ix0=real(eval(subs(I,[Ux,Uy],[Ux0,Uy0])));Iy0=imag(eval(subs(I,[Ux,Uy],[Ux0,Uy0])));
end

```

基于上述结果，完成同步机非空载初始化，并记录相应初始化数据如下表3。

表3 同步机非空载初始化数据记录

初始化数据	U_{d0}	U_{q0}	I_{d0}	I_{q0}	δ_0	i_{F0}	u_{F0}	T_{e0}
数值 (p.u.)								

仿真时间10s，仿真步长500e-6s。不锁定同步机转速，初始系统无故障，断路器均闭合，双回输电线均正常投入，运行仿真，待结果稳定后，记录同步机机端三相电压、三相电流、励磁电流、转速、功角、输出功率（有功无功画在一张图里）波形，并与初始化数据比对，分析结果。

(2) 理论计算

结合实验原理介绍，计算确定图1系统等值电路图（仅含等值电抗）。假设某时刻，下回输电线首端发生三相接地短路故障，经一定时间后断路器（BRK2, BRK3）动作将下回输电线切除以排除故障，系统恢复运行。采用等面积法计算极限切除角 δ_{cm} ，并进一步计算极限（故障）切除时间间隔 Δt_{cm} 。

(3) 故障暂态仿真

仿真时间10s，仿真步长500e-6s。在稳态仿真基础上，设定 $fault2, t = 4s$ 时投入使系统故障，但不设定断开BRK2, BRK3，运行仿真，记录故障后相关波形（电机端口电压、电流、励磁电流、转速、功角、输出功率等），并分析故障后现象。

在理论计算结果基础上，尝试设定故障切除时间（BRK2, BRK3同时切除），并运行仿真验证故障后系统是否稳定。多次实验，不断尝试-修正，确定能维持系统稳定的极限（故障）切除时间间隔范围（精确到0.01s），并记录临界的稳定/失稳两种情况下的相关波形，与理论计算进行对比，分析结果。

(建议不使能断路器开断插值，会影响故障切除时间)

gBRK.enable_intplo=0; %使能断路器开断插值处理，即等待电流过零才断开

3.发电机同期并网实验

同步机默认初值 $U_0 = 1, \theta_0 = -\frac{\pi}{2}, \omega_0 = 1$ ，后面视实验需要调整，初始不锁定同步机转速，同步机空载初始化（BRK1初始断开）。网侧电压为并网断路器 BRK1 另一端节点电压，网侧频率、角频率即为基准值 $f_n = 50\text{Hz}, \omega_n = 2\pi f_n$ ，初始相角为0（等同于网侧电源初始相位）。

参照实验原理，自行实现频率差调整单元、电压差调整单元以及合闸信号控制单元。其中，电压差调整单元可简单处理为手动调整外部输入机端空载电压初始值 U_0 （在初始化阶段设定）；频率差调整单元，需自行编写同步机调速控制模块，通过调节 T_m 来实现调节发电机转速；合闸信号控制单元，将检测机端-网侧电压差、频率差是否满足实验设定并网要求，并等待相角差进入允许范围时，发出断路器合闸指令。

实验中，先确定合适的机端空载电压设定值 U_0 （可在网侧节点电压基础上叠加要求的电压差标么值，受频率波动影响，叠加的差值可能需要乘以特定比例系数，可绘制仿真中电压差波形辅助调整），以保证同步机机端空载电压满足实验中合闸的电压差要求；在此基础上，在主循环中开启调速控制，通过调节 T_m 来保证发电机空载角频率 ω 跟随设定参考值 ω_{set} （可设为默认初始值叠加要求的频率差标么值），使频率差满足实验合闸要求；合闸信号控制单元，将计算合闸前断路器两侧电压差（可用 Mea 模块测量两侧电压有效值，间接计算幅值差）、频率差（同步机转速与同步速差值）、相角差（可用同步机功角 δ 表示，反映同步机转速与同步速差值在相角上的积累，注意空载初始化中 $\delta_{|0|} = \theta_{|0|} + \frac{\pi}{2}$ ），当判断满足实验要求的合闸条件时，控制断路器 BRK1 合闸，使同步机并网。为避开仿真开始阶段的暂态波动，可设置 1s 的闭锁时间，即在 $t < 1\text{s}$ 时不进行合闸条件判断和断路器操作。在等待频率差、电压差满足条件后，相角差可能缓慢变化，短时间内难以进入要求的范围，此时可以重新调整同步机初始相位 θ_0 （在默认初始值上叠加一定角度），从而间接改变相角差曲线，使其沿时间轴平移，加快合闸进程。（这里实验不考虑断路器动作时间等工程实际上存在的延迟）

ps：上述相角差测量部分也可按照实际数字式自动并列装置的相角差监测方法来测量断路器两侧正弦信号相角差，作为拓展加分项。

(1) 准同期并网实验

仿真时间10s，仿真步长500e-6s。多次尝试，调整同步机 $U_0, \theta_0, \omega_{set}$ ，使同步机并网时分别满足以下要求（相角差均小于 0.1° ）：1) 频率差0.04Hz，电压差0.04kV；2) 频率差0.04Hz，电压差0.08kV；3) 频率差0.08Hz，电压差0.08kV。记录实际合闸时的电压差、频率差（不要偏离太远），以及并网后冲击电流最大值（根据同步机端口电流数据测量），将相应结果填入下表4，并简要分析。

表4 准同期条件下并网实验记录

结果记录	第一组	第二组	第三组
并网前电压差（单相幅值，kV）			
并网前频率差（Hz）			

结果记录	第一组	第二组	第三组
并网后冲击电流最大值 (kA)			

(2) 误同期并网实验

在前面准同期并网实验的基础上, 进行不合并网条件的误同期并网实验, 研究并网冲击电流和系统动态受合闸前状态影响的规律。

频率差为主并网实验。调整同步机 $U_0, \theta_0, \omega_{set}$, 使同步机并网时分别满足频率差为0.2Hz, 0.5Hz, 1Hz (电压差0.01kV, 相角差均小于 0.1°)。记录实际合闸时的频率差 (不要偏离太远), 以及并网后冲击电流最大值 (根据同步机端口电流数据测量), 将相应结果填入下表5, 并简要分析。

表5 频率差误同期并网实验记录

结果记录	1	2	3
要求频率差 (Hz)	0.2	0.5	1
实际频率差 (Hz)			
并网后冲击电流最大值 (kA)			

电压差为主并网实验。调整同步机 $U_0, \theta_0, \omega_{set}$, 使同步机并网时分别满足电压差为0.4kV, 0.8kV, 1.2kV (频率差0.01Hz, 相角差均小于 0.1°)。记录实际合闸时的电压差 (不要偏离太远), 参照实验原理计算冲击电流最大值理论值 (冲击系数取 $K_{hm} = 1.9$), 并记录并网后冲击电流最大值 (根据同步机端口电流数据测量), 将相应结果填入下表6, 并简要分析。

表6 电压差误同期并网实验记录

结果记录	1	2	3
要求电压差 (kV)	0.4	0.8	1.2
实际电压差 (kV)			
冲击电流最大值理论值 (kA)			
并网后冲击电流最大值 (kA)			

相角差为主并网实验。调整同步机 $U_0, \theta_0, \omega_{set}$, 使同步机并网时分别满足相角差为 $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ (频率差0.01Hz, 电压差0.01kV)。记录实际合闸时的相角差 (不要偏离太远), 参照实验原理计算冲击电流最大值理论值 (冲击系数取 $K_{hm} = 1.9$), 并记录并网后冲击电流最大值 (根据同步机端口电流数据测量), 将相应结果填入下表7, 并简要分析。

表7 相角差误同期并网实验记录

结果记录	1	2	3
要求相角差 (°)	5	10	20
实际相角差 (°)			
冲击电流最大值理论值 (kA)			
并网后冲击电流最大值 (kA)			