

大作业原理指导书

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

参考资料：

[1] 黄家裕. 电力系统数字仿真[M]. 水利电力出版社, 1995.

[3] 夏道止. 电力系统分析（第2版）[M]. 中国电力出版社, 2011.

[3] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

1. 同步机建模

(1) 同步机模型

考虑发电机七个绕组：定子的 d 、 q 、 0 绕组，转子 d 轴的 F 绕组（励磁绕组）和 D 绕组（阻尼绕组），转子 q 轴的 H 绕组（垂直于励磁绕组）和 Q 绕组（阻尼绕组）。同步发电机的基本方程为

$$\mathbf{u} = p\boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\psi} + \mathbf{r}\mathbf{i} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{x}\mathbf{i} \quad (2)$$

式(1)是七个电压方程(微分方程)，式(2)是七个磁链方程(代数方程)。其中 p 是微分算子，电压矢量 $\mathbf{u} = [u_d \ u_q \ u_0 \ u_F \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ，磁链矢量 $\boldsymbol{\psi} = [\psi_d \ \psi_q \ \psi_0 \ \psi_F \ \psi_D \ \psi_H \ \psi_Q]^T$ ，电流矢量 $\mathbf{i} = [i_d \ i_q \ i_0 \ i_F \ i_D \ i_H \ i_Q]^T$ ，电阻矩阵 \mathbf{r} 、电抗矩阵 \mathbf{x} 和矩阵 $\boldsymbol{\omega}$ 分别为：

$$\mathbf{r} = \text{diag} [-r \ -r \ -r \ r_F \ r_D \ r_H \ r_Q] \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & -x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aq} & x_{aq} \\ 0 & 0 & -x_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{ad} & 0 & 0 & x_F & x_{FD} & 0 & 0 \\ -x_{ad} & 0 & 0 & x_{FD} & x_D & 0 & 0 \\ 0 & -x_{aq} & 0 & 0 & 0 & x_H & x_{aq} \\ 0 & -x_{aq} & 0 & 0 & 0 & x_{aq} & x_Q \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline & & \mathbf{O}_{5 \times 7} & & & & \end{bmatrix} \quad (5)$$

为了计算过程尽量简洁，可将磁链方程代入电压方程，消去磁链变量，得到电压方程：

$$\mathbf{u} = \mathbf{x}pi + (\boldsymbol{\omega}\mathbf{x} + \mathbf{r})\mathbf{i} \triangleq \mathbf{x}pi + \mathbf{y}\mathbf{i} \quad (6)$$

其中, 定义 $\mathbf{y} = \boldsymbol{\omega}\mathbf{x} + \mathbf{r}$ 。

采用梯形积分方法进行差分建模, 对上式 (6) 微分方程进行差分, 有:

$$\frac{\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t - \Delta t)}{2} = \mathbf{x} \frac{\mathbf{i}(t) - \mathbf{i}(t - \Delta t)}{\Delta t} + \mathbf{y} \frac{\mathbf{i}(t) + \mathbf{i}(t - \Delta t)}{2} \quad (7)$$

整理后, 有

$$\mathbf{C}\mathbf{i}(t) = d\mathbf{u}(t) + d\mathbf{u}(t - \Delta t) + \mathbf{E}\mathbf{i}(t - \Delta t) \quad (8)$$

其中 $\mathbf{C} = \mathbf{x} + \frac{\Delta t}{2}\mathbf{y}$, $d = \frac{\Delta t}{2}$, $\mathbf{E} = \mathbf{x} - \frac{\Delta t}{2}\mathbf{y}$ 。 (这里 Δt 均为标么值)

为了将同步机差分方程中与网络接口的变量单独表示出来, 将式(8)中的向量 \mathbf{u} 拆成 $\mathbf{u}_{dq0} = [u_d \ u_q \ u_0]^T$ 和 u_F 两部分 (略去剩余零元), 此处不考虑励磁调节作用, 假设励磁绕组电压 u_F 保持恒定。则式(8)变为:

$$\mathbf{C}\mathbf{i}(t) = \mathbf{D}_1\mathbf{u}_{dq0}(t) + \mathbf{D}_1\mathbf{u}_{dq0}(t - \Delta t) + \mathbf{D}_2 \cdot u_F + \mathbf{E}\mathbf{i}(t - \Delta t) \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$\mathbf{D}_2 = [0 \ 0 \ 0 \ \Delta t \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

进一步整理可得到:

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{A}_G\mathbf{u}_{dq0}(t) + \mathbf{B}_G \begin{bmatrix} \mathbf{i}(t - \Delta t) & \mathbf{u}_{dq0}(t - \Delta t) & u_F \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

其中

$$\mathbf{A}_G = [\mathbf{C}^{-1}\mathbf{D}_1]_{7 \times 3}$$

$$\mathbf{B}_G = [\mathbf{C}^{-1}\mathbf{E} \quad \mathbf{C}^{-1}\mathbf{D}_1 \quad \mathbf{C}^{-1}\mathbf{D}_2]_{7 \times 11} \quad (12)$$

(2) 转子运动方程模型

同步机的转子运动方程如下 (忽略阻尼) :

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \quad (13)$$

其中, T_j 为同步机惯性时间常数, ω, δ, T_m, T_e 分别为同步机转速、功角、机械转矩和电磁转矩。

直接采用梯形法进行差分, 可得

$$\omega(t) = \omega(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2T_j}(T_m(t) + T_m(t - \Delta t) - T_e(t) - T_e(t - \Delta t)) \quad (14)$$

$$\delta(t) = \delta(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2}(\omega(t) + \omega(t - \Delta t)) - \Delta t \quad (15)$$

其中 Δt 均为标么值。

2. 机-网接口与程序框架设计

(1) 机-网接口等效模型

式(11)是同步机在 $dq0$ 坐标系下的差分方程, 而外部网络部分均是在 abc 坐标系下, 所以需要利用坐标变换将其转到 abc 坐标系下, 以设计机-网接口。

可定义 $abc \leftrightarrow dq0$ 的变换矩阵 (即 *Park* 变换及其反变换) 为

$$\mathbf{T}_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

其中, θ 为发电机转子 d 轴领先于定子 a 轴的角度, 且有 $\theta = \theta_0 + \omega t$, θ_0 为初始角度。同时满足

$$\mathbf{u}_{dq0} = \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{u}_{abc}, \mathbf{i}_{dq0} = \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{i}_{abc}, \mathbf{u}_{abc} = \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{u}_{dq0}, \mathbf{i}_{abc} = \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{i}_{dq0},$$

注意到: 同步电机与外部网络的接口部分只涉及定子端口三相电压、电流 (对应电机定子 $d, q, 0$ 绕组量), 不涉及其他绕组电流, 所以可以只将式(11)局部变换到 abc 坐标系下, 可得

$$\mathbf{i}'(t) = \mathbf{T}_{ex} \mathbf{A}_G \mathbf{T}_1 \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{T}_{ex} \mathbf{B}_G \mathbf{T}_{ex2} [\mathbf{i}'(t - \Delta t) \quad \mathbf{u}_{abc}(t - \Delta t) \quad u_F]^T \quad (17)$$

其中 $\mathbf{i}'(t) = [i_a(t) \quad i_b(t) \quad i_c(t) \quad i_F(t) \quad i_D(t) \quad i_H(t) \quad i_Q(t)]^T$,

$$\mathbf{T}_{ex} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{7 \times 7}, \mathbf{T}_{ex2} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{T}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{1 \times 1} \end{bmatrix}_{11 \times 11} \quad (18)$$

需要强调的是, θ 受同步机转子运动方程影响, 而同步机转子运动方程一般不与电气方程联立求解。在求解同步机电气部分差分方程时, $\theta(t)$ 还没有求解出来, 因此通常根据上一仿真时刻的 $\theta(t - \Delta t)$, $\omega(t - \Delta t)$ 进行预估, 此处预估值为

$$\hat{\theta}(t) = \theta(t - \Delta t) + \omega(t - \Delta t) * \Delta t \quad (19)$$

式 (17) 中, T_{ex2} 变换的对象是 $[\mathbf{i}'(t - \Delta t) \quad \mathbf{u}_{abc}(t - \Delta t) \quad u_F]^T$, 所以可直接采用上一时刻值 $\theta(t - \Delta t)$; 而 T_1 和 T_{ex} 变换的对象都是当前时刻的电压和电流, 所以采用当前仿真时刻的预估值 $\hat{\theta}(t)$ 。

将式(17)中同时含有 $\mathbf{u}_{abc}(t)$ 和 $\mathbf{i}_{abc}(t)$ 的方程独立出来, 以便和 abc 坐标下的网络方程联立求解。式(17)可以拆成

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{abc}(t) &= \mathbf{A}_{Gabc} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{B}_{Gabc} [\mathbf{i}'(t - \Delta t) \quad \mathbf{u}_{abc}(t - \Delta t) \quad u_F]^T \\ &\triangleq \mathbf{A}_{Gabc} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{i}_{hGabc} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{rest}(t) &= \mathbf{A}_{Grest} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{B}_{Grest} [\mathbf{i}'(t - \Delta t) \quad \mathbf{u}_{abc}(t - \Delta t) \quad u_F]^T \\ &\triangleq \mathbf{A}_{Grest} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{i}_{hGrest} \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A}'_G &= T_{ex} \mathbf{A}_G T_1 & \mathbf{B}'_G &= T_{ex} \mathbf{B}_G T_{ex2} \\ \mathbf{A}_{Gabc} &= \mathbf{A}'_G(1:3, :) & \mathbf{B}_{Gabc} &= \mathbf{B}'_G(1:3, :) \\ \mathbf{A}_{Grest} &= \mathbf{A}'_G(4:7, :) & \mathbf{B}_{Grest} &= \mathbf{B}'_G(4:7, :) \end{aligned} \quad (22)$$

观察式(20), $[\mathbf{A}_{Gabc}]_{3 \times 3}$ 可以视为同步机模型从定子端口看进去的等效导纳矩阵, $[\mathbf{i}_{hGabc}]_{3 \times 1}$ 可以视为历史电流项, 也具有和网络等效方程相同的形式, 因此可以联立求解。式 (20) 即为机-网接口等效模型, 具体处理过程为: 1) 基于上一仿真步相应量求取 \mathbf{A}_{Gabc} , \mathbf{i}_{hGabc} , 并结合定子端口编号相应修改网络导纳矩阵及网络节点注入电流 (**注意: 这里 \mathbf{A}_{Gabc} 需取负再叠加到网络导纳矩阵中, 而 \mathbf{i}_{hGabc} 为流入端口节点方向**); 2) 网络部分求解节点电压方程, 得到当前步电机端口电压 $\mathbf{u}_{abc}(t)$; 3) 再根据式 (20) - (21) 计算更新当前步 $\mathbf{i}_{abc}(t)$, $\mathbf{i}_{rest}(t)$, 至此同步机模型 (电气部分) 在一个仿真循环内的计算完成, 可进入下一仿真步计算。

注意: 机网接口的等效导纳矩阵和历史电流源项每次主循环都需重新计算, 那么每次修改 \mathbf{Y}_n 都要先另存修改前的 \mathbf{Y}_n , 待网络求解节点电压方程得到当前步节点电压向量后, 还需将 \mathbf{Y}_n 恢复为修改前另存的数值, 用于下一次循环机网接口重新修改, 避免每次循环重复堆叠修改 \mathbf{Y}_n 。

(2) 同步机初始化

第一种情况: 空载初始化。 设定各量初值如下 (其中, U_0, θ_0, ω_0 为给定参数, T_2 为帕克变换逆矩阵):

$$\begin{aligned}
& u_{d|0|} = 0, u_{q|0|} = U_0, u_{0|0|} = 0, \theta_{|0|} = \theta_0 \\
& \mathbf{u}_{abc|0|} = \mathbf{T}_2(\theta_{|0|}) \begin{bmatrix} u_{d|0|} \\ u_{q|0|} \\ u_{0|0|} \end{bmatrix}, i_{F|0|} = \frac{U_0}{x_{ad}}, u_F = r_F * i_{F|0|} \\
& \mathbf{i}'_{|0|} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad i_{F|0|} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \\
& T_{e|0|} = 0, T_{m|0|} = 0, \omega_{|0|} = \omega_0, \delta_{|0|} = \theta_{|0|} + \frac{\pi}{2}
\end{aligned} \tag{23}$$

第二种情况：非空载初始化。 仿真从并网后的某个稳态时刻（已知同步机输出有功和无功）直接开始的初始化，此时需结合潮流分析计算 $xy0$ 坐标系下同步机端口电压、电流，潮流计算中假定机端节点为PQ节点指定输出功率，另外无穷大电源节点为平衡节点，即电压为 $\dot{V}_g = 1 \angle 0^\circ$ 。在计算得到 $xy0$ 坐标系下同步机端口电压、电流（记为 $\dot{U} = U_x + jU_y, \dot{I} = I_x + jI_y$ ）后，按如下进行初始化：

$$\begin{aligned}
& \delta_{|0|} = \tan^{-1} \frac{U_y + rI_y + x_q I_x}{U_x + rI_x - x_q I_y}, \theta_{|0|} = \delta_{|0|} - \frac{\pi}{2}, u_{0|0|} = 0, i_{0|0|} = 0 \\
& u_{d|0|} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \sin(\delta_{|0|} - \tan^{-1} \frac{U_y}{U_x}), u_{q|0|} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \cos(\delta_{|0|} - \tan^{-1} \frac{U_y}{U_x}) \\
& i_{d|0|} = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \sin(\delta_{|0|} - \tan^{-1} \frac{I_y}{I_x}), i_{q|0|} = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \cos(\delta_{|0|} - \tan^{-1} \frac{I_y}{I_x}) \\
& \mathbf{u}_{abc|0|} = \mathbf{T}_2(\theta_{|0|}) \begin{bmatrix} u_{d|0|} \\ u_{q|0|} \\ u_{0|0|} \end{bmatrix}, \mathbf{i}_{abc|0|} = \mathbf{T}_2(\theta_{|0|}) \begin{bmatrix} i_{d|0|} \\ i_{q|0|} \\ i_{0|0|} \end{bmatrix} \\
& E_{q|0|} = u_{q|0|} + x_d i_{d|0|} + r i_{q|0|}, i_{F|0|} = \frac{E_{q|0|}}{x_{ad}}, u_F = r_F * i_{F|0|} \\
& \mathbf{i}'_{|0|} = [\mathbf{i}_{abc|0|}^T \quad i_{F|0|} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \\
& T_{e|0|} = (x_q - x_d) i_{d|0|} i_{q|0|} + x_{ad} i_{q|0|} i_{F|0|}, T_{m|0|} = T_{e|0|}, \omega_{|0|} = \omega_0
\end{aligned} \tag{24}$$

(3) 程序框架设计

程序总体框架如下图所示：

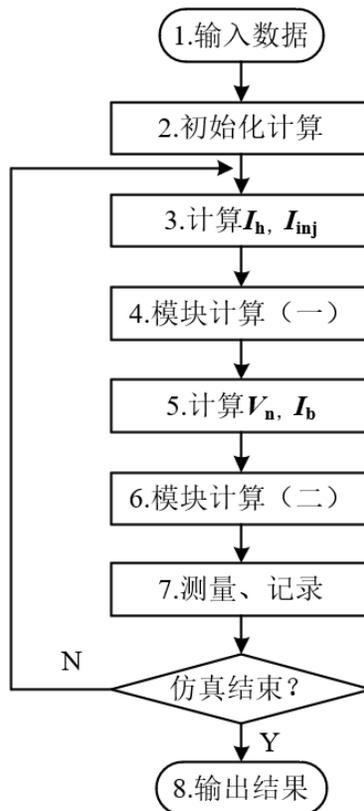


图1 程序总体框架

具体流程如下：

1) 输入数据 (data.m) ，输入系统各模块参数，包括仿真参数预设；为配合同步机标么值模型，整个程序框架改为标么体系，需对有名值参数进行标么化，包括网络元件、电源、断路器等模块参数 (**注意**：因为变压器的存在，需设置两个电压基准，系统里不同部分根据电压等级不同分开标么化) ；

```

% 标么基准值
Un1=13.8e3;Un2=230e3;Sn=100e6;fn=50;
Zn1=Un1^2/Sn;Zn2=Un2^2/Sn;wn=2*pi*fn;

gBranch.mbranch=[
4      7      1      1e3
5      8      1      1e3
6      9      1      1e3];
gBranch.mbranch(1:3,4)=gBranch.mbranch(1:3,4)/Zn1;
  
```

2) 初始化计算 (loadcase.m, ybus.m, init_XXX.m) ，载入系统参数，计算初始网络导纳矩阵 (不含同步机) ，指定相应参量初值。对于 $Tline$, TRF , SG 模块，还需单独进行初始化，修正网络节点数，计算相应等效导纳参数 (矩阵) 等，**注意用标么化后的步长**。同步机初始化部分 (init_SG.m) ，根据实验设置，按式 (23) 或式 (24) 初始化。

3) 进入主循环 (empt_main.m) ，计算 I_h , I_{inj} ；

4) 模块计算 (一) (update_XXX1.m) ，需针对 $Tline$, TRF , SG 模块进行各自计算。这里仅说明同步机模块 (update_SG1.m) ，考虑到同步机转速 ω 不恒定，需更新计算 A_G , B_G ，并结合上述式 (20) - (22) 机-网接口模型，计算 A_{Gabc} , i_{hGabc} , A_{Grest} , i_{hGrest} ，再基于 A_{Gabc} , i_{hGabc} 修改

网络节点导纳矩阵及网络节点注入电流 I_{inj} ;

5) 返回主循环 (empt_main.m) , 求解节点电压方程得到整个系统节点电压 V_n , 进而计算网络支路电流 I_b ;

6) 模块计算 (二) (update_XXX2.m) , 需针对 $Tline, TRF, SG$ 模块进行各自计算, 也包括根据故障 (update_fault.m) 、断路器 (update_BRK.m) 动作修改网络导纳矩阵。这里仅说明同步机模块 (update_SG2.m) , 基于网络求解得到的 V_n , 获取同步机端口节点电压 $u_{abc}(t)$, 再按式 (20) - (21) 计算更新当前步 $i_{abc}(t)$, $i_{rest}(t)$, 合并后更新同步机电流 $i'(t)$ 。

再更新同步机的转子动态。先更新电磁转矩 T_e 如下:

$$\begin{aligned} T_{ex3} &= \begin{bmatrix} T_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{7 \times 7}, i = T_{ex3} i'(t), i_d = i(1), i_q = i(2) \\ \psi_{dq} &= x(1:2, :) \cdot i, T_e = [i_q \quad -i_d] \cdot \psi_{dq} \end{aligned} \quad (25)$$

其中 T_{ex3} 仍采用预估值 $\hat{\theta}(t)$ 。程序中根据实验要求, 机械转矩 $T_m = T_{m|0|}$ 不变或由附加调速控制输出决定, 进而可按上式 (14) - (15) 计算更新同步机转速 ω 、功角 δ 。**若锁定同步机转速, 则忽略式**

(14) 更新结果, 始终有 $\omega(t) = \omega(t - \Delta t)$ 。另外, 还需根据当前转速更新 θ 如下:

$$\theta(t) = \theta(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} (\omega(t) + \omega(t - \Delta t)) \quad (26)$$

7) 进行相应的测量 (update_mea.m) 、数据保存记录;

8) 若仿真结束, 输出结果; 否则, 回到第3) 步, 进入下一循环, 循环往复, 直到仿真结束。

3. 实验原理

(1) 同步电机空载、短路特性实验

发电机空载特性和短路特性代表了同步电机两种典型运行状态下的磁路工作状态。

空载特性是指发电机在额定转速下, 负载电流为零时, 发电机定子端口电压和转子励磁电流的变化关系。发电机不接负载时, 电枢电流为零, 即为空载运行, 此时电机定子的三相绕组只有励磁电流 I_f 感生出的空载电动势 E_0 (三相对称) , 其大小随 I_f 的增加而增大。当励磁电流不大时, 两者基本为线性关系, 而当 I_f 增大到一定程度, 由于电机磁路铁心有饱和现象, 此时两者不再成正比。反映空载电动势 E_0 与励磁电流 I_f 关系的曲线 $E_0 = f(I_f)$, 即称为同步发电机的空载特性曲线。**(实验中不考虑同步机的饱和特性, 此时空载曲线近似为一条直线)**

同步发电机发生三相稳态短路时, 限制短路电流的仅是发电机内部的阻抗。由于同步发电机的电枢电阻远小于同步电抗, 因此短路电流可认为是纯感性的, 于是电枢磁势基本上是一个纯去磁的直轴磁势, 即 $F_a = F_{ad}$ 。各磁势矢量都在一条直线上, 合成磁势是 $F'_\delta = F_f - F'_{ad}$, 然后利用空载特性即可求出气隙合成电势 E_δ 。而短路时 $U = 0$, 所以 $E_\delta = U + IR_a + jIX_\sigma \approx jIX_\sigma$ 。可见, 短路时合成电势只等于漏抗压降, 其对应的气隙合成磁通很小, 电机的磁路处于不饱和状态。因此合成磁势 $F_f = F'_\delta \propto E_\delta \propto I$, 且由于 $F'_{ad} = K_{ad}F_{ad}$ 也总是与 I 成正比, 所以励磁磁势 $F_f = F'_\delta + F'_{ad}$ 也必

然与 I 成正比，故短路特性是一条直线。反映短路电流 I 与励磁电流 I_f 关系的曲线 $I = f(I_f)$ ，即称为同步发电机的短路特性曲线。下图2所示即为典型同步电机空载、短路特性曲线。

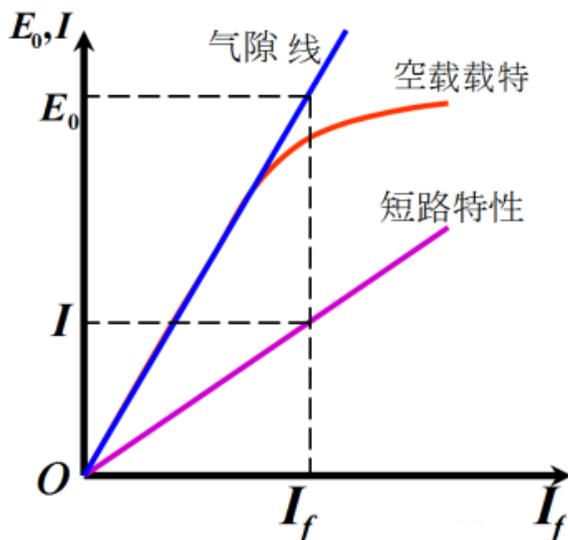


图2 同步电机空载、短路特性曲线

可基于上述同步电机空载、短路特性测定同步机直轴同步电抗 x_d ，即空载、短路测定法。当忽略定子电阻（对具有一般参数及额定正常转数的电机，这是允许的），可由空载电势 E_0 与稳定三相短路电流 I 计算 x_d 为（同一励磁电流 I_f 下）：

$$x_d = \frac{E_0}{I} \quad (27)$$

由于空载特性曲线是一条不饱和曲线，在计算同步电抗时，必须按切于空载特性曲线起始部分的直线化的空载特性来计算。

(2) 单机无穷大系统暂态稳定实验

电力系统暂态稳定，即指电力系统遭受输电线路短路故障等大干扰时保持同步运行的能力，它由系统的初始运行状态和受扰动的严重程度共同决定。将本次实验中单机无穷大系统电路简化为下图3形式，以开展相应暂态稳定分析计算。

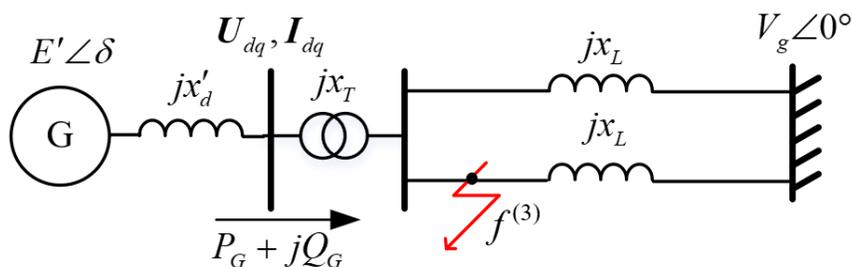


图3 单机无穷大系统等值电路

图3中，同步机用暂态电势 $\dot{E}' = E' \angle \delta$ 和直轴暂态电抗 x'_d 来等效，经变压器、双回输电线与无穷大电源相连，忽略电机定子电阻、线路电阻、电容等，给定变压器等值电抗为 x_T ，双回输电线等值电抗均为 x_L 。初始时刻，系统稳态运行，无穷大电源始终为 $V_g \angle 0^\circ$ ，同步机输出功率为 P_G, Q_G ，端口电压、电流的 dq 轴分量为 U_{dq}, I_{dq} 。现假设某时刻，下回输电线首端发生三相接地短路故障，经一

定时间后将下回输电线切除以排除故障，系统恢复运行。那么，整个过程可分为故障前（第I阶段）、故障期间（第II阶段）以及故障后（第III阶段）这三个阶段。可给出三阶段的同步机功角特性示意图如下图 4 所示。

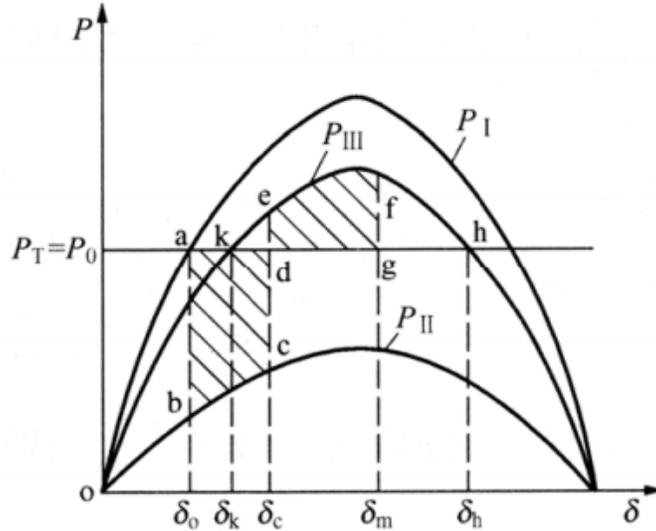


图4 三阶段同步机功角特性示意图

图中 P_T 、 P_I 、 P_{II} 、 P_{III} 分别为系统机械功率（等同于稳态时同步机输出有功 P_G ）和三个阶段中电机的输出电磁功率曲线， δ_0 是故障前功角。这里假设暂态过程中 E' 保持恒定，基于同步机参数、机端电压电流 dq 坐标系下分量可计算

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_F}, x'_q = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_H} \quad (28)$$

$$E'_d = U_d + rI_d - x'_q I_q, E'_q = U_q + rI_q + x'_d I_d, E' = \sqrt{E_d'^2 + E_q'^2}$$

进而可将上述三阶段的功率曲线描述为（其中 $V_g = 1$ ）

$$x_I = x'_d + x_T + 0.5x_L, P_I = \frac{E'V_g}{x_I} \sin\delta \triangleq P_I^{\max} \sin\delta, P_T = P_I^{\max} \sin\delta_0 \quad (29)$$

$$x_{II} = x'_d + x_T, P_{II} = 0, P_{II}^{\max} = 0 \quad (30)$$

$$x_{III} = x'_d + x_T + x_L, P_{III} = \frac{E'V_g}{x_{III}} \sin\delta \triangleq P_{III}^{\max} \sin\delta, P_T = P_{III}^{\max} \sin\delta_h \quad (31)$$

故障发生后，电机输出电磁功率由 a 点减小到 b 点，造成机械功率过剩，电机功角将逐渐增大（加速度为正）；若 δ_c 时切除故障，电机输出电磁功率由 c 点增大到 e 点，功角仍增加（但加速度为负），若到 δ_h 处功角仍在增加，则系统将失稳。一般而言，越早切除故障，越有利于系统恢复稳定。此时，存在一个极限切除角 δ_{cm} ，若晚于它切除故障将导致系统失稳。考虑采用等面积法来求取极限切除角 δ_{cm} ，当取 $\delta_c = \delta_{cm}$ ，此时满足刚好在 δ_h 处转速不再增加，且有加速面积等于减速面积，也即

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cm}} (P_T - P_{II})d\delta = \int_{\delta_{cm}}^{\delta_h} (P_{III} - P_T)d\delta \quad (32)$$

进而可求得

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \sin^{-1} \frac{P_T}{P_I^{\max}}, \delta_h = \pi - \sin^{-1} \frac{P_T}{P_{III}^{\max}} \\ \delta_{cm} &= \cos^{-1} \frac{P_T(\delta_h - \delta_0) + P_{III}^{\max} \cos\delta_h - P_{II}^{\max} \cos\delta_0}{P_{III}^{\max} - P_{II}^{\max}} \end{aligned} \quad (33)$$

需要说明的是，这里的几个 δ 实际上是 \dot{E}' 与网侧电源相量 \dot{V}_g 的夹角，与前面转子运动方程中功角的定义不同，所以这里计算得到的 δ_0 与式 (24) 非空载初始化计算得到的 $\delta_{|0|}$ 不一致。

在求得极限切除角 δ_{cm} 的基础上，可进一步计算极限（故障）切除时间间隔 Δt_{cm} 。本次实验中，实际故障期间没有功率输出 ($P_{II} = 0$)，观察式 (13) 转子运动方程，可见转速 ω 的加速转矩恒定，那么功角的变化可近似为匀加速过程，从而可求解相应的极限（故障）切除时间间隔为

$$\frac{1}{2} a \Delta t_{cm}^2 = \delta_{cm} - \delta_0, \quad a = \frac{P_T}{T_j}, \quad \Delta t_{cm} = \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{cm} - \delta_0)}{P_T}} \quad (34)$$

注意，这里计算得到的值为标么的时间，需再转换为有名值的时间间隔。

(3) 发电机同期并网实验

同步发电机从空载状态过渡到并网发电状态，需要经历下面的几个主要阶段：(1)将发电机的空载转速调整到同步转速；(2)通过调节励磁，将机端空载电压调整到额定电压；(3)断路器合闸，使发电机并网运行。断路器合闸时，需使合闸瞬间的冲击电流尽可能小，过大的合闸冲击电流会产生大量热量使定子绕组过热，加速绝缘老化甚至烧毁设备，也会使设备感应较大的电动力，扭曲定子绕组。此外，合闸冲击电流过大还会影响轴系的受力和引起系统稳定问题。因此，要尽可能控制合闸电流。

理论上，要想控制合闸瞬间冲击电流为零，需满足以下三个理想并网条件：

- 1) $\omega_G = \omega_g$ 或 $f_G = f_g$ ，即频率相等；
- 2) $U_G = U_g$ ，即电压幅值（有效值）相等；
- 3) $\delta_e = 0$ ，即相角差为零；

其中， ω_G, f_G, U_G 为电机端口对应的角频率、频率及端电压， ω_g, f_g, U_g 为网侧对应的角频率、频率及端电压， δ_e 为机端、网侧电压相角差。在实际应用中，完全达到上述条件是非常困难的，但是在满足角频率差 $\Delta\omega = |\omega_G - \omega_g|$ 足够小、电压差 $\Delta U = |U_G - U_g|$ 足够小以及合闸角 δ_e 接近为零的条件下进行合闸，所产生的较弱冲击电流也能满足系统运行的需要。

为了使待并网发电机组满足并网条件，需设计准同期并网控制模块，由下列三个单元组成。

- 1) 频率差调整单元。它的功能是检测 ω_G 与 ω_g 间的角频率差 $\Delta\omega$ ，且调节待并网发电机组的转速，使发电机电压的频率接近于系统频率；
- 2) 电压差调整单元。它的功能是检测 U_G 与 U_g 间的电压差 ΔU ，且调节发电机机端电压 U_G ，使它与 U_g 间的电压差值小于规定允许值，促使并网条件的形成；

3) 合闸信号控制单元。检查并网条件，当待并网机组与网侧的频率差 $\Delta\omega$ 、电压差 ΔU 以及相角差 δ_e 都在允许范围以内时，发出合闸信号，控制断路器合闸。

实验中，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）；而频率差调整单元则需实现同步机调速控制模块。下面给出调速控制模块的传递函数框图如下图5所示。

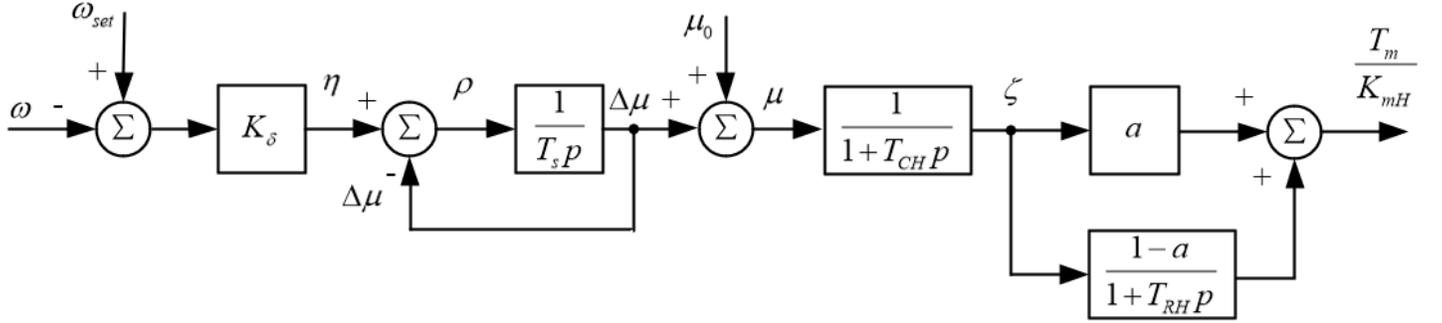


图5 发电机调速系统传递函数框图

结合图5，可整理该调速系统方程组如下：

$$\begin{aligned}
 (\omega_{set} - \omega)K_{\delta} &= \eta \\
 \eta - \Delta\mu &= \rho \\
 \frac{\rho}{T_s p} &= \Delta\mu \\
 \Delta\mu + \mu_0 &= \mu \\
 \frac{\mu}{1 + T_{CH} p} &= \zeta \\
 \zeta \left(a + \frac{1-a}{1 + T_{RH} p} \right) &= \frac{T_m}{K_{mH}}
 \end{aligned} \tag{35}$$

进而可推导上式对应的差分方程组如下：

$$\begin{aligned}
 \eta(t) &= K_{\delta} (\omega_{set} - \omega(t - \Delta t)) \\
 \rho(t) &= \eta(t) - \Delta\mu(t - \Delta t) \\
 T_s \Delta\mu(t) &= \frac{\Delta t}{2} (\rho(t) + \rho(t - \Delta t)) + T_s \Delta\mu(t - \Delta t) \\
 \mu(t) &= \Delta\mu(t) + \mu_0 \\
 (T_{CH} + \frac{\Delta t}{2}) \zeta(t) &= \frac{\Delta t}{2} (\mu(t) + \mu(t - \Delta t)) + (T_{CH} - \frac{\Delta t}{2}) \zeta(t - \Delta t) \\
 (T_{RH} + \frac{\Delta t}{2}) T_m(t) &= (T_{RH} - \frac{\Delta t}{2}) T_m(t - \Delta t) \\
 &\quad + K_{mH} \left[(a T_{RH} + \frac{\Delta t}{2}) \zeta(t) - (a T_{RH} - \frac{\Delta t}{2}) \zeta(t - \Delta t) \right]
 \end{aligned} \tag{36}$$

上述方程中, $K_\delta, T_s, T_{CH}, T_{RH}, a, K_{mH}$ 为固定系数参数, ω 为输入量, T_m 为输出量, 其他 $\eta, \rho, \Delta\mu, \mu, \zeta$ 均为中间状态量, 且各量初始值设定如下:

$$\eta_{|0|} = 0, \rho_{|0|} = 0, \Delta\mu_{|0|} = 0, \mu_{|0|} = \zeta_{|0|} = \frac{T_{m|0|}}{K_{mH}} \quad (37)$$

注意: 上式 (36) 中与有名值系数参数相对应, 所用 Δt 为仿真步长有名值。

另外, 当其他合闸条件较为理想, 仅存在幅值差或相角差合闸时, 可分别按下式 (38)、(39) 计算相应冲击电流最大瞬时值理论值, 其中各参数均为标么值, K_{hm} 为冲击系数 (可取 1.8~1.9), ΔU 为合闸前电压幅值差, δ_e 为合闸前相角差 (rad), $X_s = x_T + 0.5x_L$ 为网络电抗。

$$I_{hm} = K_{hm} \frac{\Delta U}{X_d'' + X_s}, \text{其中 } X_d'' = x_d - \frac{x_{ad}^2(x_D - 2x_{ad} + x_F)}{x_D x_F - x_{ad}^2} \quad (38)$$

$$I_{hm} = K_{hm} \frac{2U_0}{X_q'' + X_s} \sin\left(\frac{\delta_e}{2}\right), \text{其中 } X_q'' = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q} \quad (39)$$