

# 随堂练习：同步机-空载并网仿真

## 1. 实验要求

(1) 基于之前作业二程序框架 (exp2.zip) 进行修改, 参照实验原理, 自行编程增加同步机模型及机网接口程序 (新增 init\_SG.m、update\_SG1.m、update\_SG2.m)。

(2) 完成同步机空载并网仿真, 分别考虑四种情形: a) 存在不同大小的幅值差; b) 存在不同大小的相角差; c) 幅值差固定, 在一个周波内不同时刻合闸; d) 相角差固定, 在一个周波内不同时刻合闸。

## 2. 算例系统

实验系统如下图1所示:

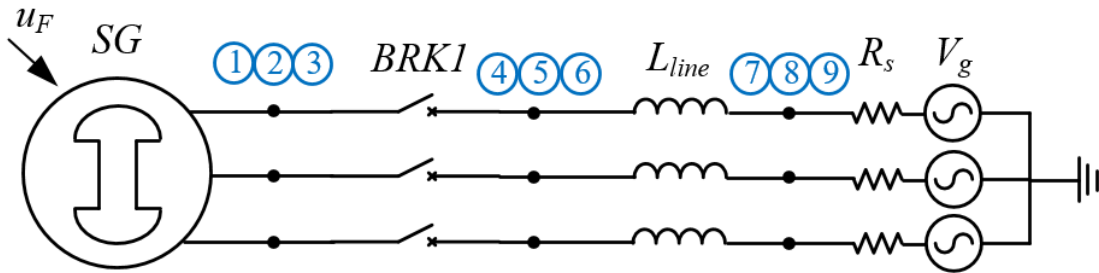


图1 系统拓扑

图1系统中, 同步发电机 (SG) 经线路 ( $L_{line}$ ) 与电网相连, 同步电机端口处设有断路器 (BRK1)。

相关参数给出如下:

(1) 电源参数: 线电压有效值  $V_g = 13.8kV$ , 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: 线路电感  $L_{line} = 1mH$ ;

(3) 断路器参数:  $R_{on} = 0.001\Omega$ ,  $R_{off} = 1e6\Omega$ , **初始断开**;

(4) 同步机参数: 额定容量  $S_n = 100MVA$ , 额定电压  $U_n = 13.8kV$ , 额定频率  $f_n = 50Hz$ , 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)

$x_d$	$x_{ad}$	$x_F$	$x_D$	$x_{FD}$	$r_F$	$r_D$	$x_0$
1.75581	1.56711	1.73883	1.63555	1.61805	0.00113	0.00929	1.75581
$x_q$	$x_{aq}$	$x_H$	$x_Q$	$r_H$	$r_Q$	$r$	
1.75581	1.56711	2.22911	1.64064	0.01862	0.01788	0.004	

给定同步机初值  $U_0 = 1$ ,  $\theta_0 = -\frac{\pi}{2}$ , 不考虑转子运动方程, 假设转速恒定为  $\omega = \omega_0 = 1$ 。励磁电压  $u_F$  由初始化计算, 在仿真中保持恒定。  $U_0, \theta_0$  可结合实验需求修改设置。

(5) 仿真设置：仿真时间2s，仿真步长500e-6s，默认**0.5s**时断路器（BRK1）合闸。

### 3. 实验原理

#### (1) 同步机差分化模型

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：

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

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

采用梯形积分方法进行差分化建模，对上式 (6) 微分方程进行差分化，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  $\Delta t$  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:

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

其中

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

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

## (2) 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

$$\mathbf{T}_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

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

其中,  $\theta$ 为发电机转子 $d$ 轴领先于定子 $a$ 轴的角度, 且有 $\theta = \theta_0 + \omega t$ ,  $\theta_0$ 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

$$\mathbf{i}'(t) = \mathbf{T}_{ex} \mathbf{A}_G \mathbf{T}_1 \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{T}_{ex} \mathbf{B}_G \mathbf{T}_{ex2} \left[ \mathbf{i}'(t - \Delta t) \quad \mathbf{u}_{abc}(t - \Delta t) \quad u_F \right]^T \quad (14)$$

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

$$\mathbf{T}_{ex} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix}_{7 \times 7}, \mathbf{T}_{ex2} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{T}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{1 \times 1} \end{bmatrix}_{11 \times 11} \quad (15)$$

**需要强调的是,**  $\theta$  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 $\theta(t - \Delta t)$ 进行预估, 此处预估值为

$$\hat{\theta}(t) = \theta(t - \Delta t) + \omega * \Delta t \quad (16)$$

式 (14) 中,  $\mathbf{T}_{ex2}$ 变换的对象是 $\left[ \mathbf{i}'(t - \Delta t) \quad \mathbf{u}_{abc}(t - \Delta t) \quad u_F \right]^T$ , 所以可直接采用上一时刻值 $\theta(t - \Delta t)$ ; 而 $\mathbf{T}_1$ 和 $\mathbf{T}_{ex}$ 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 $\hat{\theta}(t)$ 。

将式(14)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(14)可以拆成

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{abc}(t) &= \mathbf{A}_{Gabc} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{B}_{Gabc} \left[ \mathbf{i}'(t - \Delta t) \quad \mathbf{u}_{abc}(t - \Delta t) \quad u_F \right]^T \\ &\triangleq \mathbf{A}_{Gabc} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{i}_{hGabc} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{rest}(t) &= \mathbf{A}_{Grest} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{B}_{Grest} \left[ \mathbf{i}'(t - \Delta t) \quad \mathbf{u}_{abc}(t - \Delta t) \quad u_F \right]^T \\ &\triangleq \mathbf{A}_{Grest} \mathbf{u}_{abc}(t) + \mathbf{i}_{hGrest} \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A}'_G &= \mathbf{T}_{ex} \mathbf{A}_G \mathbf{T}_1 & \mathbf{B}'_G &= \mathbf{T}_{ex} \mathbf{B}_G \mathbf{T}_{ex2} \\ \mathbf{A}_{Gabc} &= \mathbf{A}'_G(1:3, :) & \mathbf{B}_{Gabc} &= \mathbf{B}'_G(1:3, :) \\ \mathbf{A}_{Grest} &= \mathbf{A}'_G(4:7, :) & \mathbf{B}_{Grest} &= \mathbf{B}'_G(4:7, :) \end{aligned} \quad (19)$$

观察式(17),  $[\mathbf{A}_{Gabc}]_{3 \times 3}$ 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 (17) 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 $A_{Gabc}, i_{hGabc}$ ，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 $A_{Gabc}$ 需取负再叠加到网络导纳矩阵中，而 $i_{hGabc}$ 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 $u_{abc}(t)$ ；3) 再根据式 (17) - (18) 计算更新当前步 $i_{abc}(t), i_{rest}(t)$ ，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。

### (3) 程序算法流程

包含同步机-机网接口的程序具体流程如下：

1) 输入数据 (data.m)，输入系统参数。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、断路器等模块的电压、阻抗参数；

```
% 标么基准值
Un=13.8e3;Sn=100e6;Zn=Un^2/Sn;
fn=50;wn=2*pi*fn;

% Grid branch data
% node1 | node2 | type(1-R,2-L,3-C) | value
gBranch.mbranch=[
4      7      2      1e-3
5      8      2      1e-3
6      9      2      1e-3];
gBranch.mbranch([1,2,3],4)=gBranch.mbranch([1,2,3],4)*wn/Zn;
...
```

2) 初始化计算 (loadcase.m, ybus.m, init\_SG.m)，载入系统参数，计算初始网络导纳矩阵（**不含同步机，注意用标么化后的步长**），指定相应参量初值。同步机初始化部分 (init\_SG.m) 需结合式 (12) 计算 $A_G, B_G$ ，用于主循环更新计算（若同步机转速 $\omega$ 不恒定，则还需重新计算 $A_G, B_G$ ），同时设定各量初值如下：

$$\begin{aligned}
 u_{d|0|} &= 0, u_{q|0|} = U_0, u_{0|0|} = 0, \theta_{|0|} = \theta_0 \\
 \mathbf{u}_{abc|0|} &= \mathbf{T}_2(\theta_{|0|}) \begin{bmatrix} u_{d|0|} \\ u_{q|0|} \\ u_{0|0|} \end{bmatrix}, i_{F|0|} = \frac{U_0}{x_{ad}}, u_F = r_F * i_{F|0|} \\
 \mathbf{i}'_{|0|} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad i_{F|0|} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T
 \end{aligned} \tag{20}$$

3) 进入主循环 (empt\_main.m)，计算网络部分 $I_h, I_{inj}$ ，相应地方改用标么化后的步长参与计算。

```
gSim.dtt=2*pi*50*gSim.dt; % time step p.u.
dtt=gSim.dtt;

Ih(id_L)=Ib(id_L)+dtt/2./L.*(Vn(n1(id_L))-Vn(n2(id_L)));
Ih(id_C)=-Ib(id_C)-2*C/dtt.*(Vn(n1(id_C))-Vn(n2(id_C)));
```

4) 同步机计算 (一) (update\_SG1.m) , 结合上述式 (17) - (19) 机-网接口模型, 计算  $\mathbf{A}_{Gabc}, \mathbf{i}_{hGabc}, \mathbf{A}_{Grest}, \mathbf{i}_{hGrest}$  , 其中还需基于  $\mathbf{A}_{Gabc}, \mathbf{i}_{hGabc}$  修改网络节点导纳矩阵及网络节点注入电流  $\mathbf{I}_{inj}$  ;

**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  $\mathbf{Y}_n$  。

5) 返回主循环 (empt\_main.m) , 计算  $\mathbf{V}_n, \mathbf{I}_b$  ;

6) 同步机计算 (二) (update\_SG2.m) , 需针对SG模块进行更新计算, 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  $\mathbf{V}_n$  , 获取同步机端口节点电压  $\mathbf{u}_{abc}(t)$  , 再按式 (17) - (18) 计算更新当前步  $\mathbf{i}_{abc}(t)$  ,  $\mathbf{i}_{rest}(t)$  , 合并后更新同步机电流  $\mathbf{i}'(t)$  。

另外, 还需根据转速更新  $\theta$  如下:

$$\theta(t) = \theta(t - \Delta t) + \omega * \Delta t \quad (21)$$

7) 进行相应数据保存、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。

## 4. 实验内容

开展同步机空载并网仿真。并网前两侧同步机端口 (节点1-3) 、节点4-6三相电压可表示为

$$\mathbf{U}_{Gabc} = \begin{bmatrix} -U_0 \sin(\omega_0 t + \theta_0) \\ -U_0 \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}) \\ -U_0 \sin(\omega_0 t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}, \mathbf{U}_{456} = \begin{bmatrix} U_s \cos(\omega_s t + \alpha_0) \\ U_s \cos(\omega_s t + \alpha_0 - \frac{2\pi}{3}) \\ U_s \cos(\omega_s t + \alpha_0 + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

系统初始默认  $U_0 = U_s = 1, \omega_0 = \omega_s = 1, \theta_0 = -\frac{\pi}{2}, \alpha_0 = 0$  , 此时已满足并网条件。同时默认断路器 (BRK1) 0.5s时合闸。按照新的电源定义, 需修改原EMTP框架中电源的表达形式如下 (计算  $I_s$  ) :

```
% add source terms
Is=gVSource.Vmax./gVSource.R.*cos(gVSource.omega*t+gVSource.Shift);
```

实验中需记录合闸并网后冲击电流三相最大瞬时值 (p.u.) 和并网后三相电流稳态幅值 (p.u.) , 同时可计算冲击电流最大瞬时值理论值 (p.u.) 。前两者可基于记录的三相电感支路电流数据统计得到, 如下:

```

disp('冲击电流最大瞬时值为 (p.u.) : ')
disp(max(max(abs(CC(:,1:3))))); % 冲击电流最大瞬时值
disp('并网后电流稳态幅值为 (p.u.) : ')
disp(sum(max(abs(CC(end-100:end,1:3))))/3); % 并网后电流稳态幅值

```

仅存在幅值差合闸时，冲击电流最大瞬时值理论值可计算为（各参数均为标么值， $X_s$  为电感电抗）：

$$I_{hm} = 1.8 \frac{U_0 - U_s}{X_d'' + X_s}, \text{其中 } X_d'' = x_d - \frac{x_{ad}^2(x_D - 2x_{ad} + x_F)}{x_D x_F - x_{ad}^2}$$

仅存在相角差合闸时，冲击电流最大瞬时值理论值可计算为（各参数均为标么值， $X_s$  为电感电抗）：

$$I_{hm} = 1.8 \frac{2U_0}{X_q'' + X_s} \sin\left(\frac{\theta_0 + \frac{\pi}{2}}{2}\right), \text{其中 } X_q'' = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q}$$

**按实验要求修改  $U_0, \theta_0$  以及断路器合闸时间，完成下列实验，并进行结果分析。**

(1) 按初始默认参数运行，进行理想合闸条件下并网，记录同步机端口A相电压和节点4电压波形（画在一张图对比），以及三相电感支路电流波形。

(2) 考虑存在不同大小的幅值差下并网。分别设置  $U_0 = 1.01, 1.03, 1.05$ ，计算冲击电流最大瞬时值理论值 (p.u.)，并记录冲击电流最大瞬时值 (p.u.) 和并网后电流稳态幅值 (p.u.)。

$U_0$ (p.u.)	1.01	1.03	1.05
冲击电流最大瞬时值理论值 (p.u.)			
冲击电流最大瞬时值 (p.u.)			
并网后电流稳态幅值 (p.u.)			

(3) 考虑存在不同大小的相角差下并网。分别设置  $\theta_0 = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{36}, -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{18}, -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{9}$ ，计算冲击电流最大瞬时值理论值 (p.u.)，并记录冲击电流最大瞬时值 (p.u.) 和并网后电流稳态幅值 (p.u.)。

$\theta_0$	$-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{36}$	$-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{18}$	$-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{9}$
冲击电流最大瞬时值理论值 (p.u.)			
冲击电流最大瞬时值 (p.u.)			
并网后电流稳态幅值 (p.u.)			

(4) 幅值差固定为  $U_0 = 1.03$ ，在一个周波内不同时刻合闸。分别设置断路器合闸时间为  $0.5 + T/8, 0.5 + T/4, 0.5 + 3T/8$ ，其中  $T = 0.02s$  为工频周期。计算冲击电流最大瞬时值理论值

(p.u.) , 并记录冲击电流最大瞬时值 (p.u.) 和并网后电流稳态幅值 (p.u.) 。

**当前条件下, 冲击电流最大瞬时值理论值 (p.u.) 计算为:**

断路器合闸时间	$0.5 + T/8$	$0.5 + T/4$	$0.5 + 3T/8$
冲击电流最大瞬时值 (p.u.)			
并网后电流稳态幅值 (p.u.)			

(5) 相角差固定为  $\theta_0 = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{18}$ , 在一个周波内不同时刻合闸。分别设置断路器合闸时间为  $0.5 + T/8, 0.5 + T/4, 0.5 + 3T/8$ , 其中  $T = 0.02s$  为工频周期。计算冲击电流最大瞬时值理论值 (p.u.) , 并记录冲击电流最大瞬时值 (p.u.) 和并网后电流稳态幅值 (p.u.) 。

**当前条件下, 冲击电流最大瞬时值理论值 (p.u.) 计算为:**

断路器合闸时间	$0.5 + T/8$	$0.5 + T/4$	$0.5 + 3T/8$
冲击电流最大瞬时值 (p.u.)			
并网后电流稳态幅值 (p.u.)			