

调速永磁同步电动机优化设计与矢量控制系统联合仿真

- 王杨 / 电机设计工程师

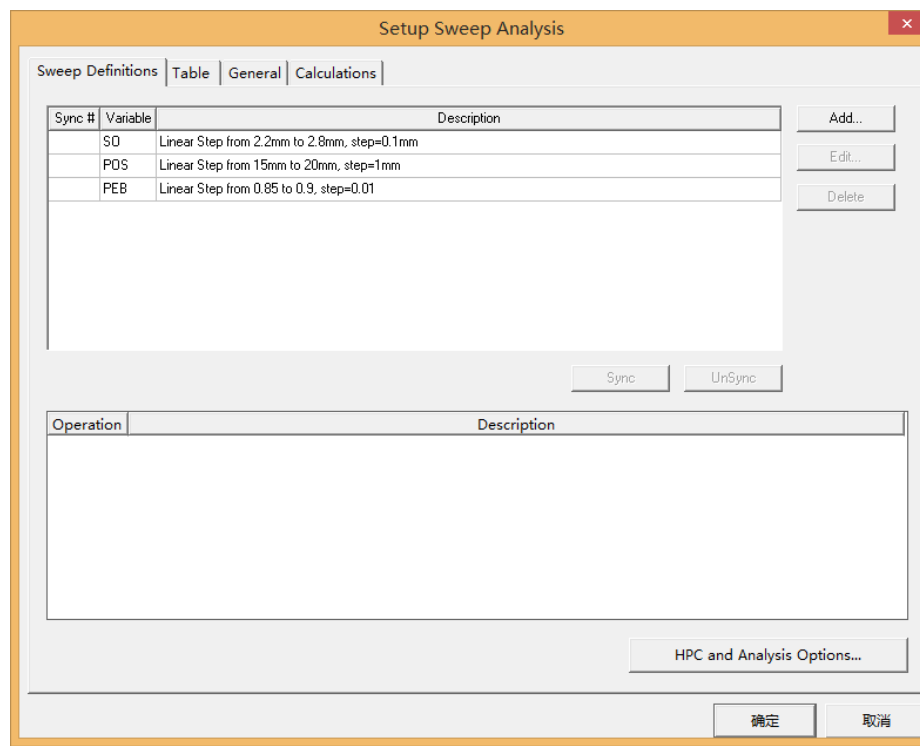


主要内容

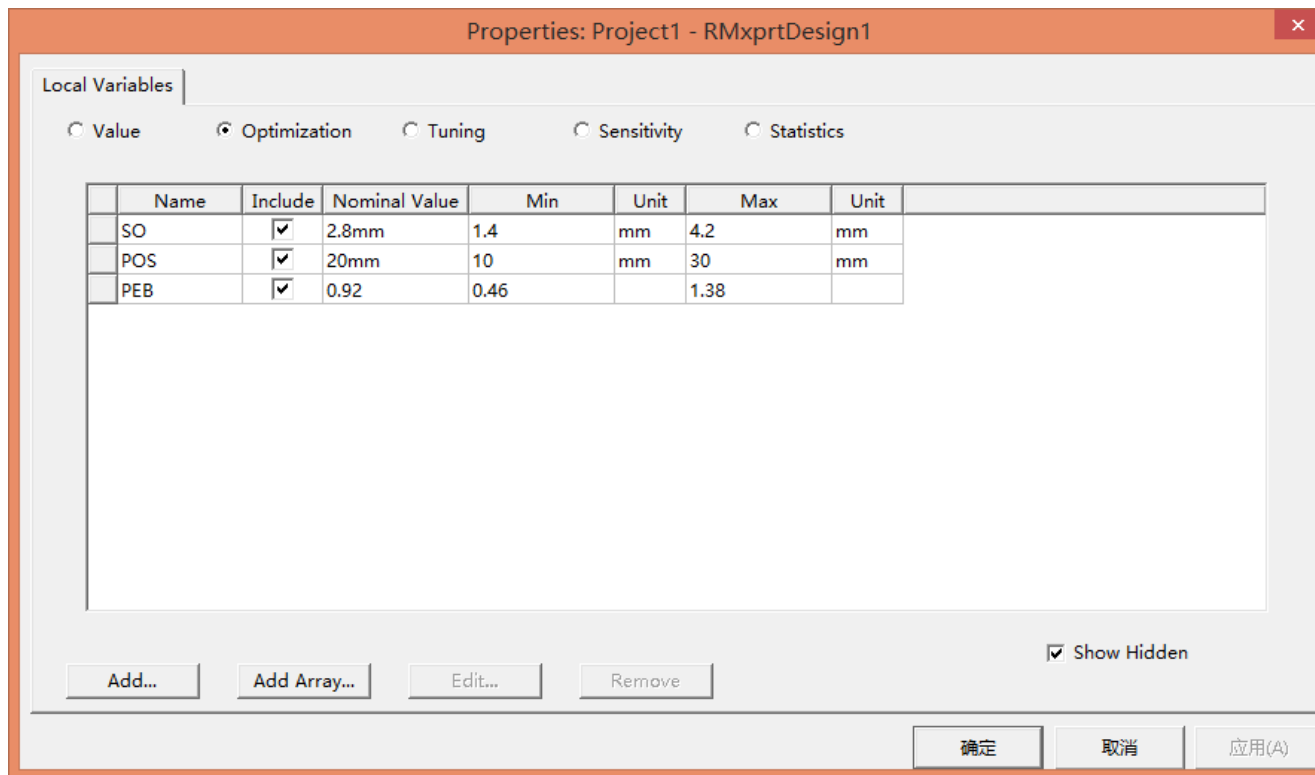
- 1. 基于Maxwell/Rmxprt的调速永磁同步电动机优化设计
- 2. 基于Maxwell 3D的调速永磁同步电动机直、交轴电感有限元计算
- 3. 基于Maxwell、Simplorer和Simulink的调速永磁同步电动机控制系统联合仿真
- 4. 全文总结

1. 基于Maxwell/Rmxprt的调速永磁同步电动机优化设计

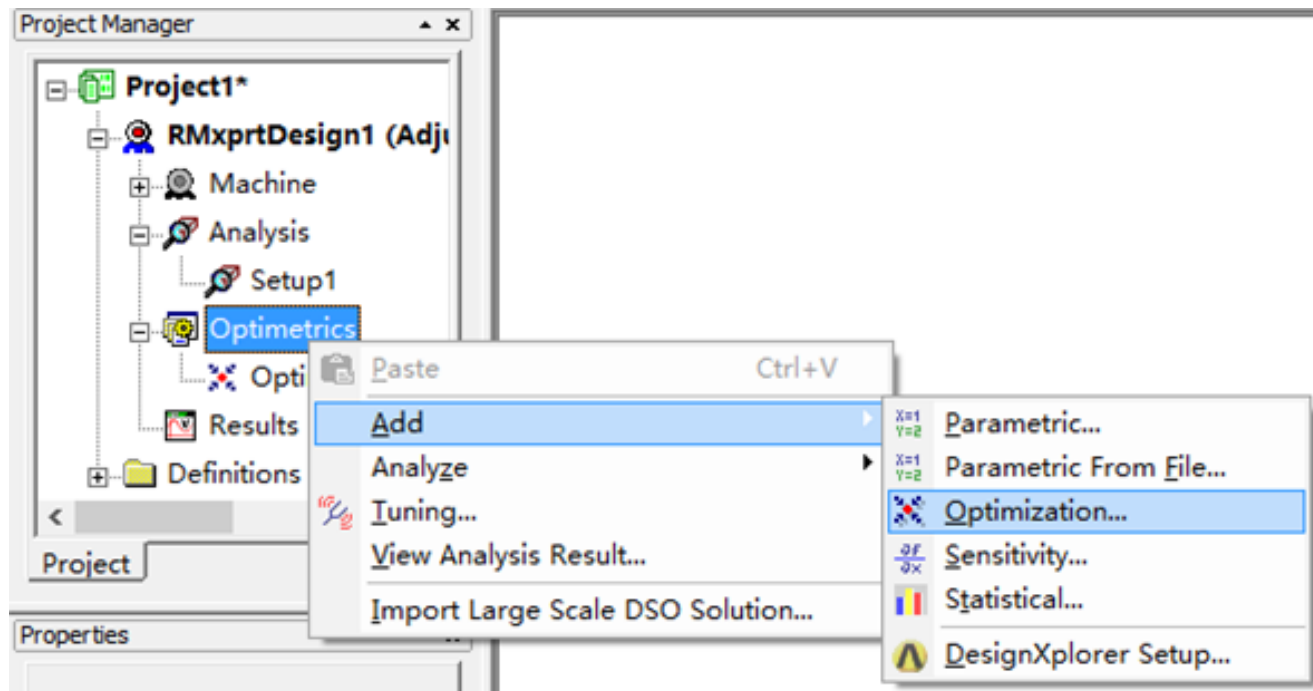
- 优化目的：得到永磁电机齿槽转矩最小时的设计方案。
- 选取变量：定子槽口宽 Bs0、永磁体极弧系数 Embrace、永磁体偏心距 Offset。
- 首先进行参数化扫描设置，分别定义三个变量的扫描范围。



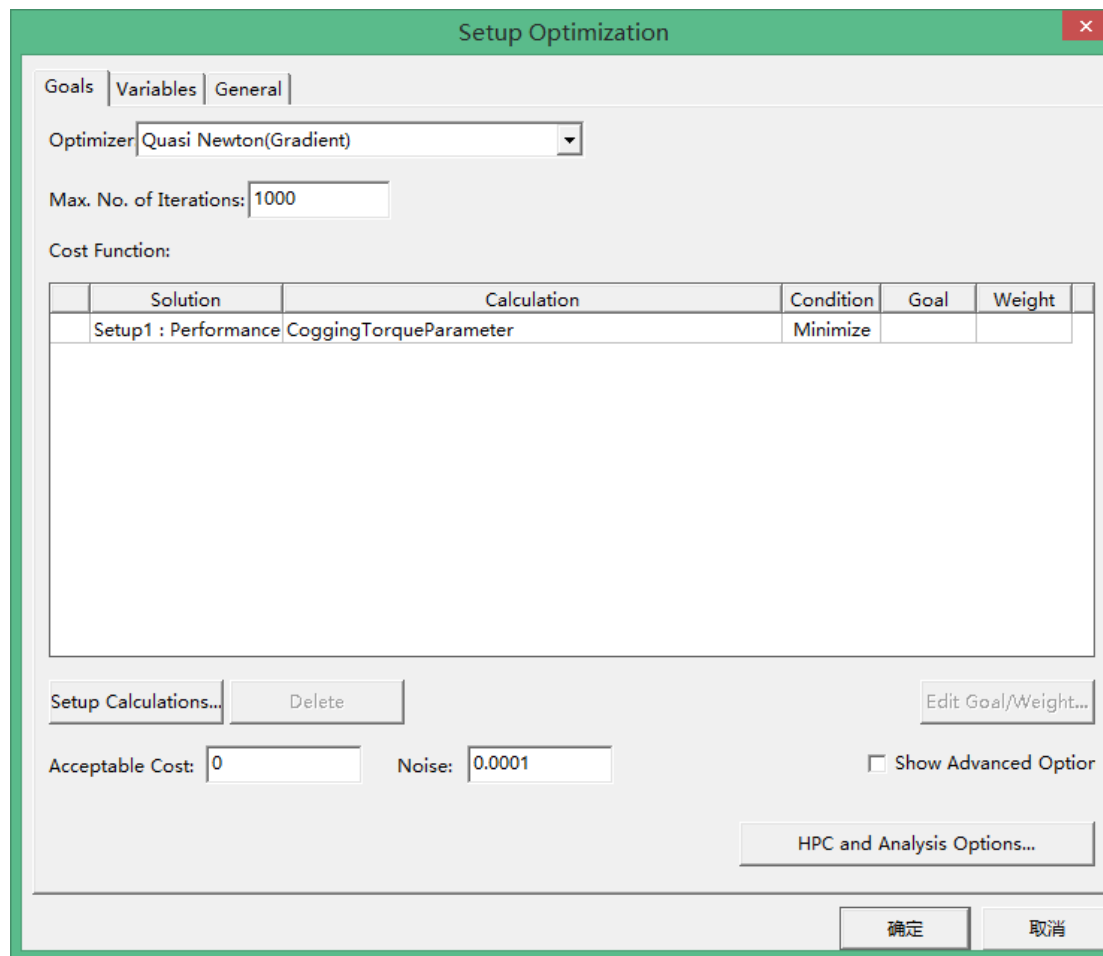
- 进入Design Properties，勾选Optimization下变量名右侧的Include，表示将在Optimization中对这三个变量进行优化求解。



- 通过 Optimetrics/Add/Optimization 对最优化求解程序进行设置。



- 优化计算的目标参数：齿槽转矩 Cogging Torque Parameter
- 求解条件：最小化 Minimize



Setup Optimization

Goals | Variables | General

Optimizer: Quasi Newton(Gradient)

Max. No. of Iterations: 1000

Cost Function:

Solution	Calculation	Condition	Goal	Weight
Setup1 : Performance	CoggingTorqueParameter	Minimize		

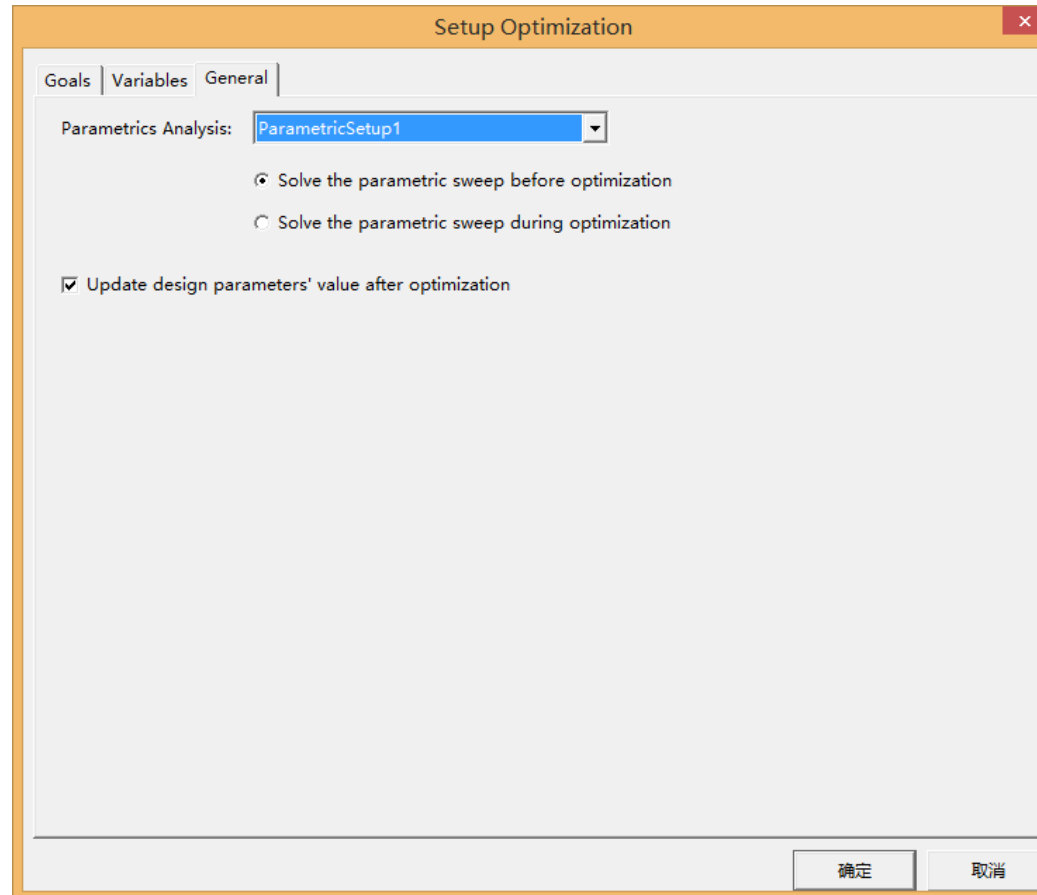
Setup Calculations... Delete Edit Goal/Weight...

Acceptable Cost: 0 Noise: 0.0001 ☐ Show Advanced Option

HPC and Analysis Options...

确定 取消

- 设置参数化分析为“先进行parametric sweep，再进行optimization”，程序将通过参数化扫描得到一个初始解，然后以这个解为起始点，在该解附近进行最优化求解。



- 最后进行分析计算，计算结束后，变量列表里的变量值会自动更新为计算得到的最优解。

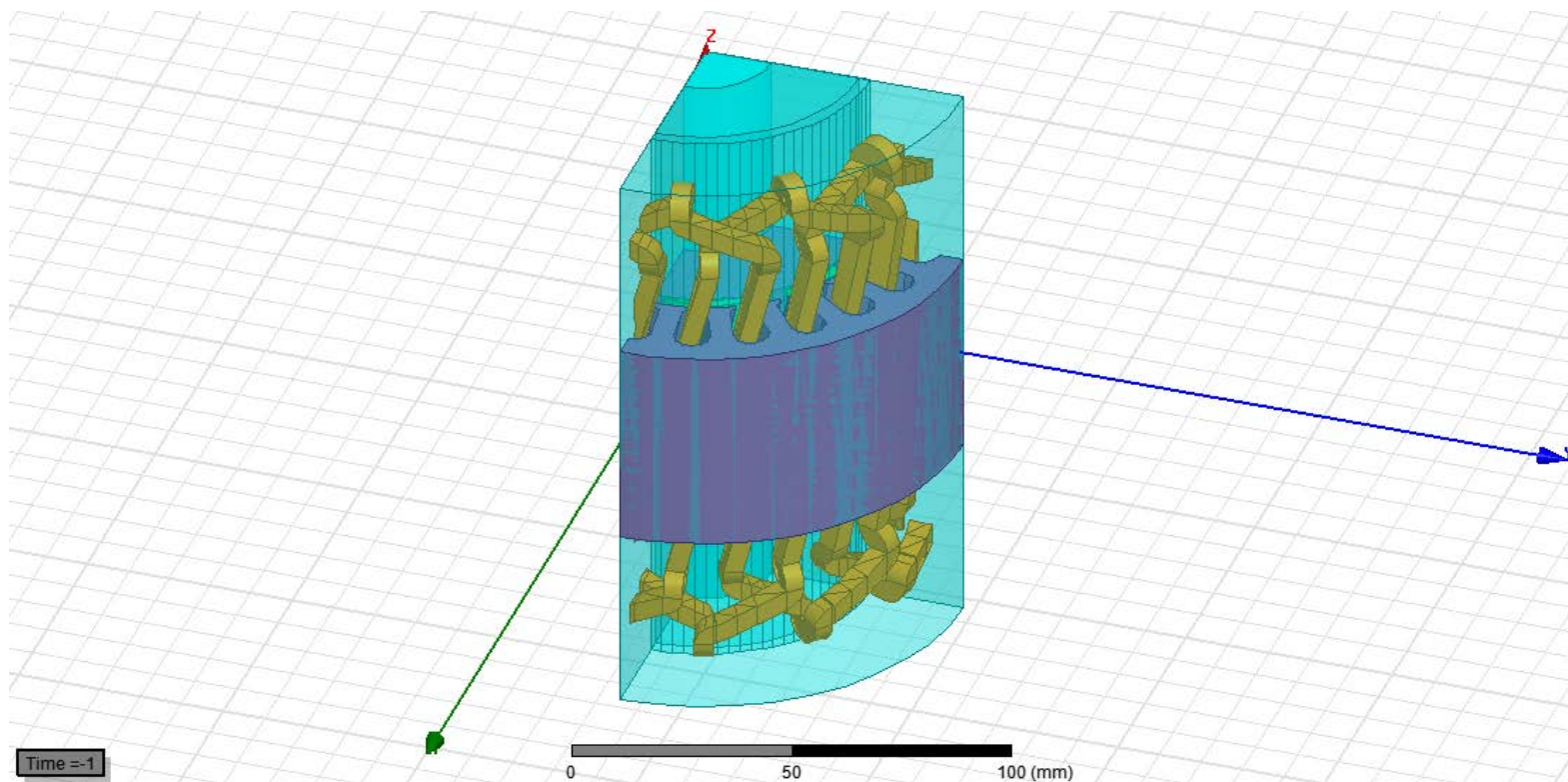
The screenshot displays the ANSYS Workbench interface. The top pane shows the 'Project1*' tree structure, which includes 'RMxpertDesign1 (Adj...)', 'Machine', 'Analysis', 'Optimetrics', 'OptimizationSet...', 'ParametricSetup...', 'Results', and 'Definitions'. The bottom pane is titled 'Variables' and contains a table with the following data:

Name	Value	Unit
SO	2.3	mm
POS	21	mm
PEB	0.85	

2. 基于Maxwell 3D的调速永磁同步电动机直、交轴电感有限元计算

- 永磁电机的 L_d 、 L_q 对于弱磁控制性能有很大影响，由于永磁体的存在，电机磁路不对称以及饱和效应都使得电机的 L_d 、 L_q 在传统磁路计算中很难计算准确，而在二维有限元场计算中，由于没有考虑端部漏磁和斜槽效应，其计算结果也不可靠，而且电机的转子在不同位置时，电感参数也随之改变，因此可采用三维有限元瞬态场对电感参数进行更为精确的计算。本节以表贴式永磁同步电动机为例，在Maxwell 3D瞬态场下对 L_d 、 L_q 进行了有限元计算，该方法同样适用于内置式永磁同步电动机。

- 通过Rmxprt模型一键生成3D有限元模型，生成的模型d轴和A相绕组轴线自动对齐。



- 设置全局变量（以\$开头表示其为全局变量），其中\$Ie为相电流有效值，这里设置为额定电流5A，\$f为电机额定频率，这里设置为166.67Hz，\$Ia、\$Ib、\$Ic分别为采用Id=0控制策略时的电流值。

Properties: Project2

Project Variables | Intrinsic Variables | Constants

☒ Value ☐ Optimization ☐ Tuning ☐ Sensitivity ☐ Statistics

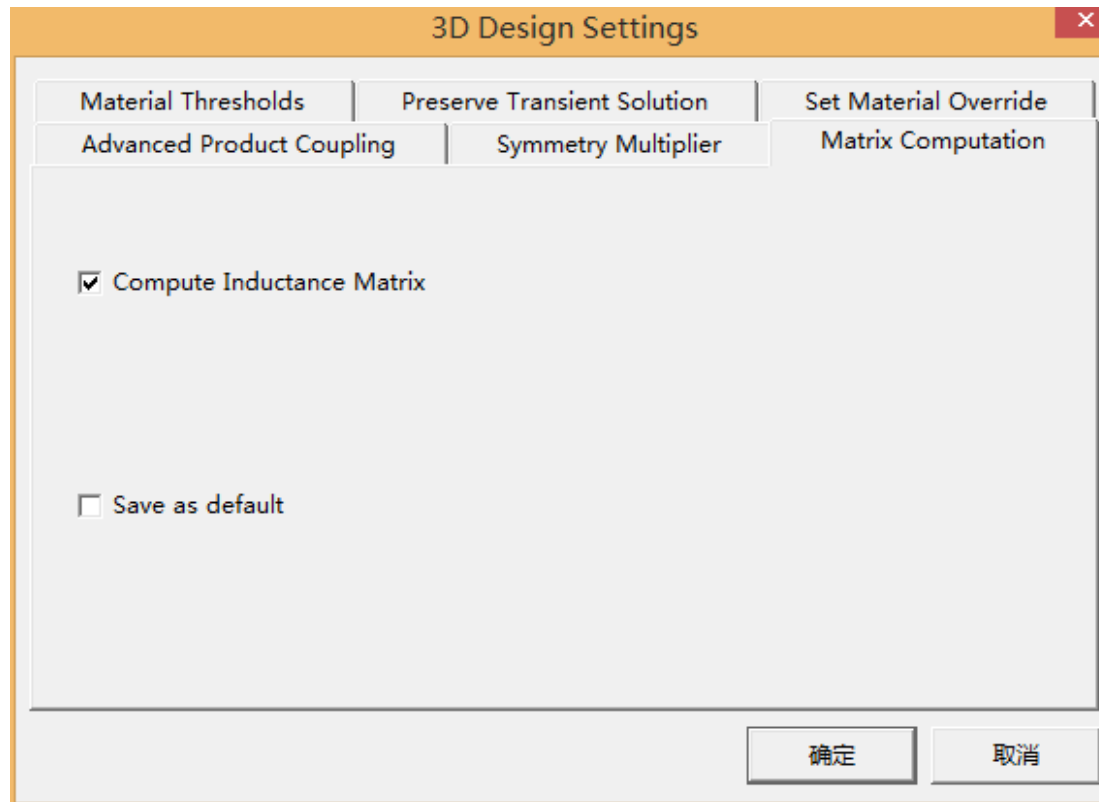
Name	Value	Unit	Evaluated Va...	Description	Read-only	Hidden
\$Ie	5	A	5A		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$f	2500*4/60	Hz	166.6666666...		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$Ia	$I_e \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot \text{time})$		*****		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$Ib	$I_e \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot \text{time} - 2\pi/3)$		*****		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$Ic	$I_e \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot \text{time} + 2\pi/3)$		*****		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

☒ Show Hidden

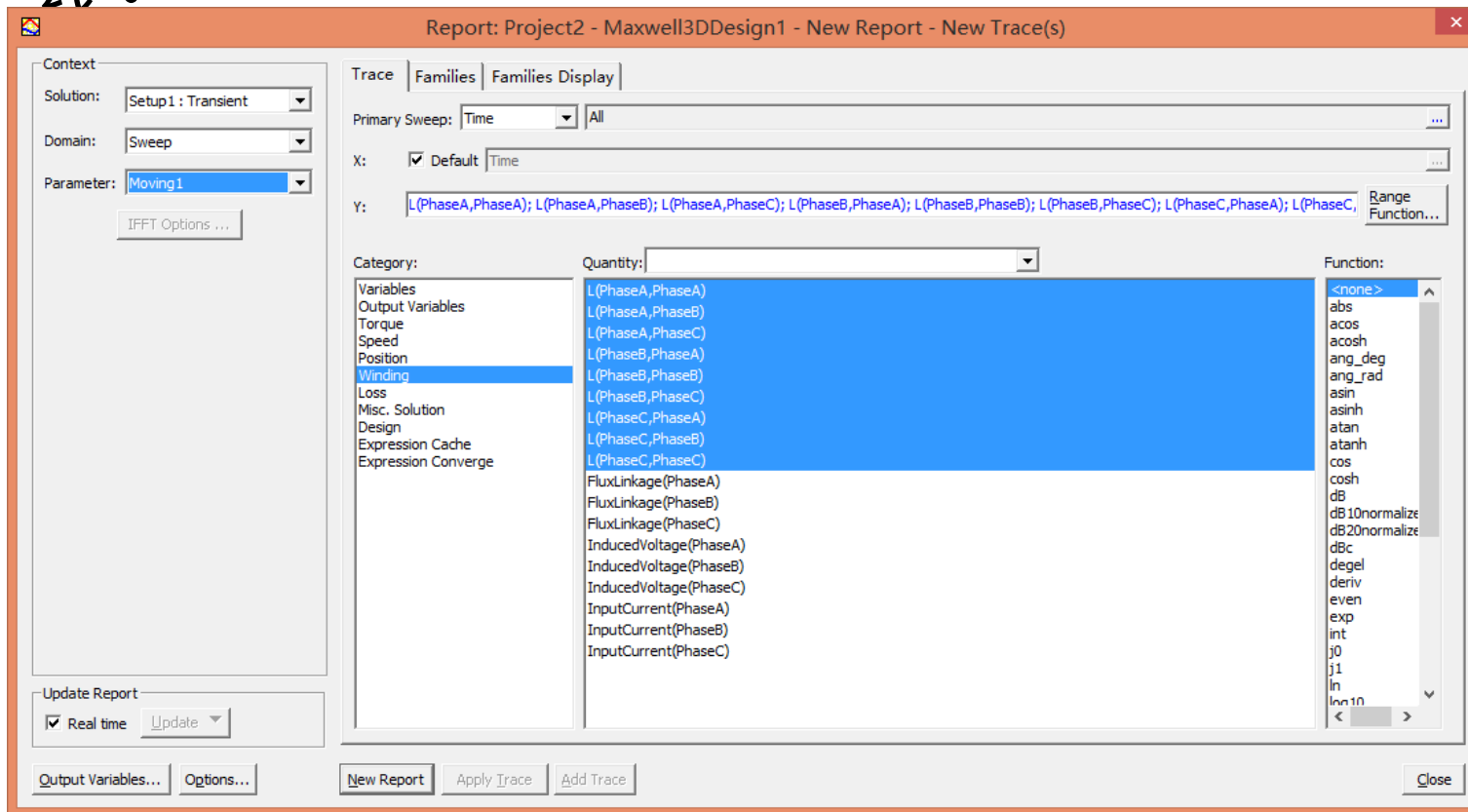
Add... Add Array... Edit... Remove

确定 取消

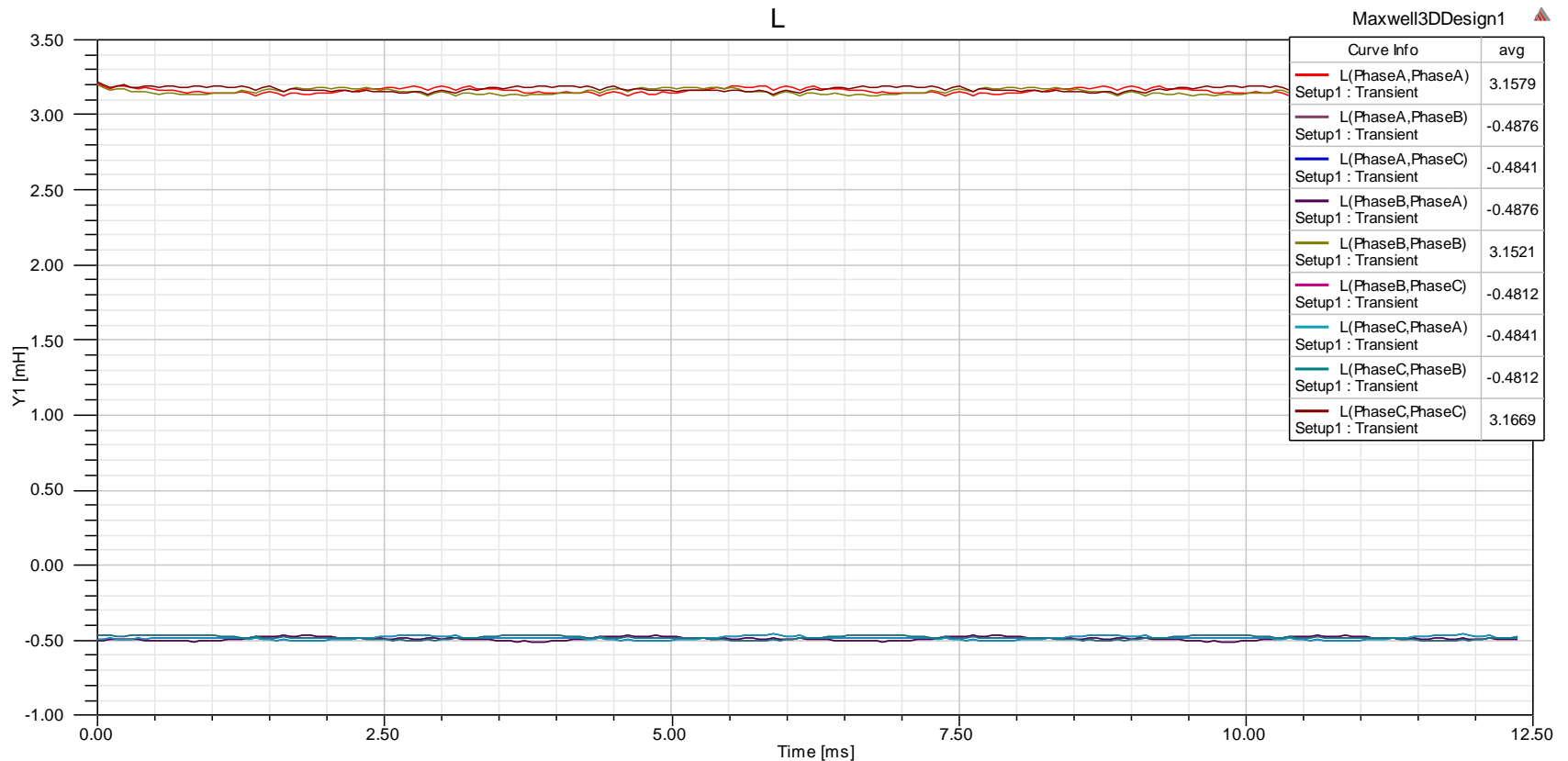
- 在 3D Design Settings 里勾选 “Compute Inductance Matrix”，程序会自动计算电感矩阵。



- 计算结束后，查看各相绕组自感、互感值随时间的变化曲线。



- 各相绕组自感、互感值仿真曲线，并取平均值 avg。



- 将自感和互感值的平均值写成矩阵形式：

$$L_{ABC} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.1579 & -0.4876 & -0.4841 \\ -0.4876 & 3.1512 & -0.4812 \\ -0.4841 & -0.4812 & 3.1669 \end{bmatrix}$$

- 由理论分析可知：

$$\begin{bmatrix} \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = C^T * \begin{bmatrix} \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = C^T * L_{ABC} * \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = C^T * L_{ABC} * C * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix};$$

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix}$$

- 即： $L_{dq} = C^T * L_{ABC} * C$

- 当d轴与A相绕组轴线对齐，采用 $I_d=0$ 控制时， $\theta=0$ 。用上述公式在Excel里计算得到 L_d 、 L_q 的结果为：

$$L_d = 3.64369 \text{ mH}$$

$$L_q = 3.64025 \text{ mH}$$

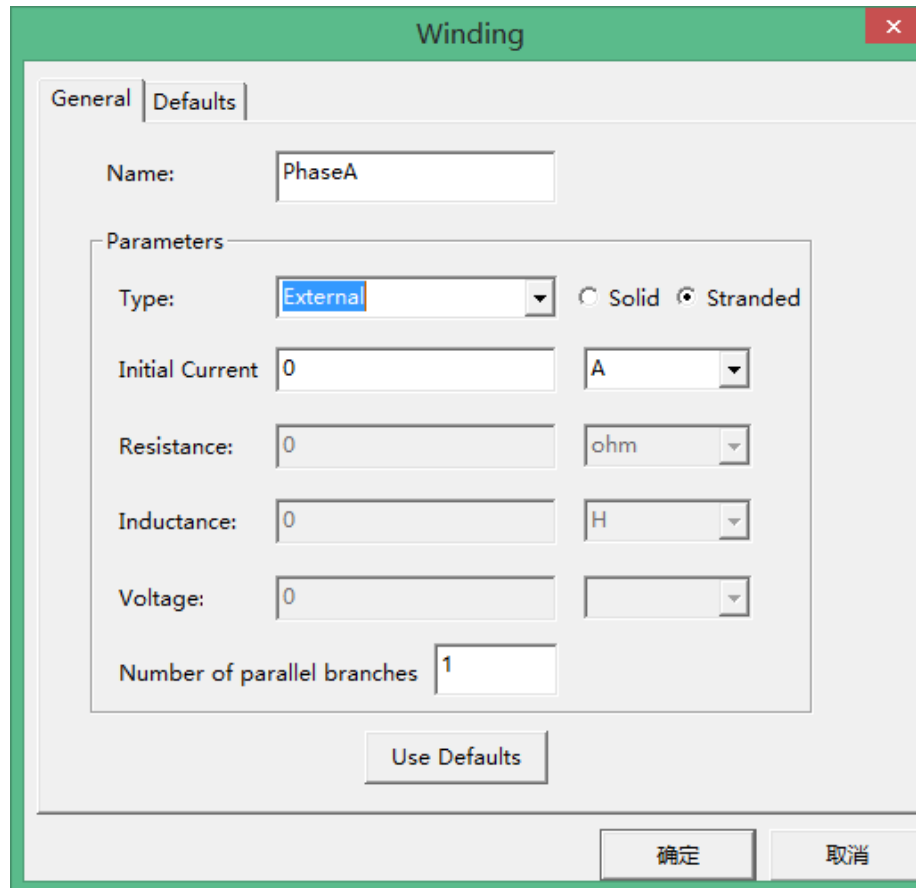
- 采用相同的方法在Maxwell 2D 瞬态场下计算得到 L_d 、 L_q 为：

$$L_d = 2.7261 \text{ mH}$$

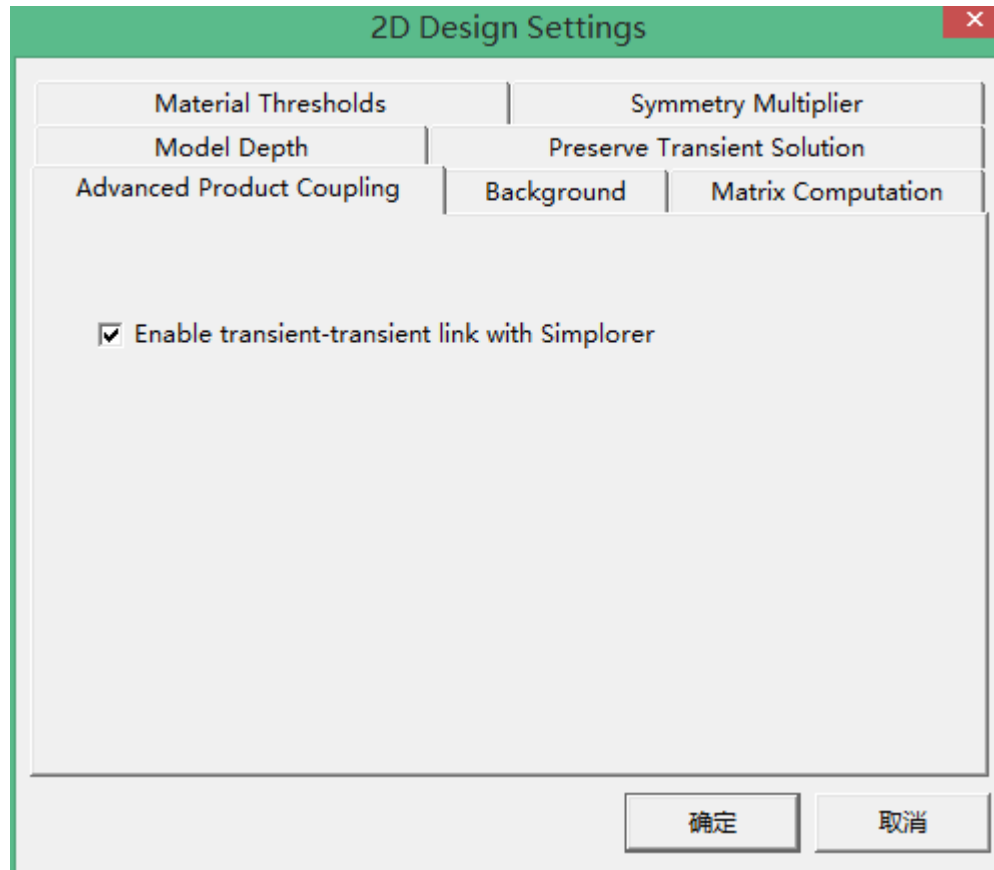
$$L_q = 2.7234 \text{ mH}$$

3. 基于Maxwell、Simplorer和Simulink的调速永磁同步电动机控制系统联合仿真

- 3.1 Maxwell下的设置
 - 将三相电流源的类型设置为External。

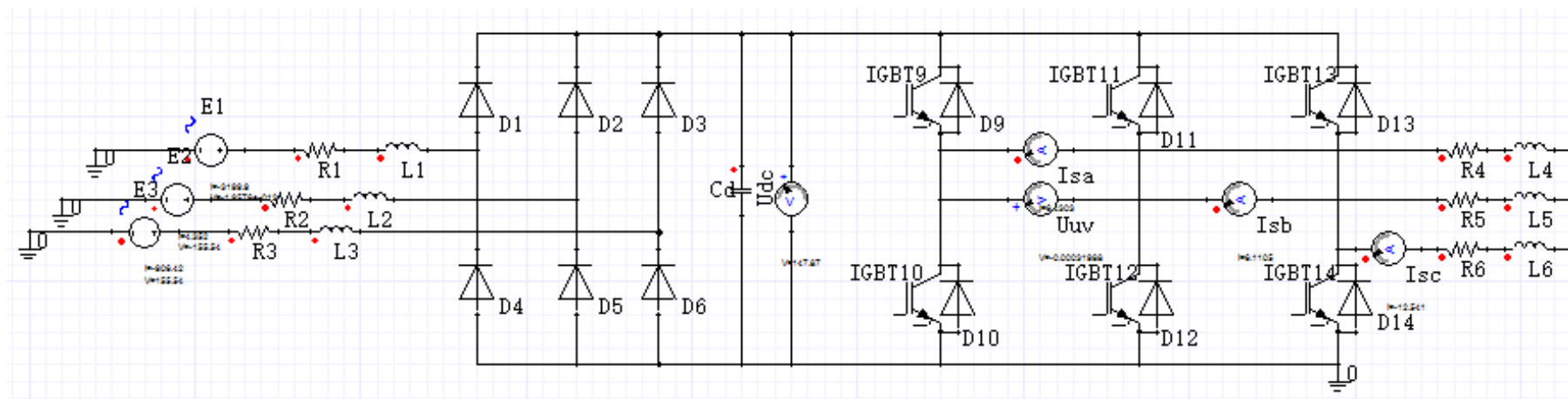


- 在 Design Setting / Advanced Product Coupling 处勾选“ Enable transient-transient link with Simplorer” ，允许 Maxwell 链接到 Simplorer 。

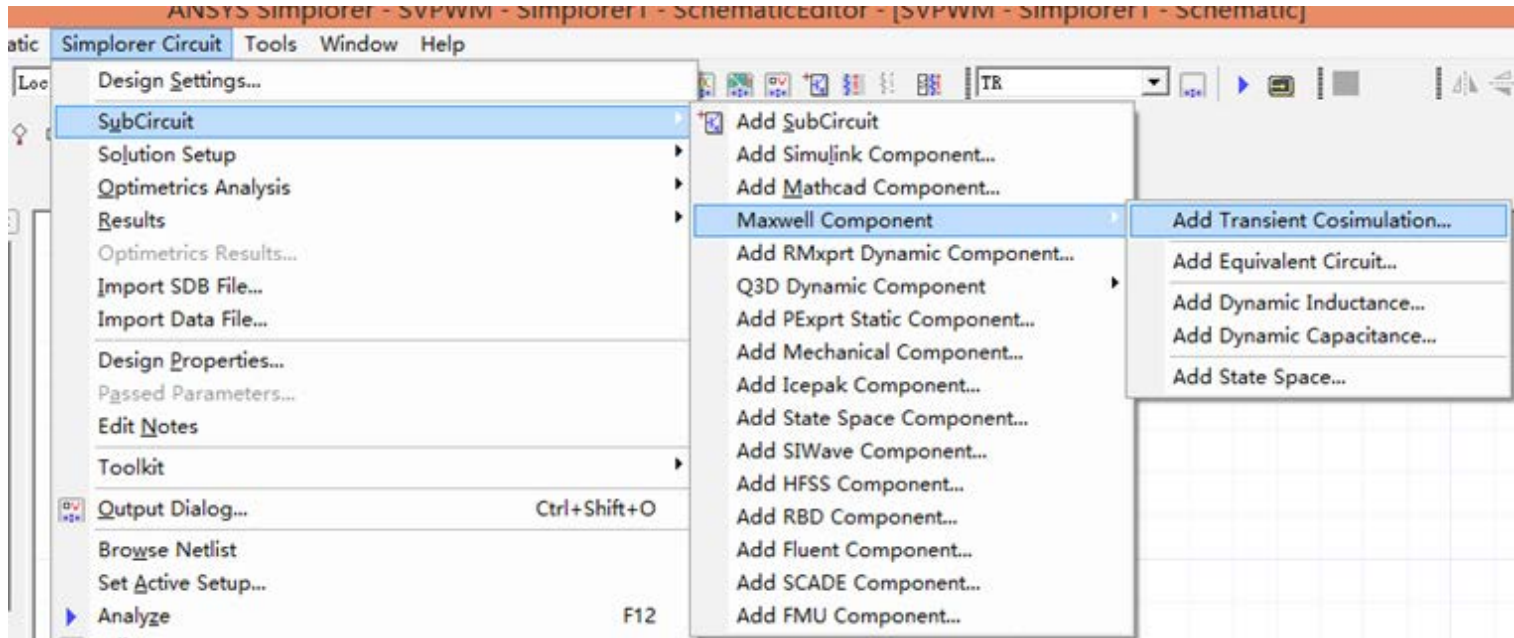


• 3.2 Simplorer 下的设置

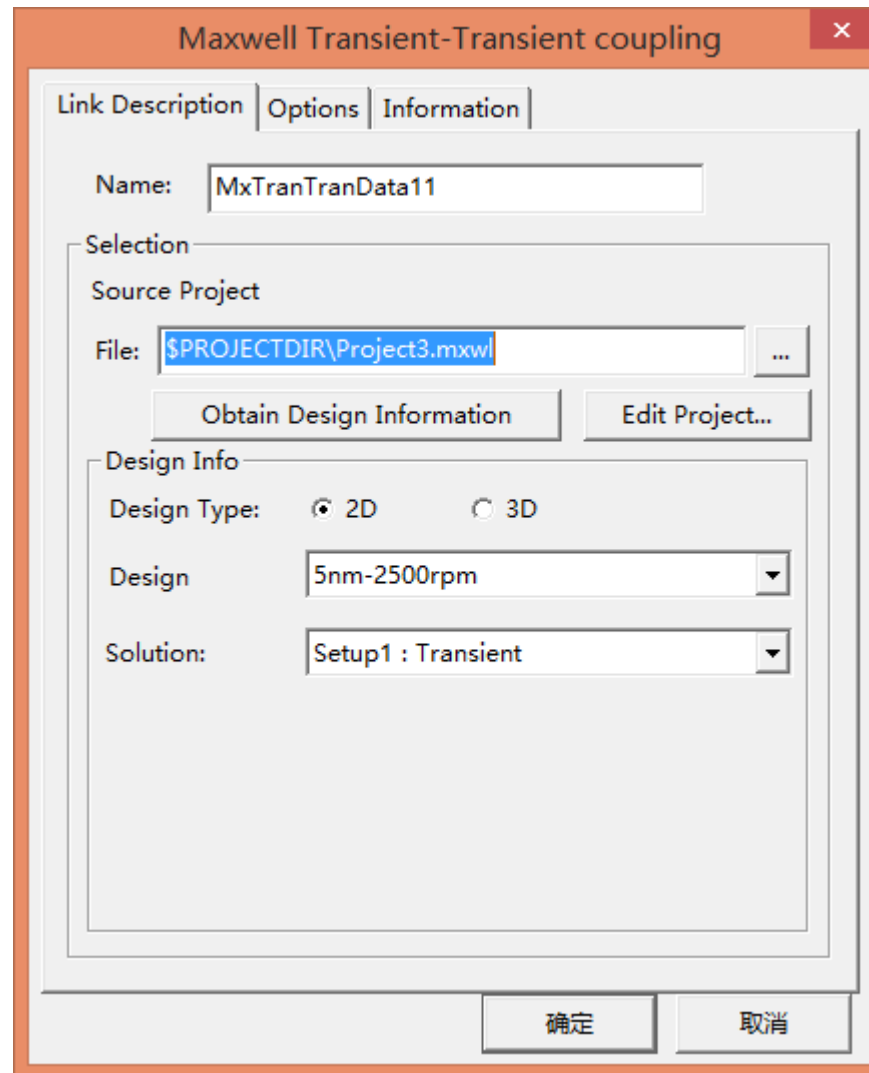
- Simplorer 中搭建 PWM 整流和逆变电路。

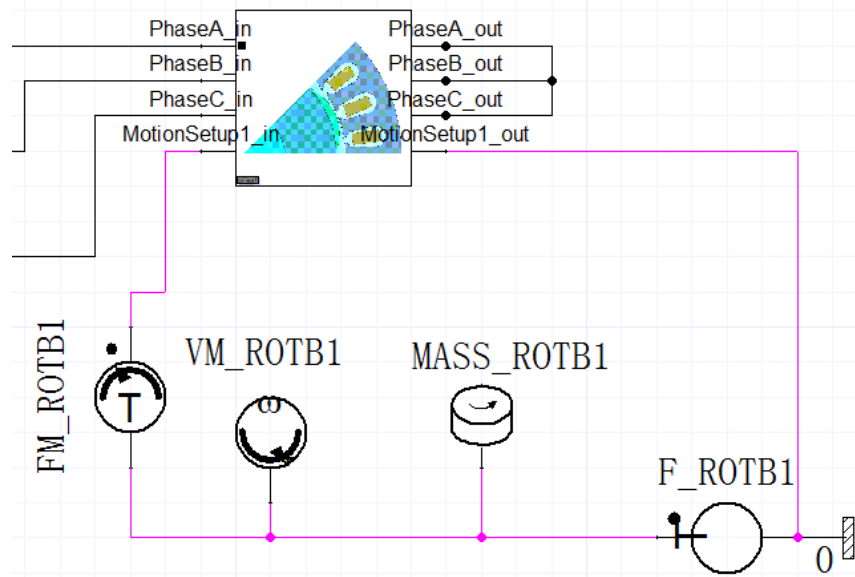


- 通过 SubCircuit / Maxwell Component / Add Transient Cosimulation 将 Maxwell 下的电机有限元模型导入 Simplorer 中。



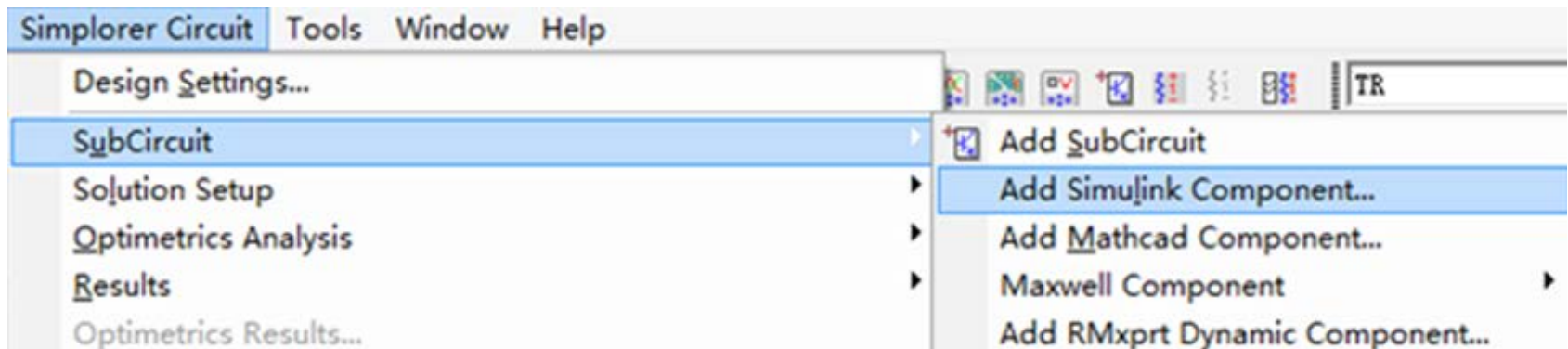
- 设置 Maxwell 模型所在的工程文件的路径

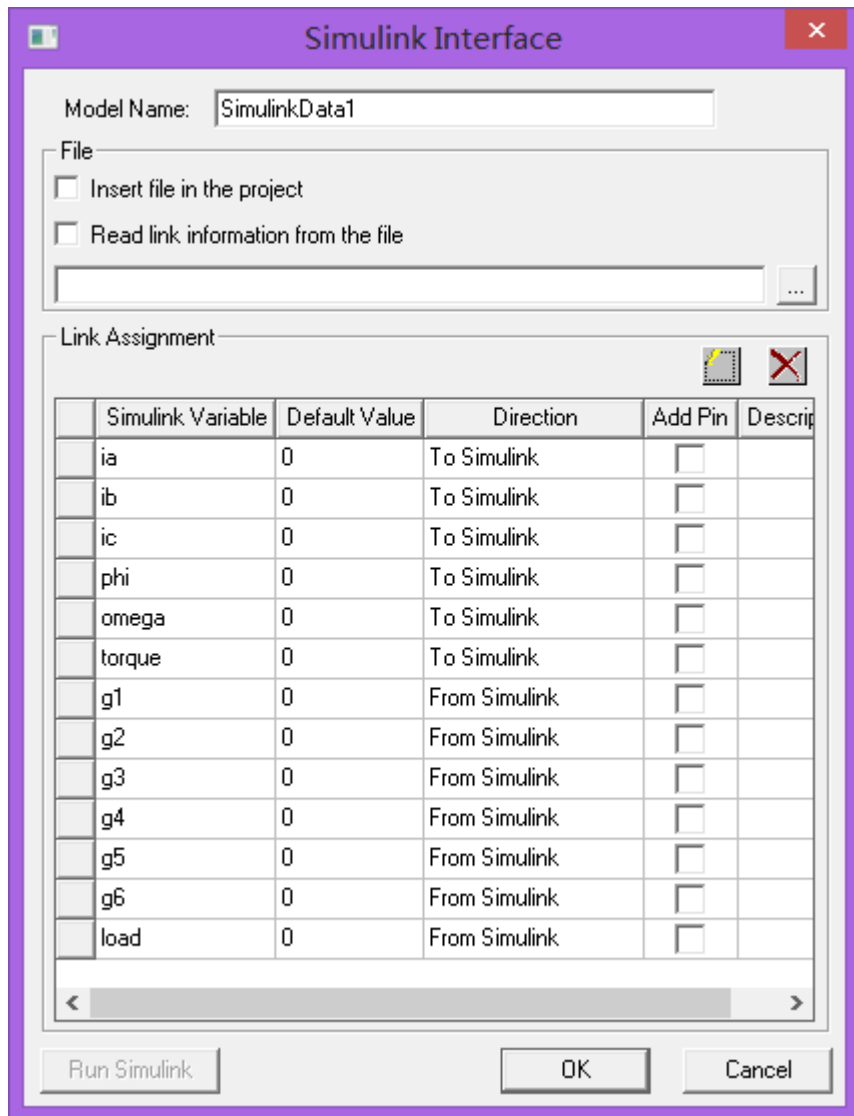




- 加入FM_ROT B、VM_ROT B、MASS_ROT B、F_ROT B等元件，其中：
 - FM_ROT B 获取电磁转矩并传递给 Simulink 模型；
 - VM_ROT B 获取电机机械角速度并传递给 Simulink 模型；
 - F_ROT B 从 Simulink 模型获取负载转矩并加载到 Maxwell 电机模型；
 - MASS_ROT B 中设置负载惯量并将转子旋转角度传递给 simulink模型，这里必须注意的是该元件里的PHI0处应填入Maxwell模型里设置的转子初始角度。

- 通过 SubCircuit / Add Simulink Component 添加 Simulink 模块，其作用是与 Simulink 内的 S-Function 模块进行数据传输。





- 定义各变量，注意变量输入/输出的方向，其中：
 - 电流 ia、ib、ic、转子角度 phi、角速度 omega、电磁转矩 torque 设置为 To Simulink。
 - g1-g6 逆变器 6 个 IGBT 的开关信号以及负载转矩 load，设置为 From Simulink。

MDL1:SimulinkData Properties: SVPWM - Simplorer1

Quantities | Parameter Values | Property Displays

☒ Value
 ☐ Optimization
 ☐ Tuning
 ☐ Sensitivity
 ☐ Statistics

	Name	Value	Unit	Description	Callback	Override	Directi...	Show Pin	Sweep	SDB
ia	Isa.I				...	<input checked="" type="checkbox"/>	In	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ib	Isb.I				...	<input checked="" type="checkbox"/>	In	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ic	Isc.I				...	<input checked="" type="checkbox"/>	In	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
phi	MASS_ROTB1.PHI				...	<input checked="" type="checkbox"/>	In	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
omega	VM_ROTB1.OME...				...	<input checked="" type="checkbox"/>	In	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
torque	FM_ROTB1.TOR...				...	<input checked="" type="checkbox"/>	In	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g1	0				...	<input checked="" type="checkbox"/>	Out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g2	0				...	<input checked="" type="checkbox"/>	Out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g3	0				...	<input checked="" type="checkbox"/>	Out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g4	0				...	<input checked="" type="checkbox"/>	Out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g5	0				...	<input checked="" type="checkbox"/>	Out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g6	0				...	<input checked="" type="checkbox"/>	Out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
load	0				...	<input checked="" type="checkbox"/>	Out	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

☐ Show Hidden

确定

取消

应用(A)

Parameters - IGBT9 - IGBT

Parameters | Output / Display

Name ☒ Show Name

Parameters

☒ Type

Forward Voltage
 Bulk Resistance
 Reverse Resistance

☐ Element Name ☐ Use Pin

Control Signal

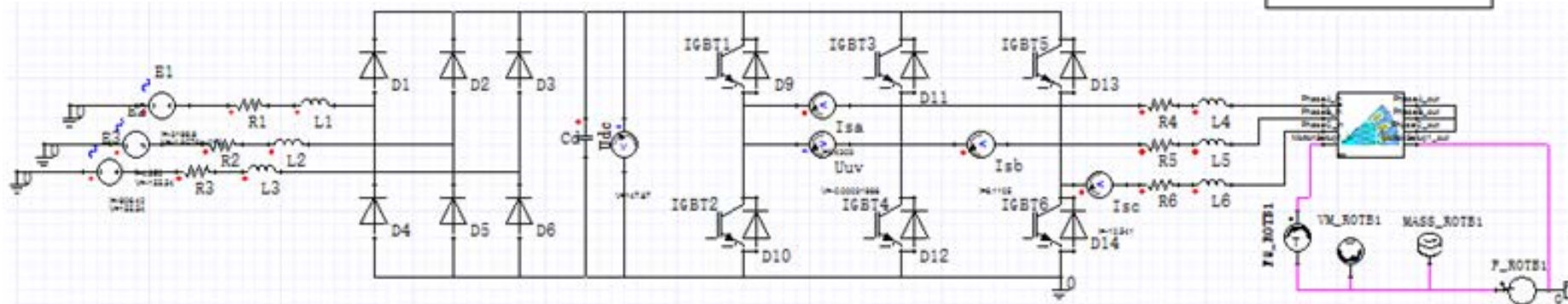
Control ☐ Use Pin
 Value, Variable, Expression

Outputs

☒ Voltage
 ☒ Current

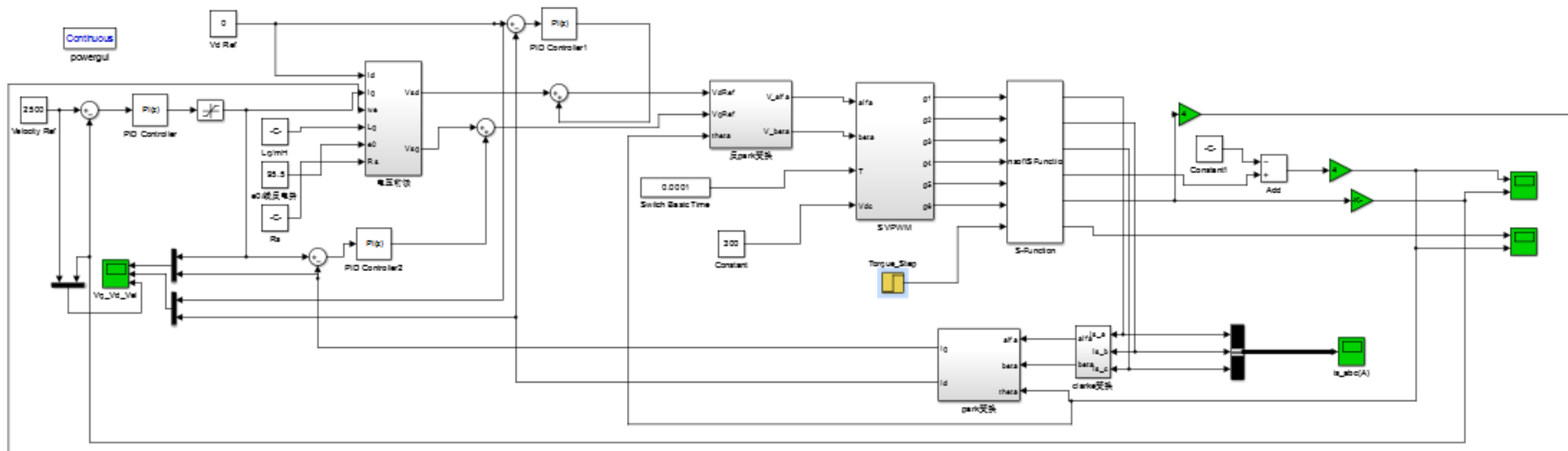
确定

取消

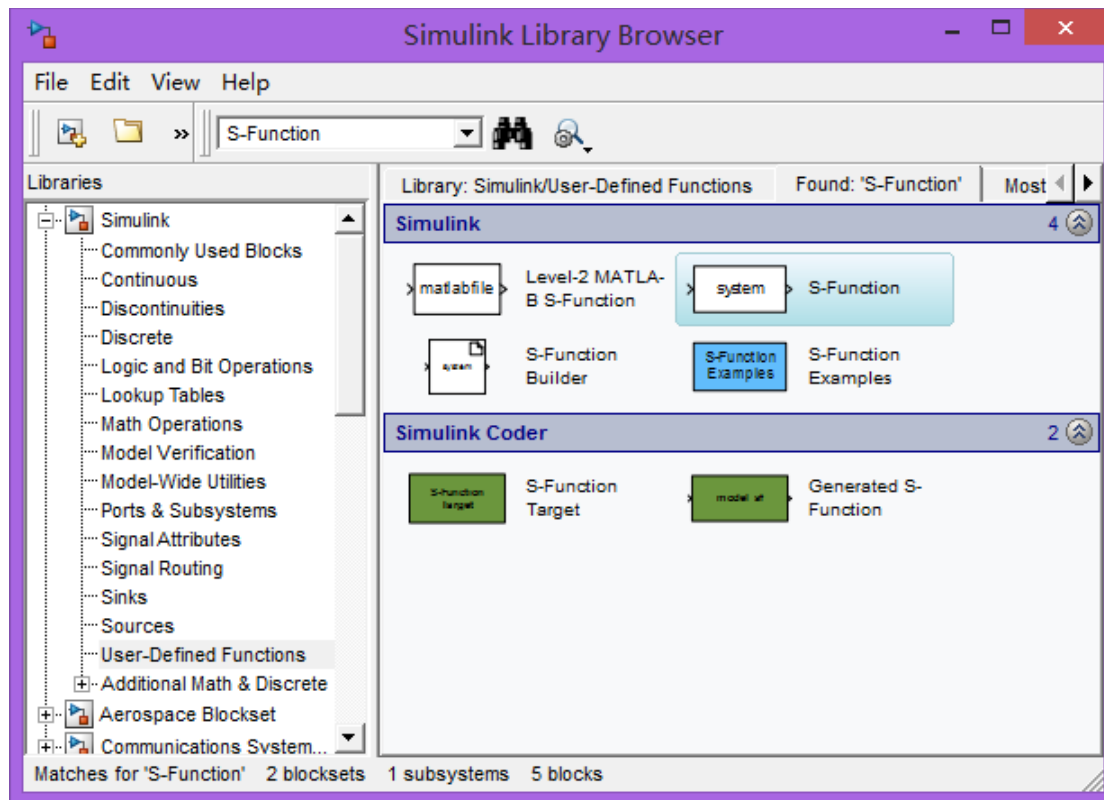


3.3 Simulink下的设置

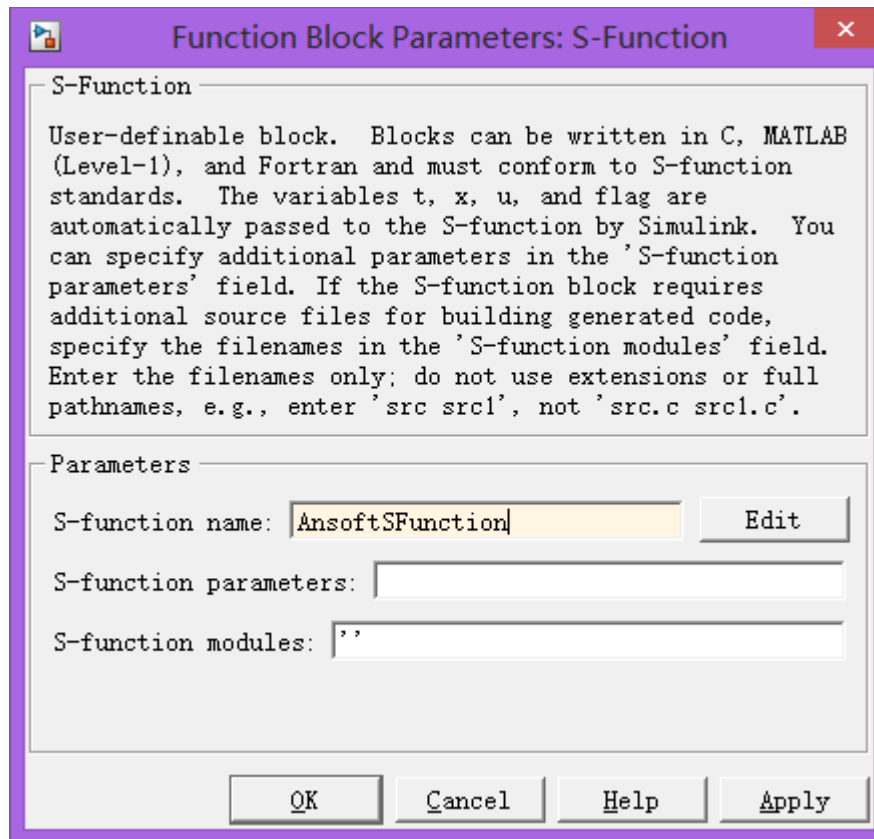
- 表贴式永磁同步电动机最常见的控制方式是转子磁场定向的矢量控制，常见的控制策略是 $i_d=0$ 控制，电机的转子装有编码器，用来检测电机的d轴位置与A轴之间的夹角和转速，速度的给定值与反馈值输入转速环PI调节器，输出q轴电流的给定值 i_{sq} ， i_{sq} 输入到电压前馈单元计算定子电压d、q轴分量 U_{sd} 、 U_{sq} ，电流环PI调节器输出值与电压前馈单元输出值相加，再经过反Park变换后得到两相静止坐标系下的给定值 U_{α} 、 U_{β} ，用来实现SVPWM算法。



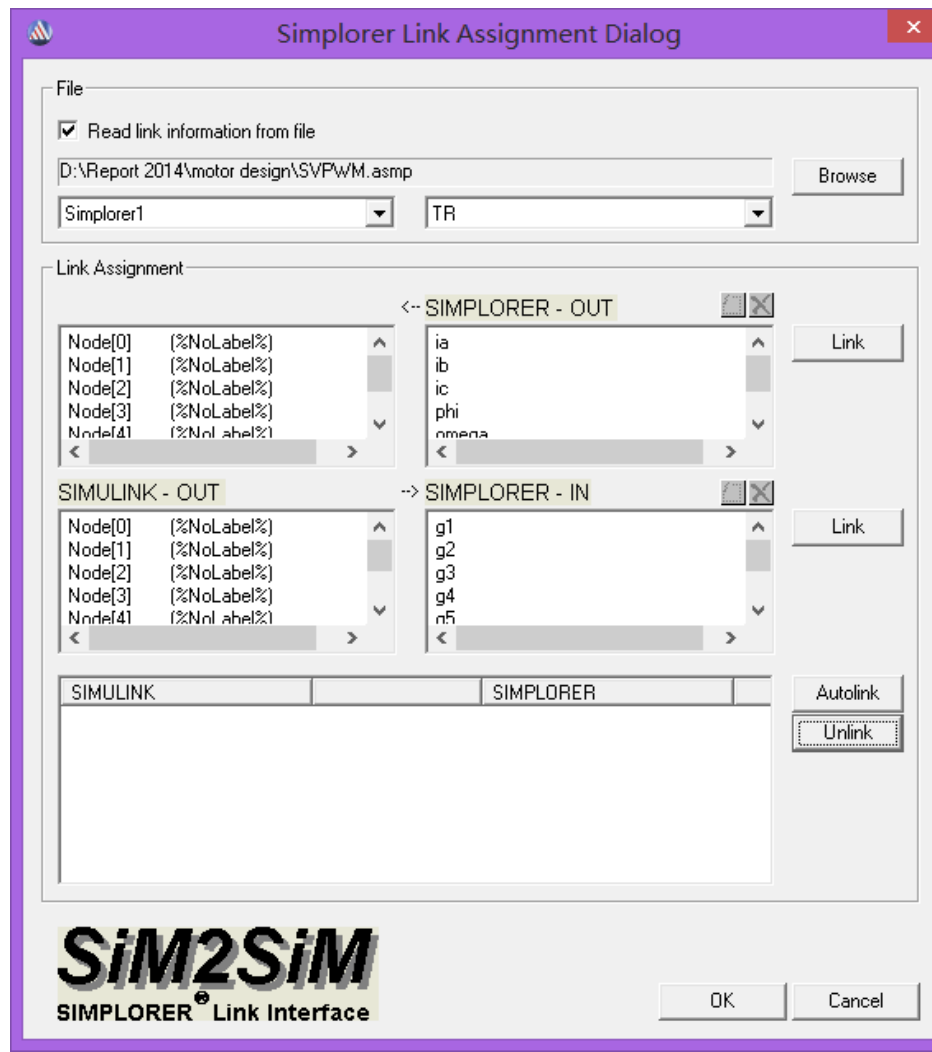
- 在 Simulink 下利用 S-Function 模块与 Simplorer 进行数据传输。



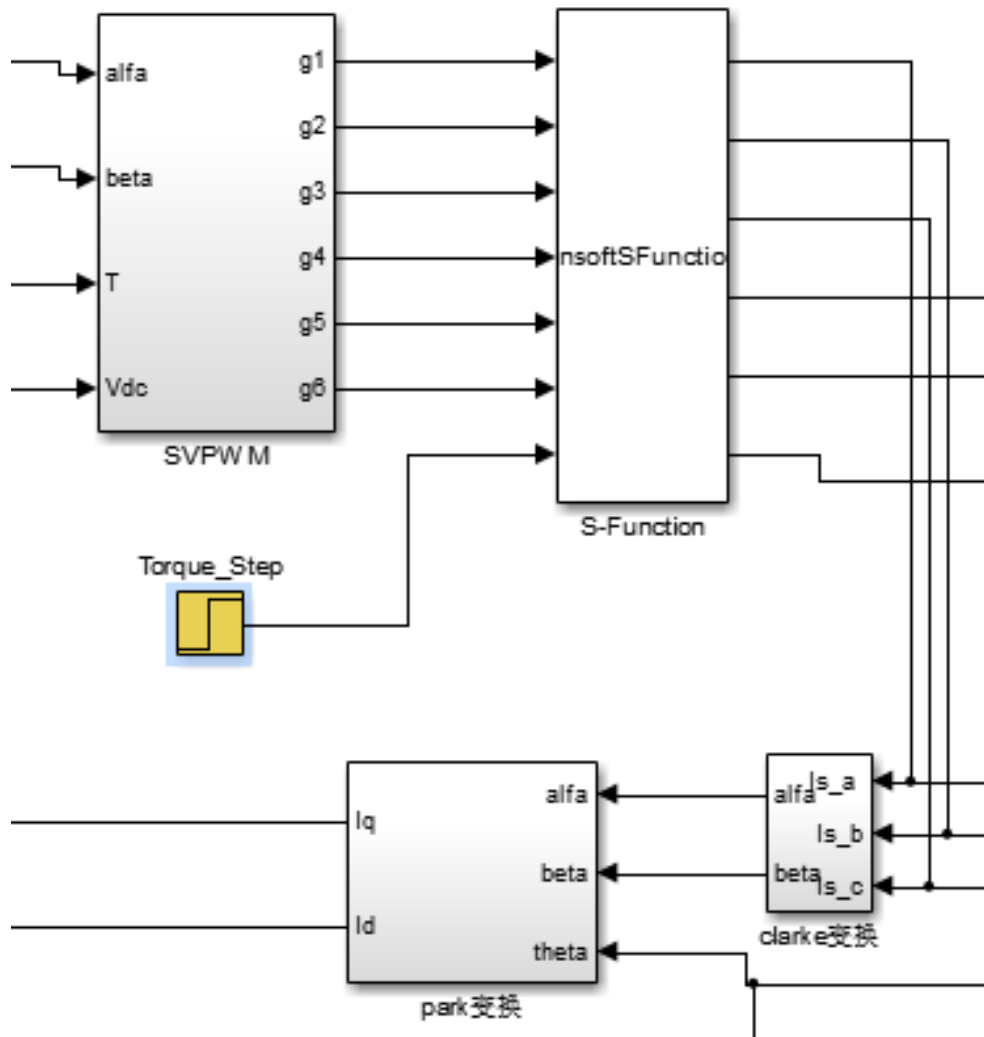
- 在 S-Function name 处填写 AnsoftSFunction



- 勾选 Read link information from file，加载 3.2 中创建的 Simplorer 模型，程序会自动读取其中的变量，然后将 Simulink 和 Simplorer 中相对应的变量进行 link 设置。

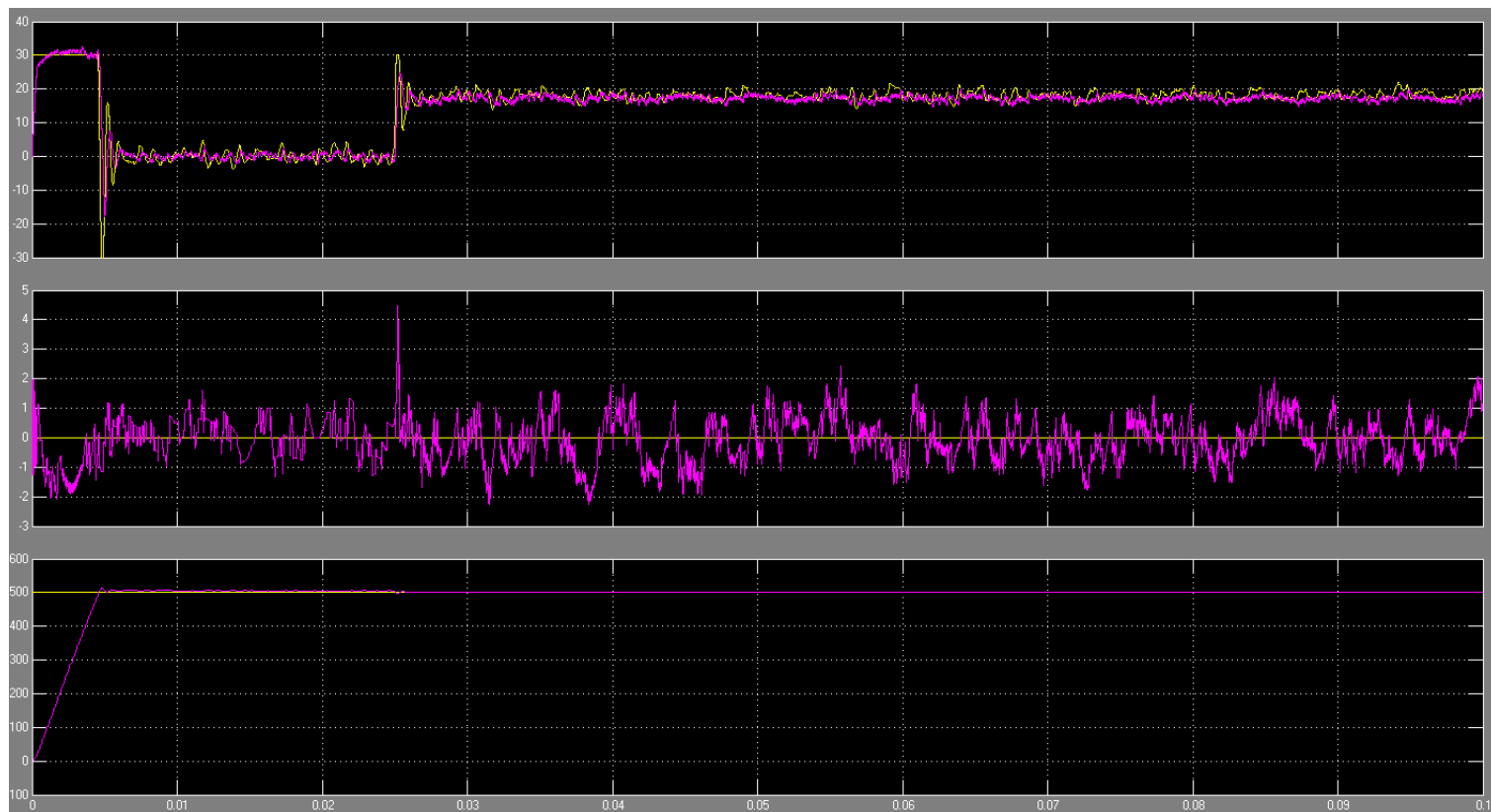


- 将 AnsoftSFunction 模块与其他模块相连。

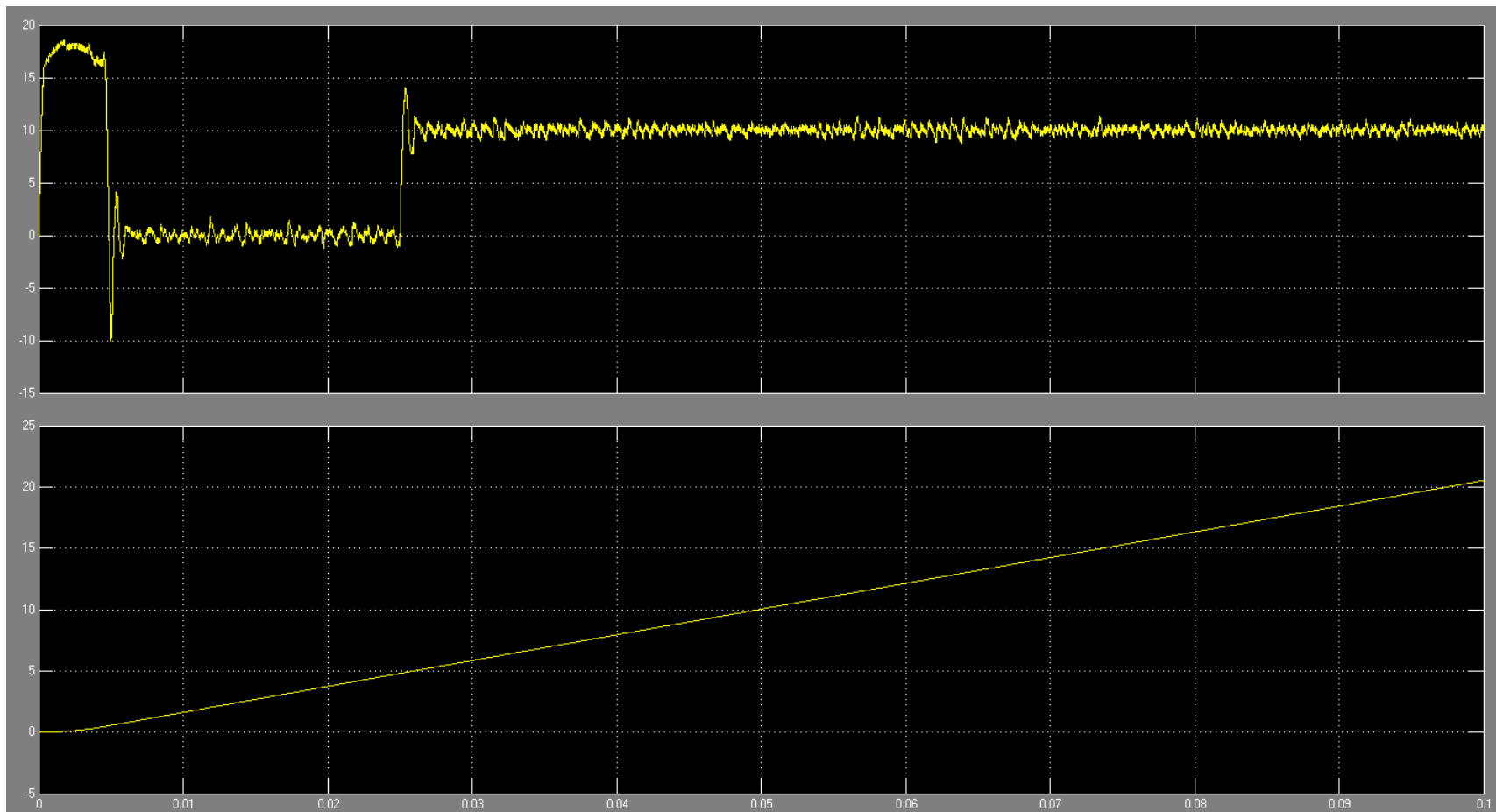


• 3.4 联合仿真

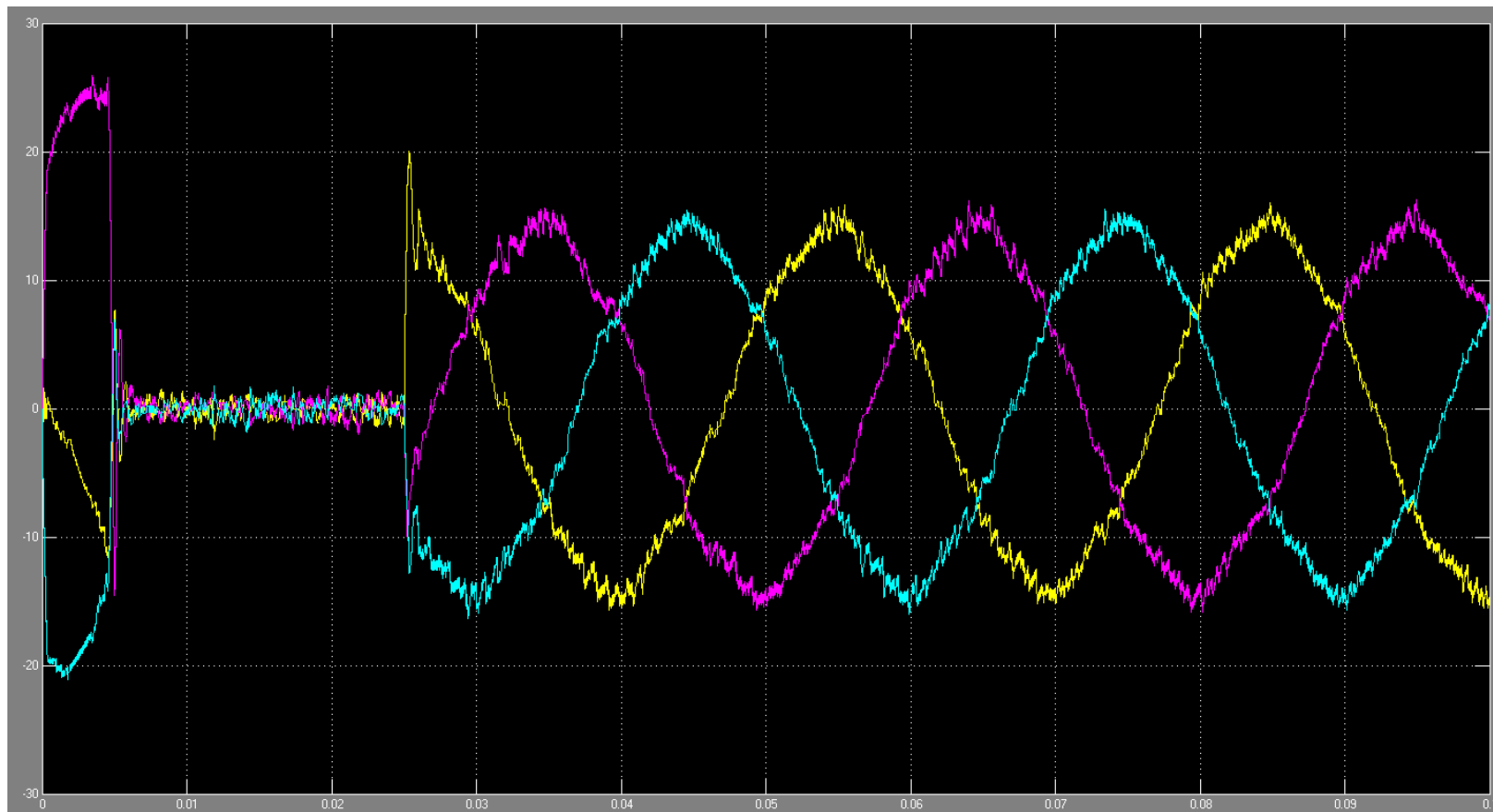
- 应确保三个模型的时间步长一致，且时间步长不能过大，本文经多次仿真试验，得到 $1e-005s$ 是一个比较折衷的选择，即保证了计算精度，也使仿真速度不致过慢。



- 转矩与转子角度仿真结果



- 定子三相电流仿真结果



4. 全文总结

- 利用 RMaxprt 中的 Optimization 工具，以齿槽转矩最小化为目标进行了最优化求解，得到了永磁电机齿槽转矩最小的设计方案，这一过程十分便捷，Optimization 工具在电机的优化设计中具有非常大实际价值；
- 在 Maxwell 3D 瞬态场下对永磁电机控制影响较大的电感参数 L_d 、 L_q 进行了计算，该计算方法相对二维静态场计算结果更为准确可靠，且操作便捷；
- 对表贴式永磁同步电动机采用 $i_d=0$ 控制策略时的 SVPWM 矢量控制系统进行了仿真，通过 Maxwell/Rmaxprt、Simplorer 以及 Matlab/Simulink 三个软件进行联合仿真可以更准确的检验电机设计方案的在整个控制系统中的性能表现，同时也有助于实现控制算法的仿真设计，具有很大的实际意义。

Thank you

