



ANSYS

ONVERGENCE
CONFERENCES

2018年7月11-13日 上海

永磁电机退磁和充磁仿真教程

李时伟



ANSYS

- **本教程介绍了永磁电机的退磁和充磁仿真**
- **本教程包含以下内容**
 - ✓ 退磁仿真原理
 - ✓ 永磁电机电流退磁仿真流程
 - ✓ 永磁电机温升退磁仿真流程
 - ✓ 永磁电机充磁仿真教程

永磁电机退磁仿真原理

Maxwell 退磁仿真要点



- **电流退磁仿真：**

- 永磁体的材料属性设置为非线性BH曲线
- 在瞬态场求解器中，打开退磁效应设置
- 在瞬态场仿真中，Maxwell计算和记录最恶劣工况下的退磁工作点，并沿基于该工作点的回复线进行回复

- **温升退磁仿真：**

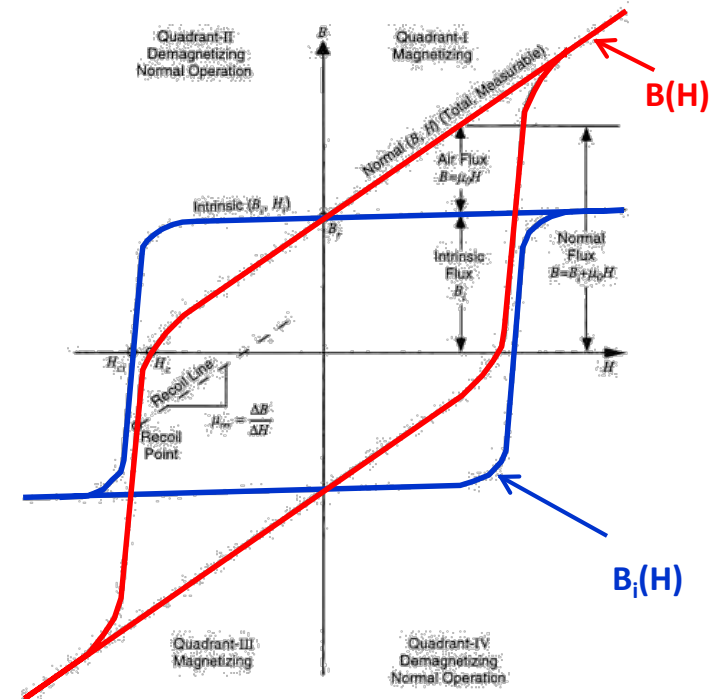
- 永磁体的材料属性设置为内禀BH曲线
- 激活材料属性的温升设置

- **BH曲线**

- 永磁体BH曲线位于主要位于第二象限($B > 0 ; H < 0$)，有时拓展到第三象限 ($B < 0 ; H < 0$)
- 永磁体的BH曲线具有拐点 (knee point)

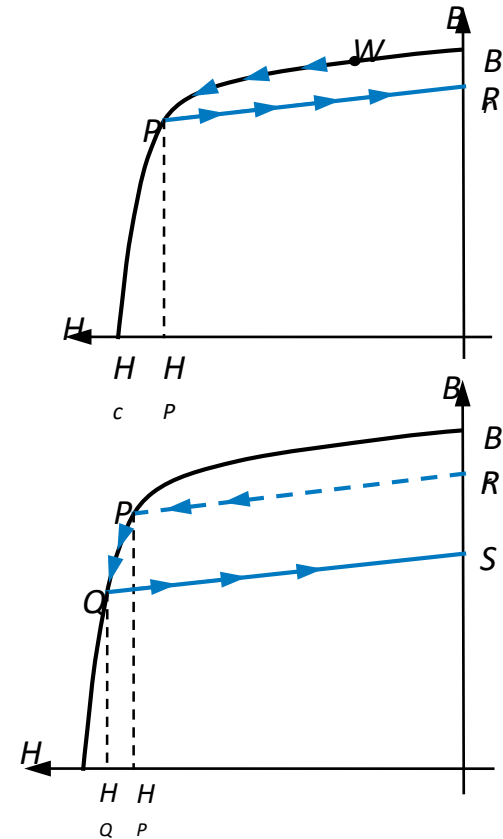
- **定义BH曲线有两种方式：**

- Normal
 - ✓ Normal退磁曲线在 $H=0$ 时的相对磁导率等于1
- Intrinsic
 - ✓ Intrinsic退磁曲线在 $H=0$ 时的相对磁导率等于0



不可逆退磁

- 当永磁体没有外加磁场时，永磁体工作点位于BH曲线，假设工作点为W
- 当施加外部反向磁场时，永磁体工作点从W沿BH曲线向下移动到P
- 移除外部磁场，工作点不会回复到W，而是回沿着PR回复
 - PR的斜率被称为回复磁导率
 - 与BH曲线纵轴起点($B = B_r, H = 0$)的切线斜率相同
- 重新施加反向磁场，永磁体工作点在PR之间
- 继续增加反向磁场HP, 工作点经过P点，沿BH曲线继续向下移动到新的最恶劣工作点HQ，并沿Q点生成新的回复线QS
- 永磁体一旦被退磁到拐点以下，无法恢复到初始状态，也就是不可逆退磁



温升作用下的退磁

- ✓ 永磁体磁密表达式

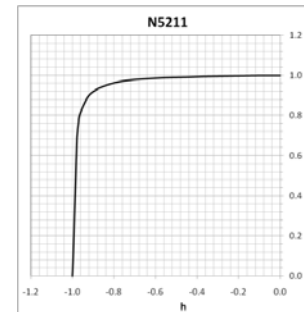
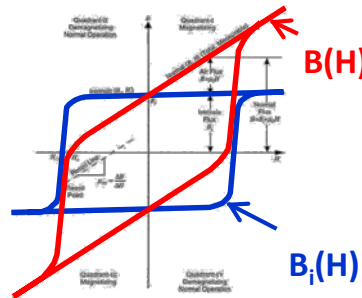
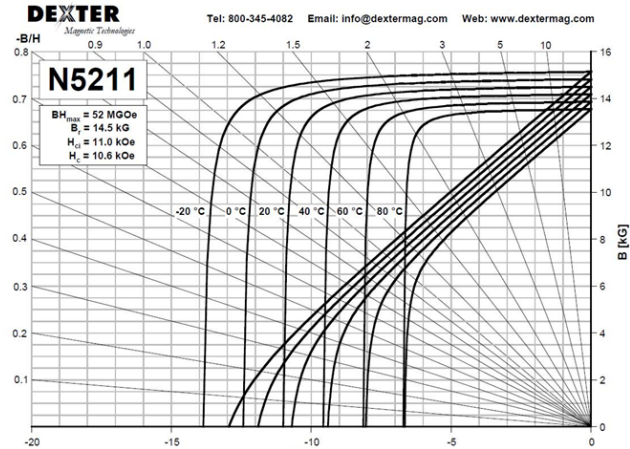
$$B(H) = \mu_0 \mu_r H$$

- ✓ 如果是内禀磁化曲线，表达式为

$$B_i(H) = B - \mu_0 H$$

B_i 称之为内禀磁密

$$\begin{cases} B_r(T) = B_r(T_{ref}) \cdot [1 + \alpha(T - T_{ref})] = B_r(T_{ref}) \cdot p(T) \\ H_{ci}(T) = H_{ci}(T_{ref}) \cdot [1 + \beta(T - T_{ref})] = H_{ci}(T_{ref}) \cdot q(T) \end{cases}$$



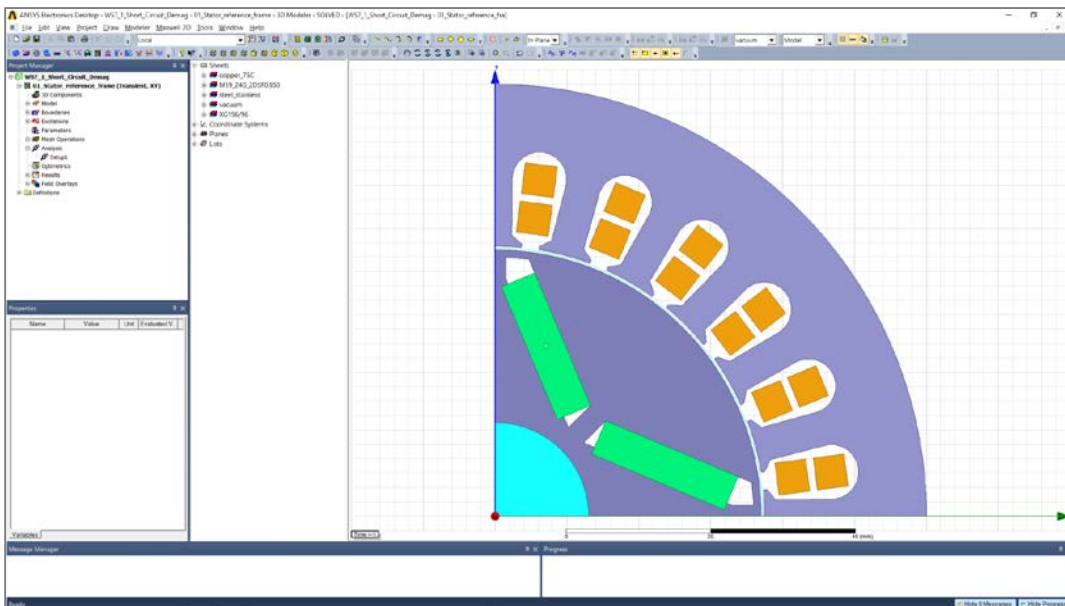
永磁电机电流退磁仿真

回复线仿真流程

电流退磁仿真

• 退磁仿真内容

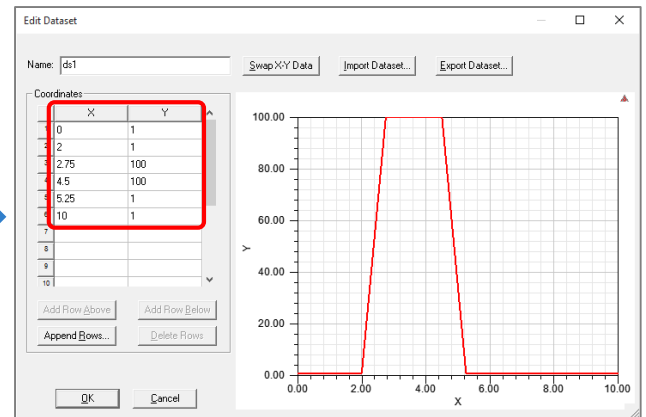
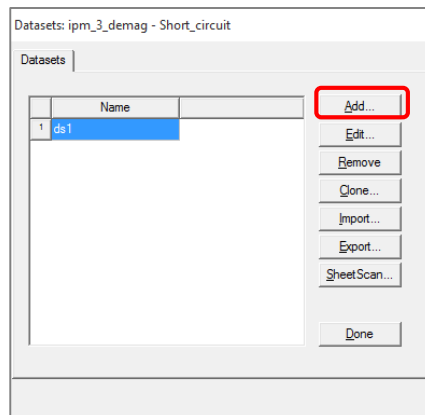
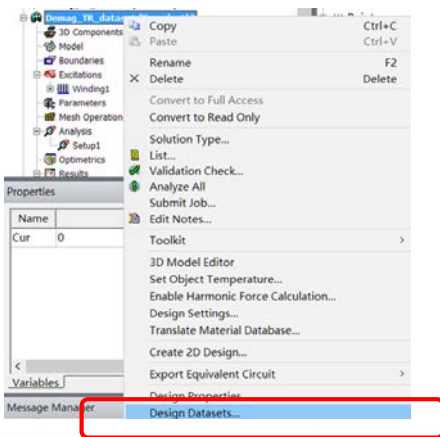
- 本例以永磁电机例，介绍电流退磁仿真流程
- 设置监测线，显示退磁和回复趋势



退磁电流设置

• 定子线圈电流

- Maxwell 2D → Design Datasets... 选择Add
 - ✓ Name : ds1
 - ✓ 按照下图方式，定义ds1
 - 初始电流为1A
 - 短路电流为100A



退磁电流设置

• 定子线圈电流

- 设置A相电流为 $I_{pk} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot \text{time} - \text{elec_phase})$ ，并在变量设置窗口中，分别设置
 - ✓ 电流幅值： $I_{pk} = 2A \cdot \sqrt{2} \cdot \text{pwl}(\text{ds1}, \text{time}/1\text{ms})$
 - ✓ 频率： $f_e = 50\text{HZ}$
 - ✓ 弱磁角： $\text{time} - \text{elec_phase} = -20\text{deg}$ ，可设置为 0deg
- 设置B相和C相电流，分别延迟 120 deg 和 240 deg

Name	Value
Name	PhaseA
Type	Winding Group
Winding T...	Current
IsSolid	Stranded
Current	$I_{pk} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot \text{time} - \text{elec_phase})$
Number of ...	1

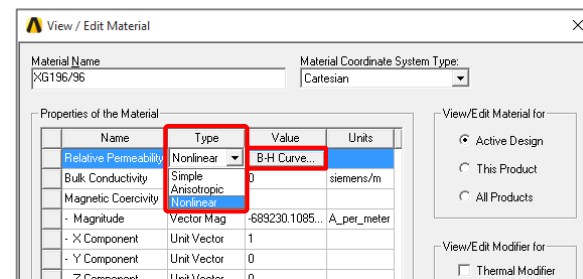
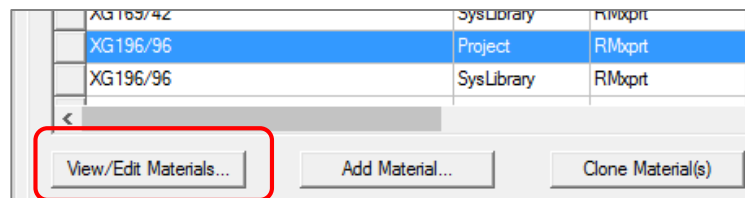
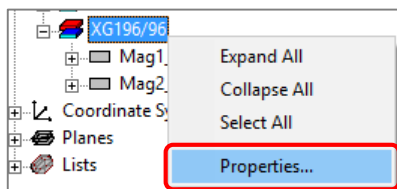
Name	Value
Name	PhaseB
Type	Winding Group
Winding T...	Current
IsSolid	Stranded
Current	$I_{pk} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot \text{time} - \text{elec_phase} - 120\text{deg})$
Number of ...	1

Name	Value
Name	PhaseC
Type	Winding Group
Winding T...	Current
IsSolid	Stranded
Current	$I_{pk} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot \text{time} - \text{elec_phase} - 240\text{deg})$
Number of ...	1

永磁材料设置

• 永磁体非线性BH曲线

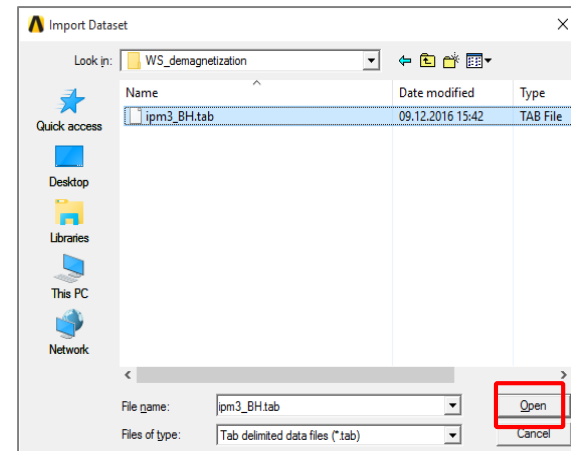
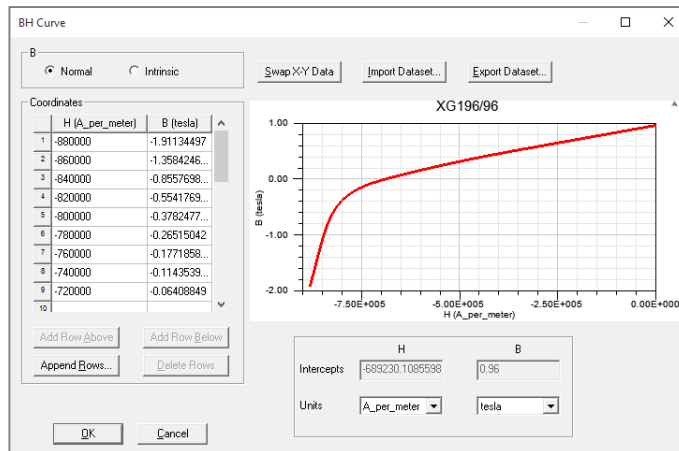
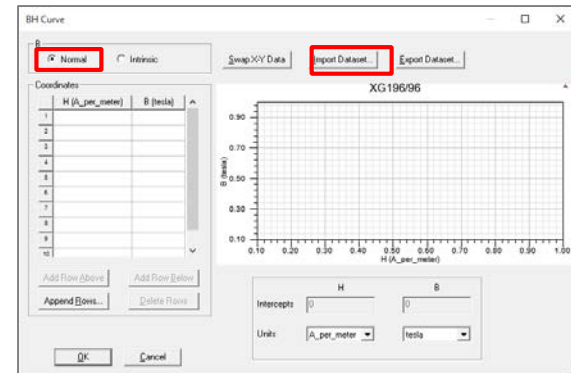
- 本例永磁体材料为“XG196/96”，材料为非线性，并延伸至第三象限。练习时也可选用其他材料。
- 在材料窗口选择为“XG196/96”，RMB → Properties
- 在材料设置窗口，点击 View/Edit Material
- 在材料编辑窗口，确保相对磁导率为 Nonlinear
- 点击B-H Curve...



永磁材料设置

• 导入BH曲线

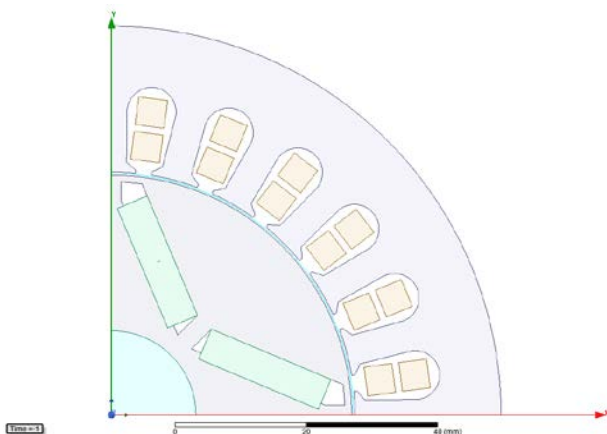
- Type : Normal
- 点击 Import Dataset...
- 浏览并查找ipm3_BH.tab, 选择Open
- 点击 OK 退出



退磁工作点监测

• 磁密监测

- 在永磁体中插入一段线，用来检测该处的磁密；监测线的方向与与永磁体充磁方向保持一致
- 为了提取在线上的场强，需要在线计算器中进行处理

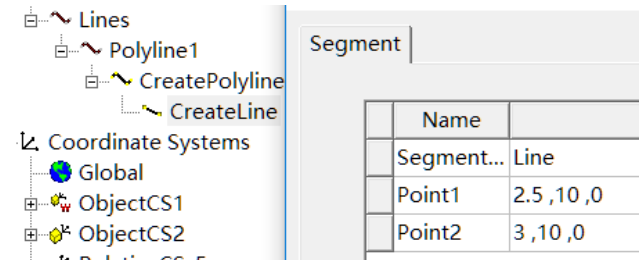
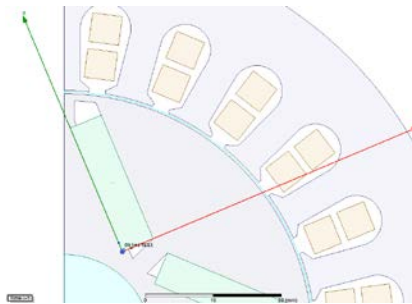
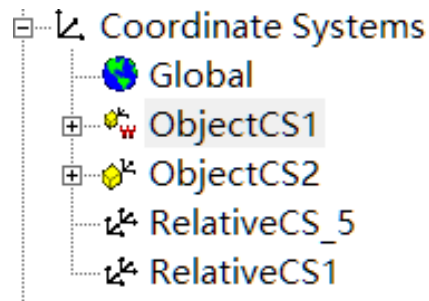


退磁工作点监测






• 生成监测线

- 激活永磁体面坐标系，画线
- 检查线段的坐标，确保和永磁体充磁方向一致

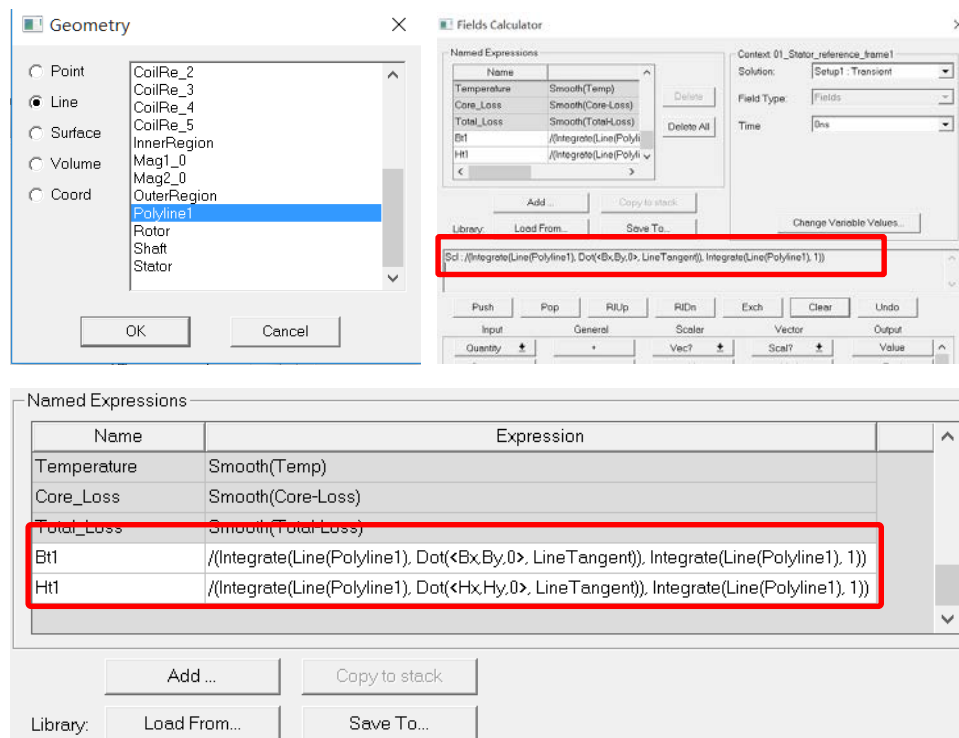


退磁工作点监测

• 场计算器操作

- ✓ Maxwell2D → Fields → Calculator
- ✓ Quantity → B
- ✓ Vector → Unit Vec → Tangent
- ✓ Dot
- ✓ Geometry → Line > Polyline1 → Press OK
- ✓ Scalar → integrate 
- ✓ 点击 Number... → Scalar, 输入 1, OK
- ✓ Geometry → Line > Polyline1 → Press OK
- ✓ Scalar → integrate 
- ✓ General → divide 
- ✓ 点击 Add..., Name 输入: Bt1, 点击 OK
- ✓ 对 H 进行重复操作, 添加 Ht1

• Note: Polyline1 是线的名字



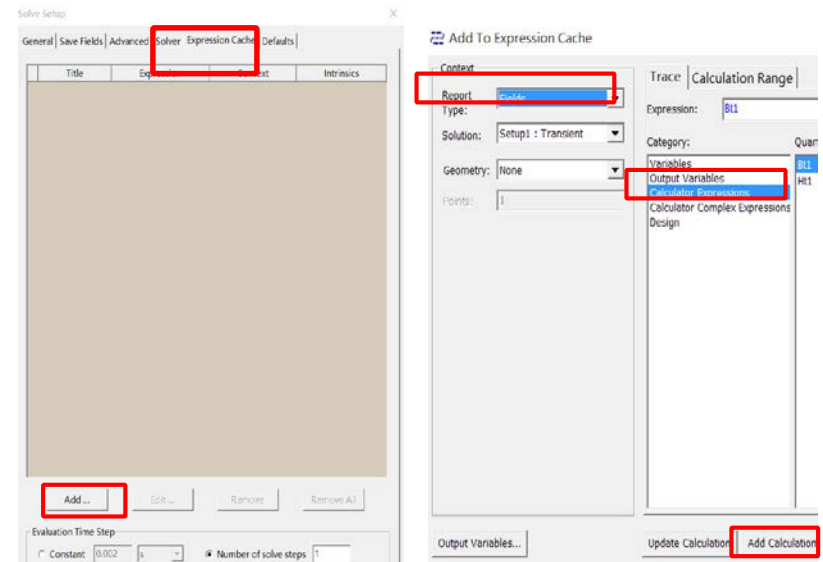
The image shows two screenshots of the ANSYS Fields Calculator interface. The top screenshot shows the 'Geometry' dialog box with 'Polyline1' selected under the 'Line' category. The 'Fields Calculator' dialog box is also open, showing a list of named expressions. The bottom screenshot shows a detailed view of the 'Named Expressions' table, where the expressions for Bt1 and Ht1 are highlighted with a red box.

Name	Expression
Temperature	Smooth(Temp)
Core_Loss	Smooth(Core-Loss)
Total_Loss	Smooth(Total-Loss)
Bt1	$1 / (\text{Integrate}(\text{Line}(\text{Polyline1}), \text{Dot}(\langle \text{Bx}, \text{By}, 0 \rangle, \text{LineTangent})), \text{Integrate}(\text{Line}(\text{Polyline1}), 1))$
Ht1	$1 / (\text{Integrate}(\text{Line}(\text{Polyline1}), \text{Dot}(\langle \text{Hx}, \text{Hy}, 0 \rangle, \text{LineTangent})), \text{Integrate}(\text{Line}(\text{Polyline1}), 1))$

添加高级求解设置

• 在求解设置中添加Expression Cache

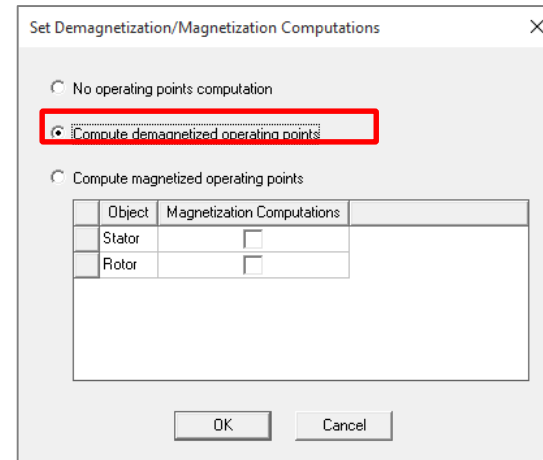
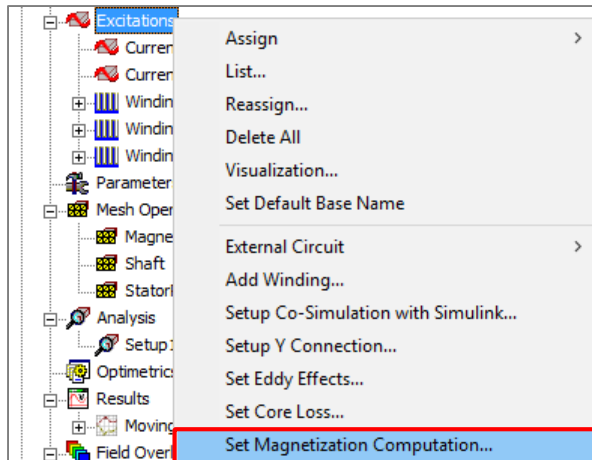
- 在Project Manager → Analysis → Setup1，双击
- 打开Expression Cache页，点击 Add
 - ✓ Report Type: Fields
 - ✓ Calculator Expression: Bt1
 - ✓ 点击 Add Calculation
 - ✓ 选择Ht1，点击Add Calculation



激活退磁工作点计算

• 设置退磁工作点计算

- 在Project Manager 窗口, Excitation右键 (RMB) → Set Magnetization Computation...
- 勾选 Compute demagnetized operating points
- 点击 OK.



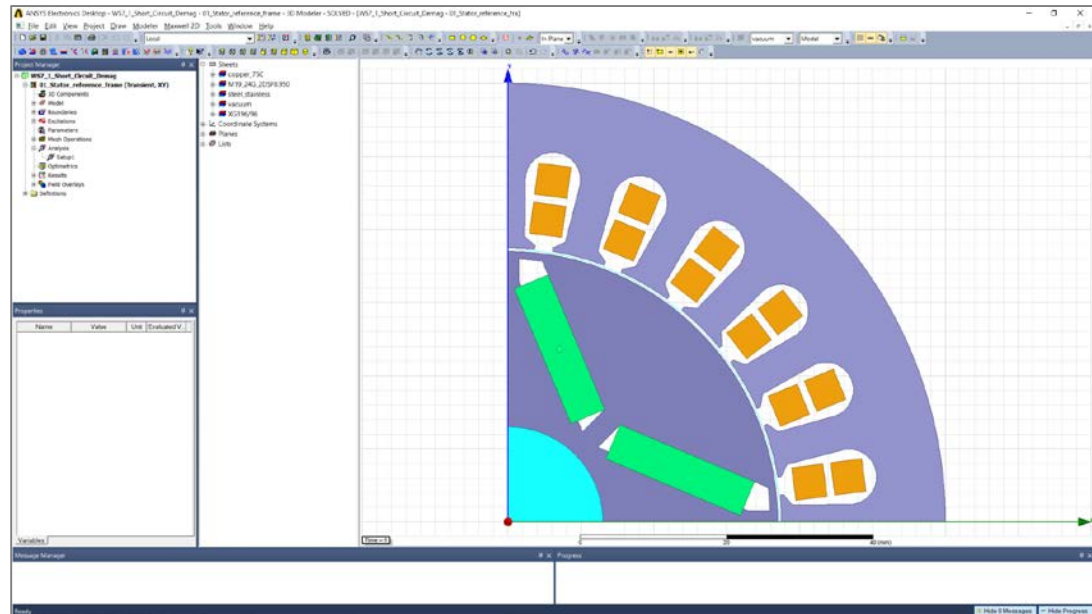
求解设置



• 求解设置

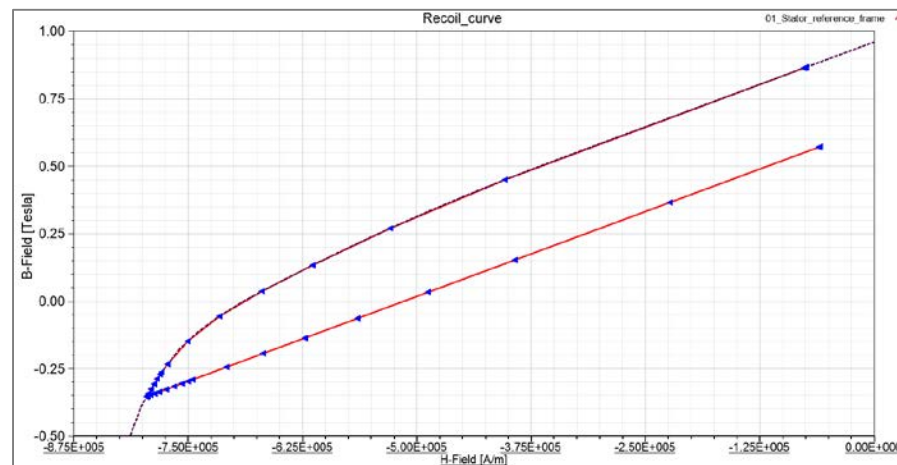
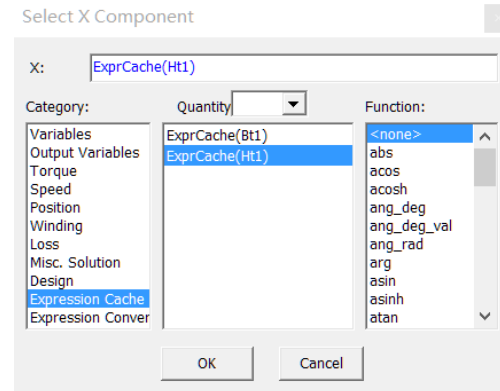
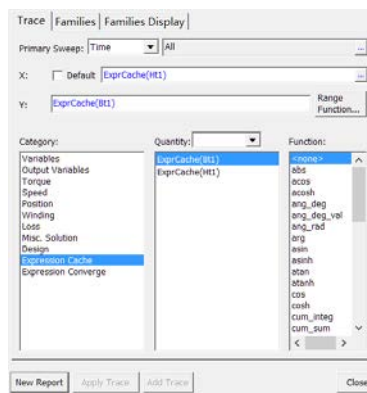
- 转子在对齐位置（推荐）
- 设置恒转速，例如1500 rpm
- 设置求解时间和步长
 - ✓ 时间步长 $0.1e-3$ s
 - ✓ 求解时间 $8.0e-3$ s
 - ✓ 保存场点

• 完成设置后，求解

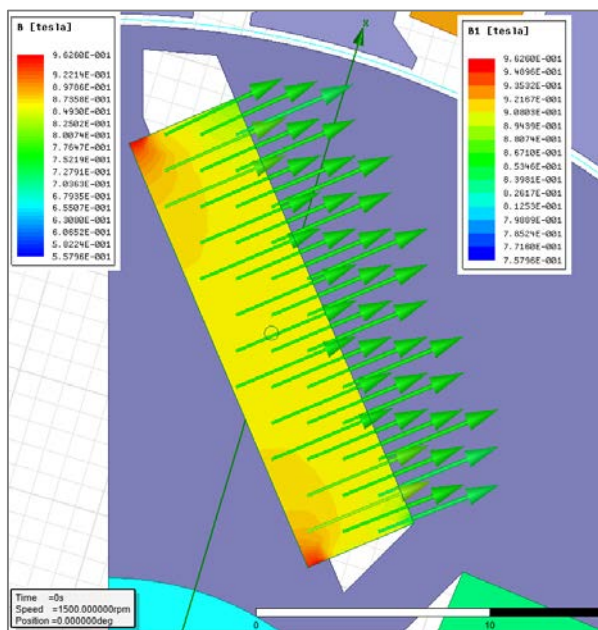


• 生成回复线

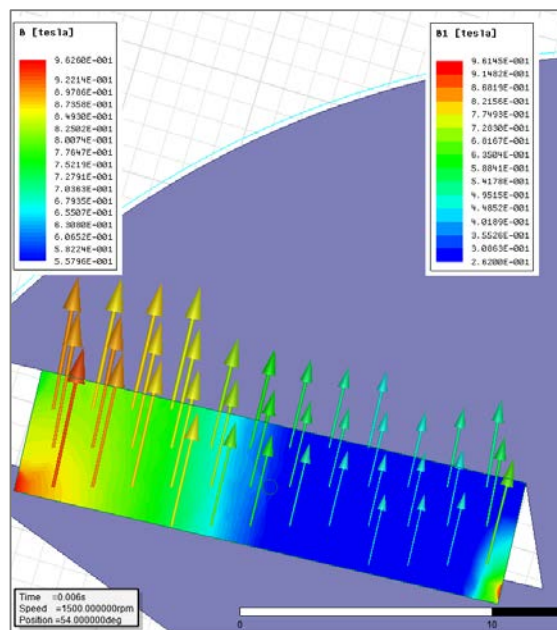
- Maxwell2D → Results → Rectangular Curve
- 生成回复线
 - ✓ Category : Expression Cache
 - ✓ Y : ExprCache(Bt1)
 - ✓ X : ExprCache(Ht1)
 - 点击X右侧 ... 图标
 - Category : Expression Cache
 - X: ExprCache(Ht1)
- 点击 New Report



- 磁密云图



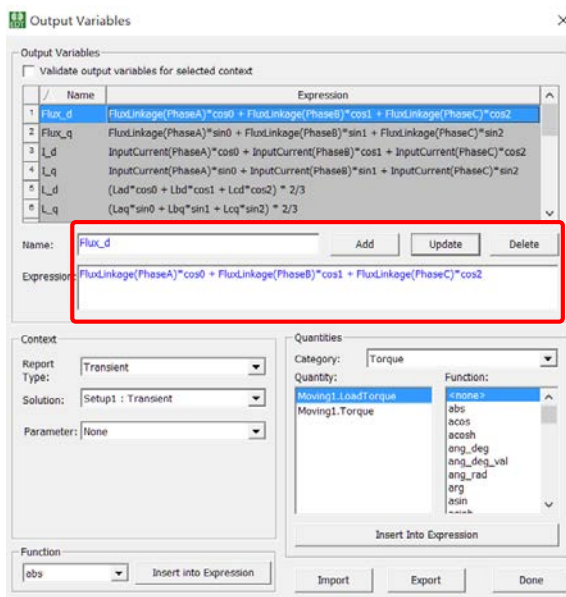
退磁前



退磁后

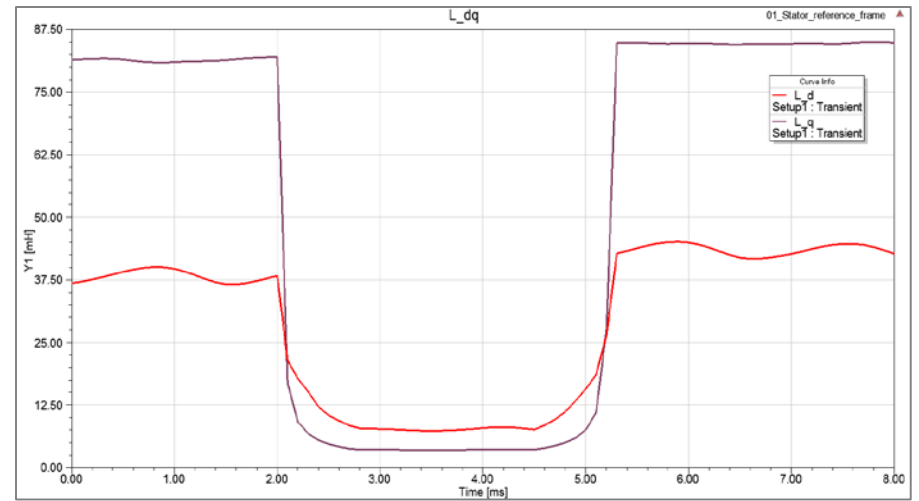
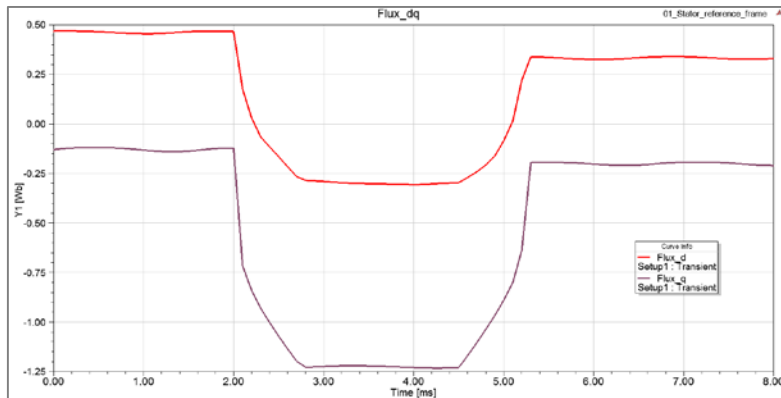
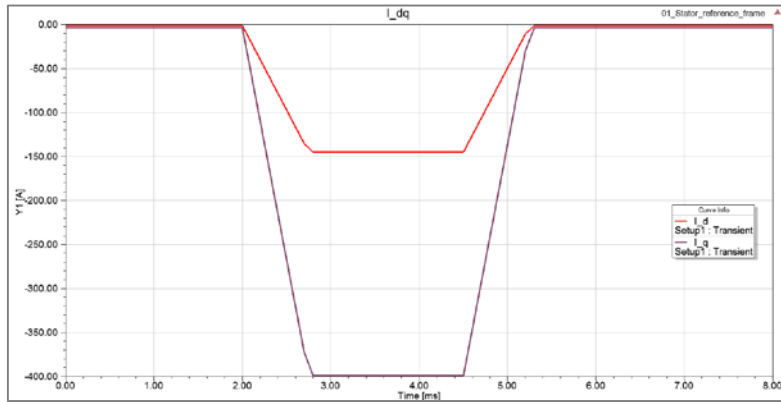
• 定义输出变量 (Output Variables)

- Maxwell可以直接定义dq坐标变换
 - ✓ Maxwell2D 右键 → Output Variables
 - ✓ 在输出变量窗口，按照要求定义输入公式，点Add添加到堆栈中



	Name	Expression
1	Flux_d	FluxLinkage(PhaseA)*cos0 + FluxLinkage(PhaseB)*cos1 + FluxLinkage(PhaseC)*cos2
2	Flux_q	FluxLinkage(PhaseA)*sin0 + FluxLinkage(PhaseB)*sin1 + FluxLinkage(PhaseC)*sin2
3	I_d	InputCurrent(PhaseA)*cos0 + InputCurrent(PhaseB)*cos1 + InputCurrent(PhaseC)*cos2
4	I_q	InputCurrent(PhaseA)*sin0 + InputCurrent(PhaseB)*sin1 + InputCurrent(PhaseC)*sin2
5	L_d	(Lad*cos0 + Lbd*cos1 + Lcd*cos2) * 2/3
6	L_q	(Laq*sin0 + Lbq*sin1 + Lcq*sin2) * 2/3
7	Lad	L(PhaseA,PhaseA)*cos0 + L(PhaseA,PhaseB)*cos1 + L(PhaseA,PhaseC)*cos2
8	Laq	L(PhaseA,PhaseA)*sin0 + L(PhaseA,PhaseB)*sin1 + L(PhaseA,PhaseC)*sin2
9	Lbd	L(PhaseB,PhaseA)*cos0 + L(PhaseB,PhaseB)*cos1 + L(PhaseB,PhaseC)*cos2
10	Lbq	L(PhaseB,PhaseA)*sin0 + L(PhaseB,PhaseB)*sin1 + L(PhaseB,PhaseC)*sin2
11	Lcd	L(PhaseC,PhaseA)*cos0 + L(PhaseC,PhaseB)*cos1 + L(PhaseC,PhaseC)*cos2
12	Lcq	L(PhaseC,PhaseA)*sin0 + L(PhaseC,PhaseB)*sin1 + L(PhaseC,PhaseC)*sin2
13	cos0	cos(pos)
14	cos1	cos(pos-2*PI/3)
15	cos2	cos(pos-4*PI/3)
16	pos	Moving1.Position * 2 + PI
17	sin0	sin(pos)
18	sin1	sin(pos-2*PI/3)
19	sin2	sin(pos-4*PI/3)

其他结果



永磁电机电流退磁仿真

反电势对比仿真

永磁电机退磁



- **目的**

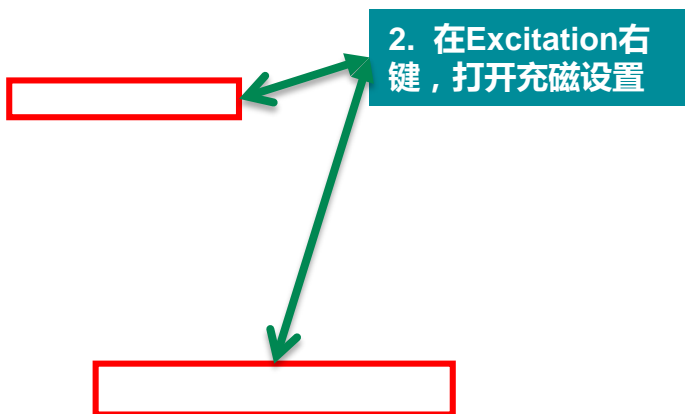
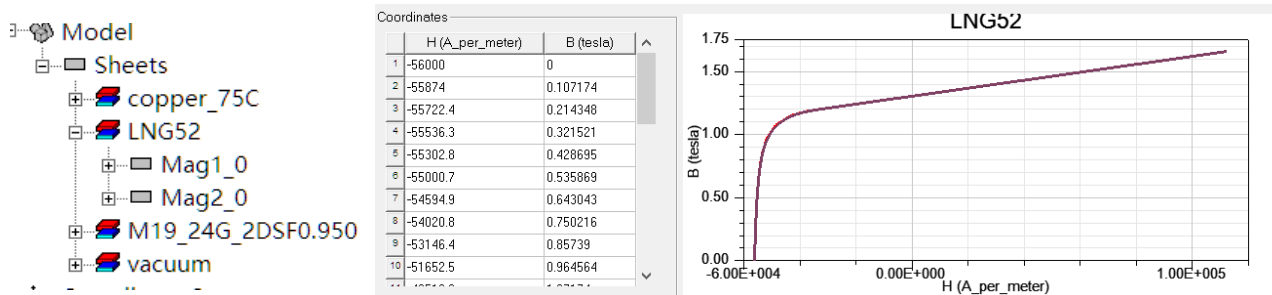
- 在前面模型的基础上，对比退磁现象对反电势的影响

- **主要步骤**

- 建立源模型，计算退磁工作点
- 建立退磁模型，复制源模型的工作点，并计算反电势
- 正常计算反电势
- 结果对比

第一步：在源模型中计算退磁点

1. 设置磁钢材料。如前所述，磁钢材料为第二象限的非线性曲线。如本例中采用了LNG52

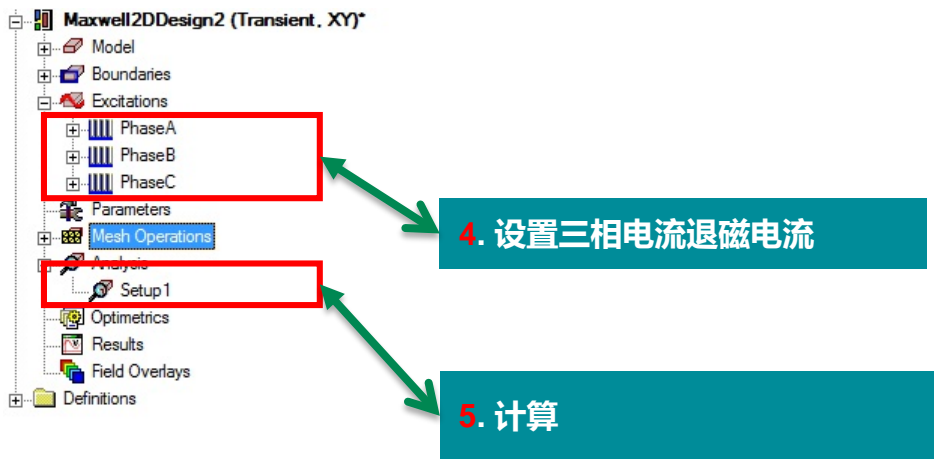


The screenshot shows the 'Set Demagnetization/Magnetization Computations' dialog box. The 'Compute demagnetized operating points' radio button is selected and highlighted with a red box. Below it is a table for magnetization computations.

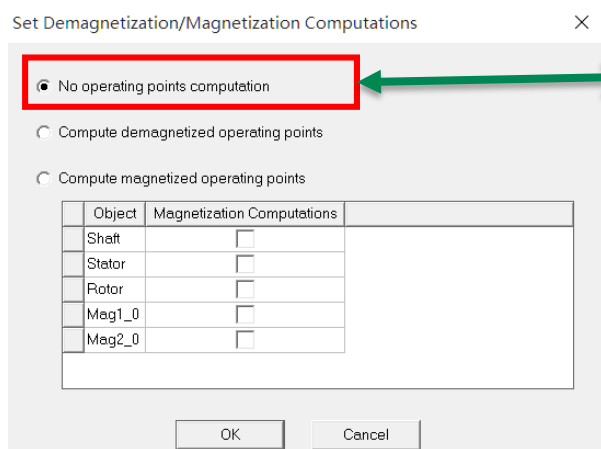
Object	Magnetization Computations
Shaft	<input type="checkbox"/>
Stator	<input type="checkbox"/>
Rotor	<input type="checkbox"/>

3. 激活退磁仿真

第一步：在源模型中计算退磁点



第二步：在新模型中计算电磁性能

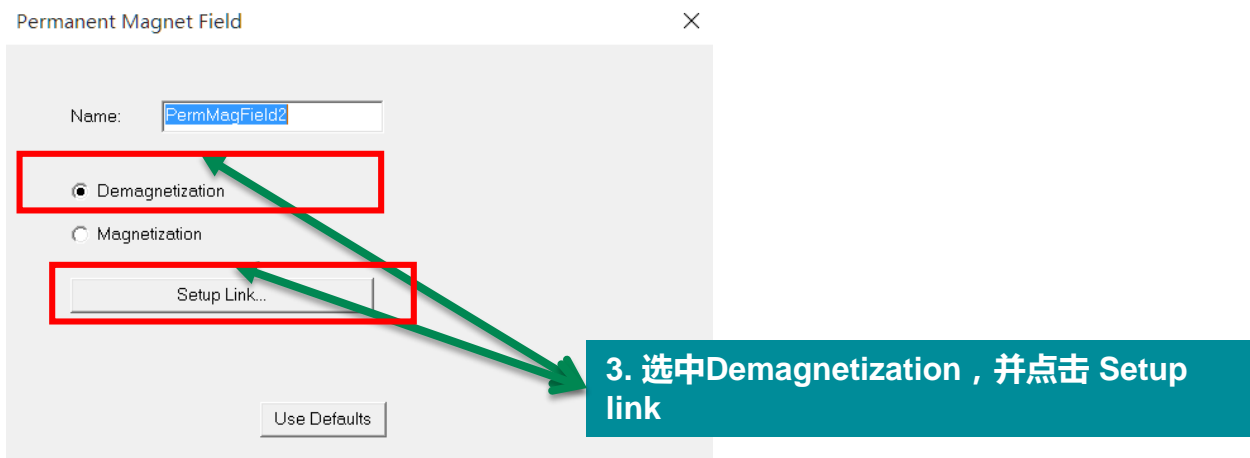


1. 按照上一页的方法，激活设置窗口，并选中该项

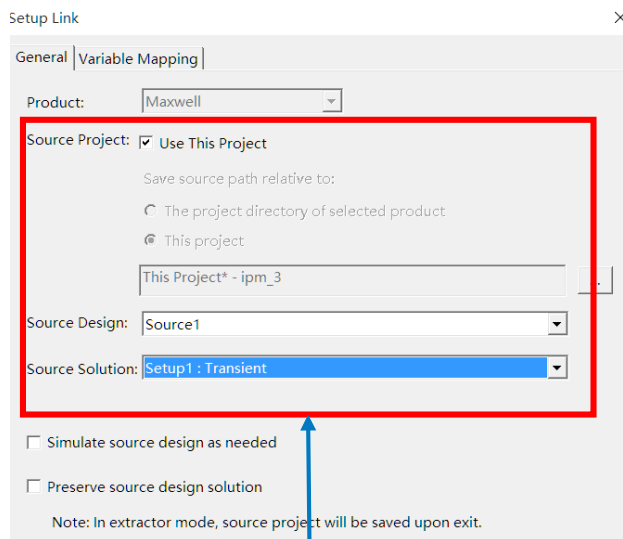


2. 右键，添加PM激励；激活磁场链接

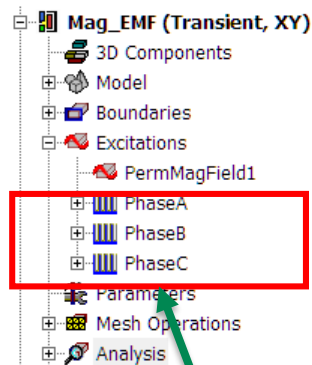
第二步：在新模型中计算电磁性能



第二步：在新模型中计算电磁性能



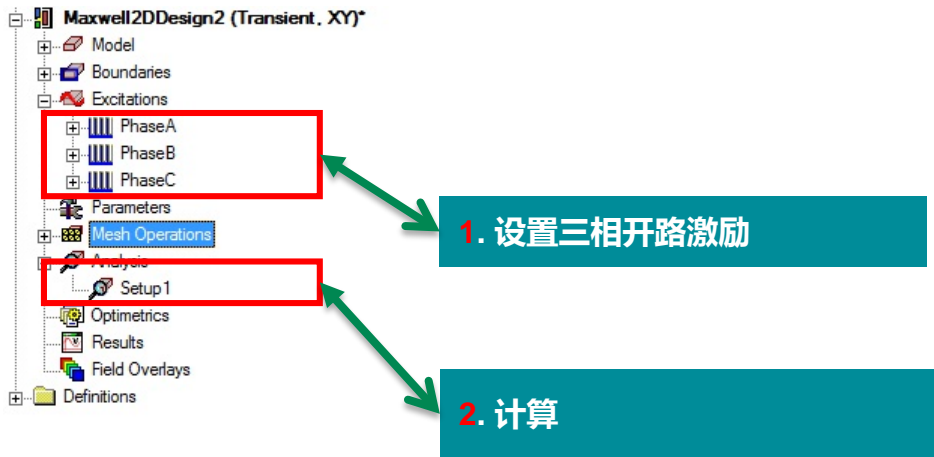
4. 选择计算退磁工况的design



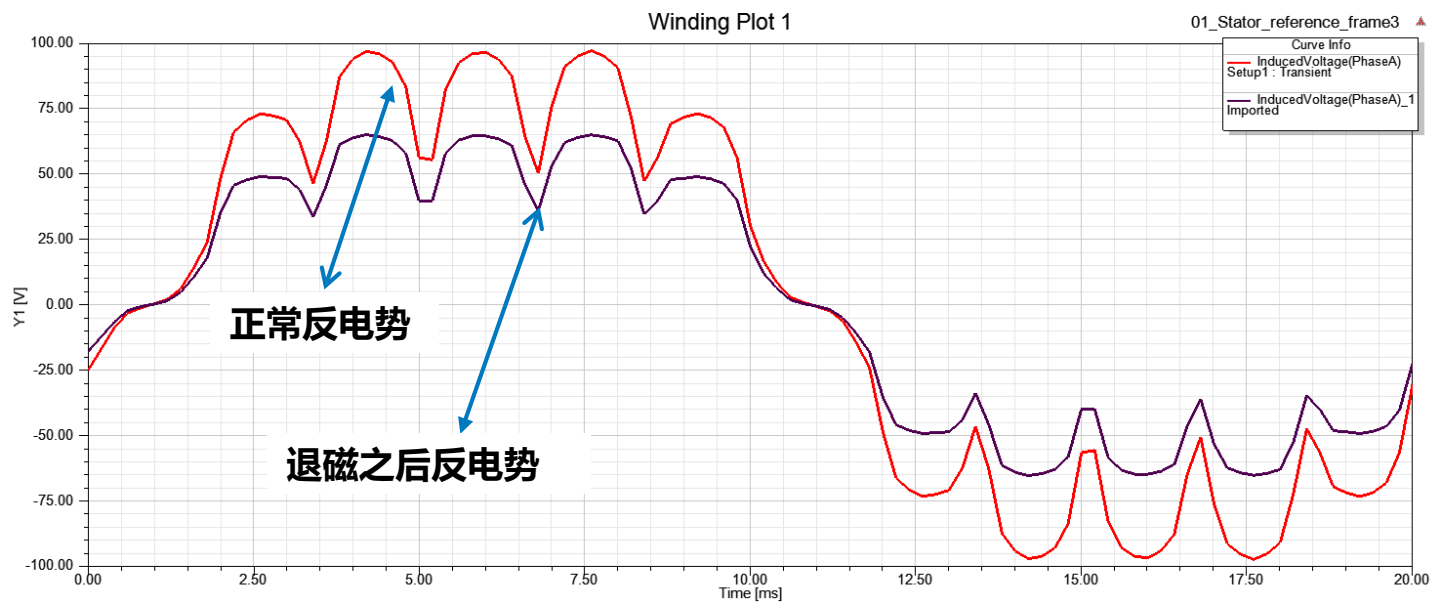
5. 设置三相开路（电流源，0A）

6. 计算

第三步：正常计算空载反电势



第四步：比较



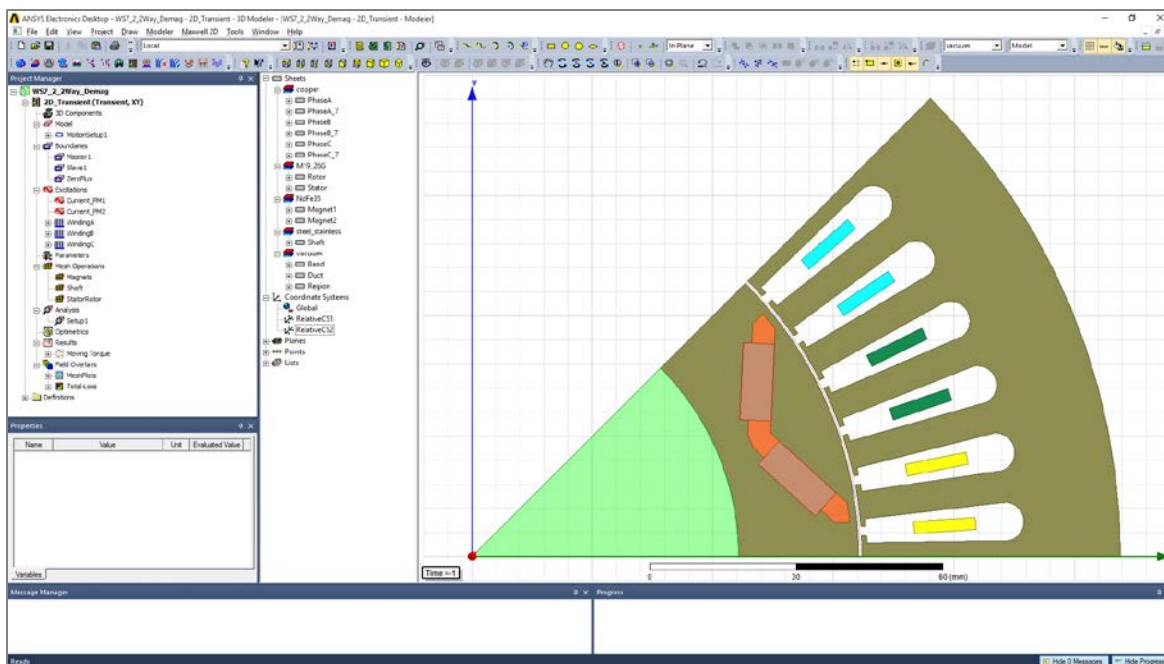
永磁电机温升退磁仿真

无电流退磁

温升退磁仿真

- **模型**

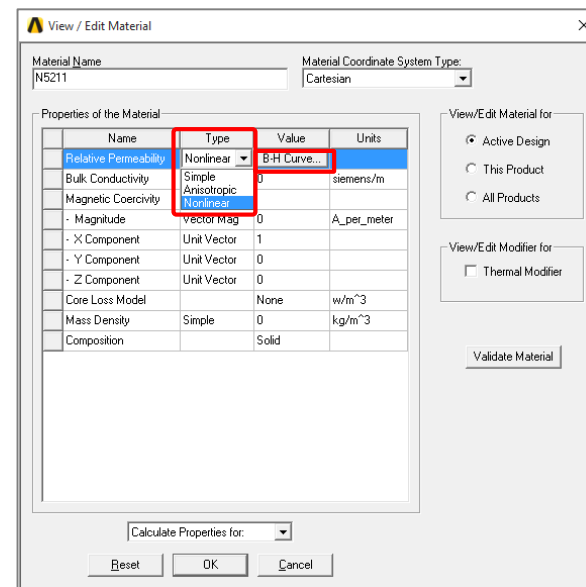
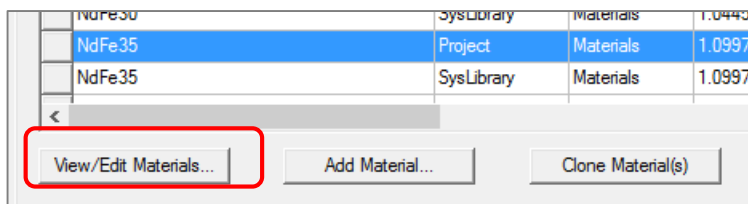
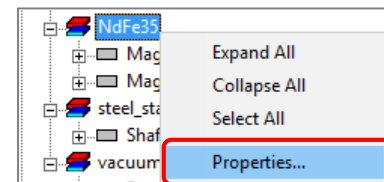
- 采用前面的退磁模型
- 修改材料属性



永磁材料设置

• 永磁体非线性BH曲线

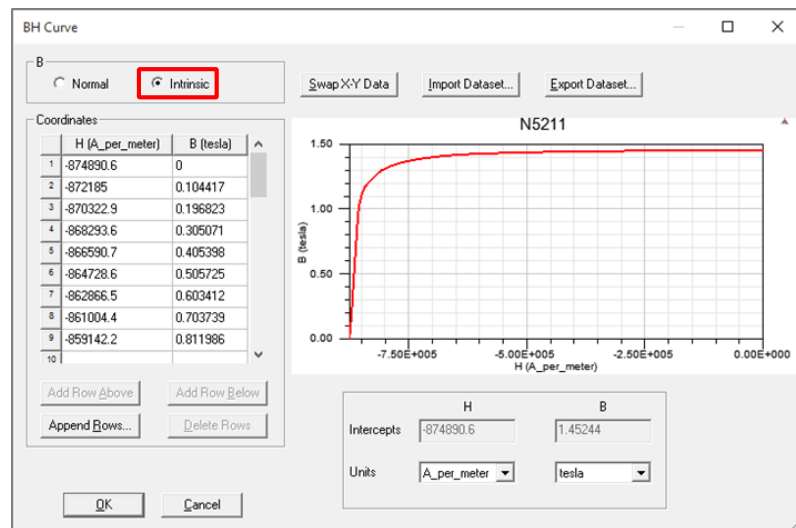
- 本例永磁体材料为“N5211”，材料为非线性，并延伸至第三象限。练习时也可选用其他材料。
- 在材料窗口选择为“N5211”，RMB → Properties
- 在材料设置窗口，点击 View/Edit Material
- 在材料编辑窗口，确保相对磁导率为 Nonlinear
- 点击B-H Curve...



修改永磁体材料属性

• 导入内禀BH曲线

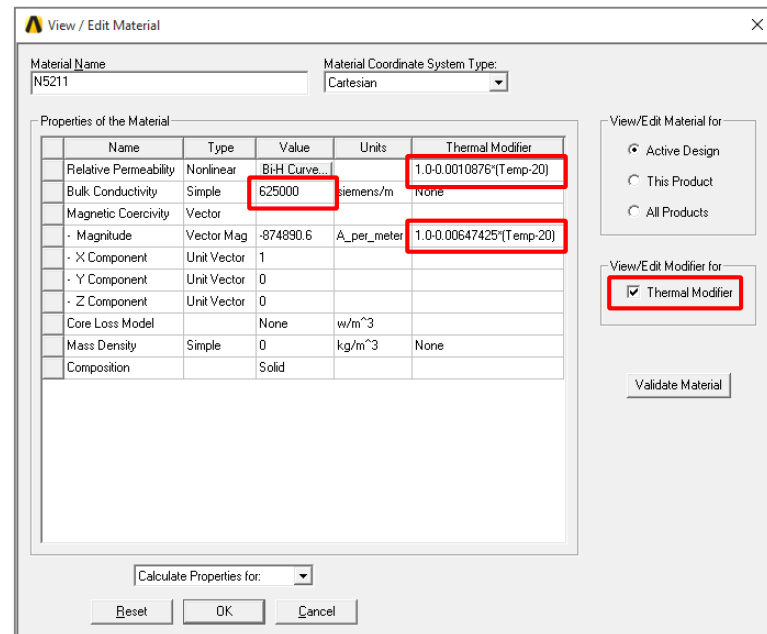
- Type : Intrinsic
- 点击 Import Dataset...,导入BH曲线
- 查找N5211_BH.tab, 选择Open.
 - ✓ 或者直接在表格中输入BH曲线
- 点击 OK 退出



修改永磁体材料属性

• 激活永磁体温升特性

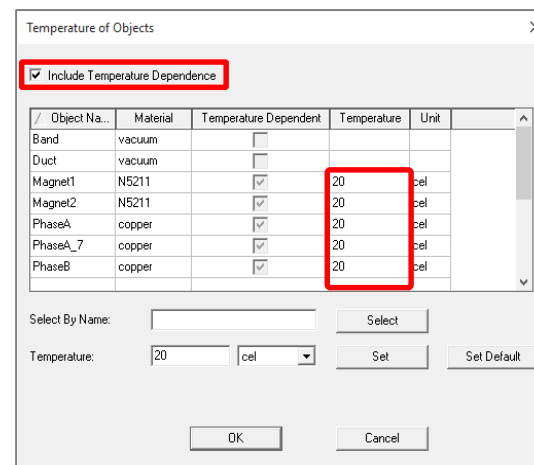
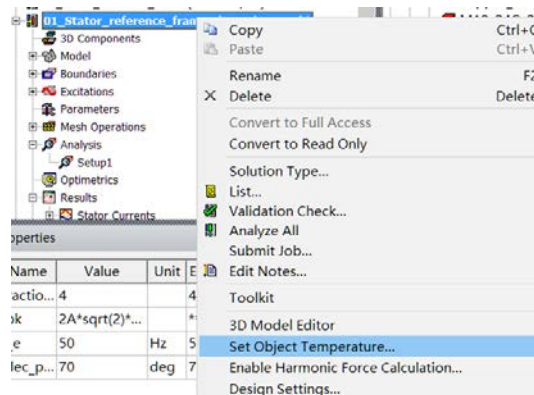
- 勾选 Thermal Modifier
- 点击 Relative Permeability 右侧的 Thermal Modifier (默认为 None)
 - ✓ 从下拉菜单选择 Edit
 - ✓ 在弹出窗口输入 $1.0-0.0010876*(Temp-20)$
- 点击 Magnitude 右侧的 Thermal Modifier (默认为 None)
 - ✓ 从下拉菜单选择 Edit
 - ✓ 在弹出窗口输入 $1.0-0.00647425*(Temp-20)$



激活温度参数

• 设置永磁体初始温度

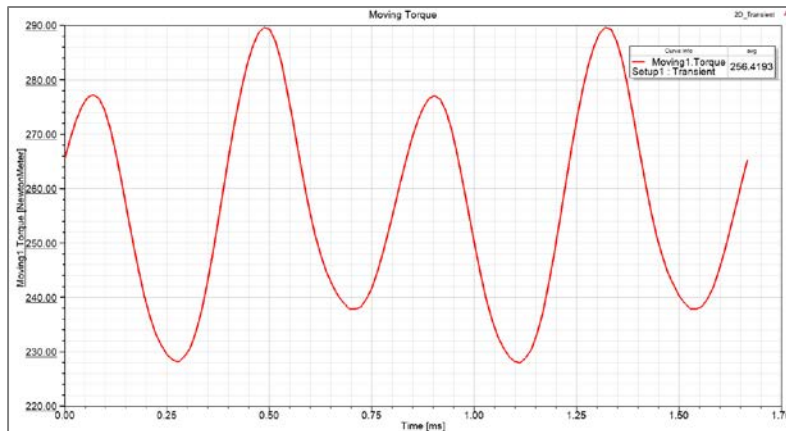
- 菜单栏Maxwell 2D 右键 → Set Object Temperature...
- 在Temperature of Object窗口，勾选 Include Temperature Dependence
- 设置所有永磁体的温度，例如20 °C。推荐设置成变量
- 点击 OK



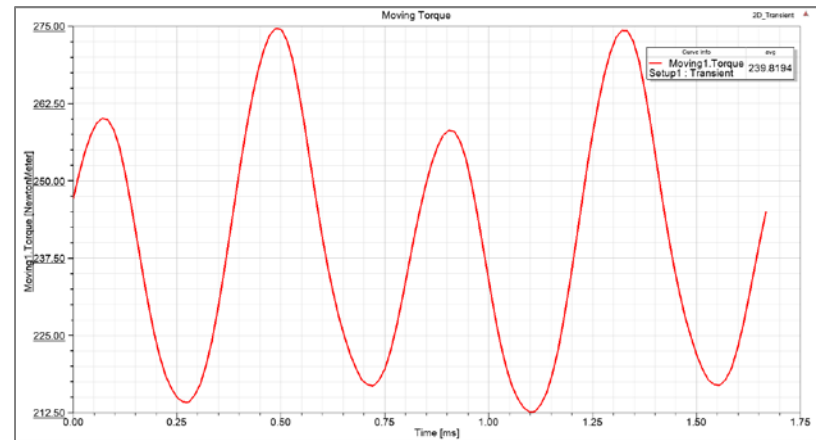
求解

- 求解模型

- RMB on Setup1 → Analyze



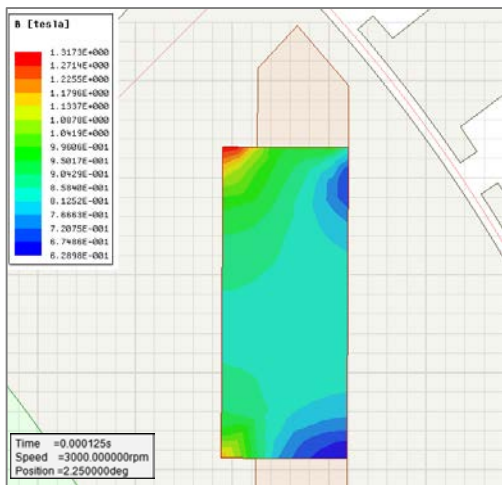
20 °C



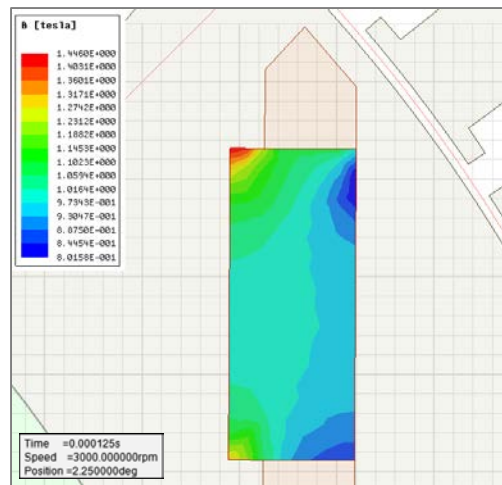
100 °C

• 显示云图

- 建模窗口选择永磁体RMB → Fields → B → Mag_B



100 °C



20 °C

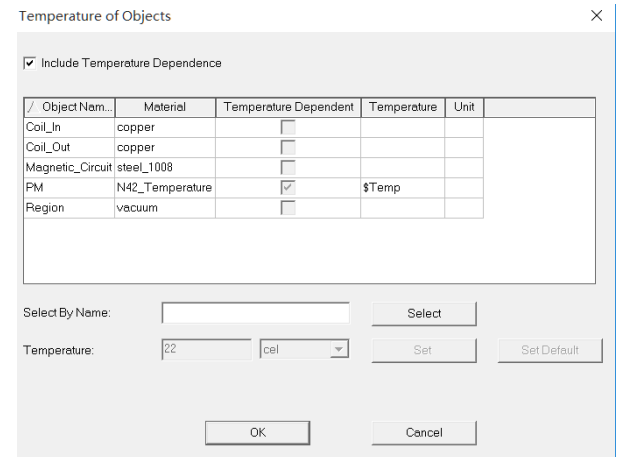
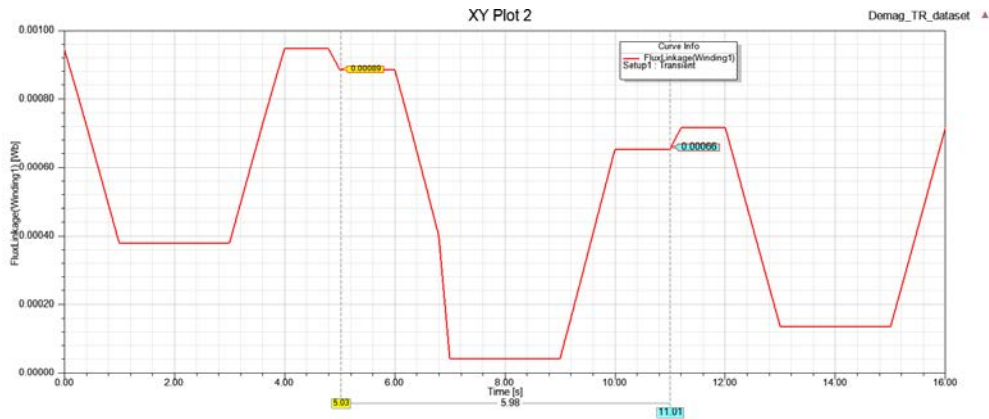
永磁电机温升退磁仿真

结合电流退磁

考虑温度的不可退磁

• 温度设置

- Set Object Temperature...
- 温度设置为全局变量
 - ✓ $\$Temp = \text{if}(\text{Time} < 5\text{s}, 20, \text{if}(\text{Time} < 11\text{s}, 120, 20))$



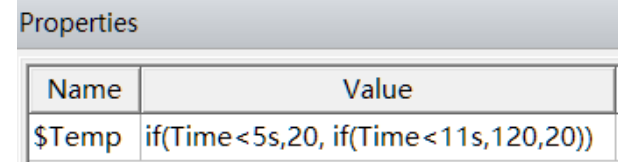
Temperature of Objects

Include Temperature Dependence

Object Name	Material	Temperature Dependent	Temperature	Unit
Coil_In	copper	<input type="checkbox"/>		
Coil_Out	copper	<input type="checkbox"/>		
Magnetic_Circuit	steel_1008	<input type="checkbox"/>		
PM	N42_Temperature	<input checked="" type="checkbox"/>	\$Temp	
Region	vacuum	<input type="checkbox"/>		

Select By Name:

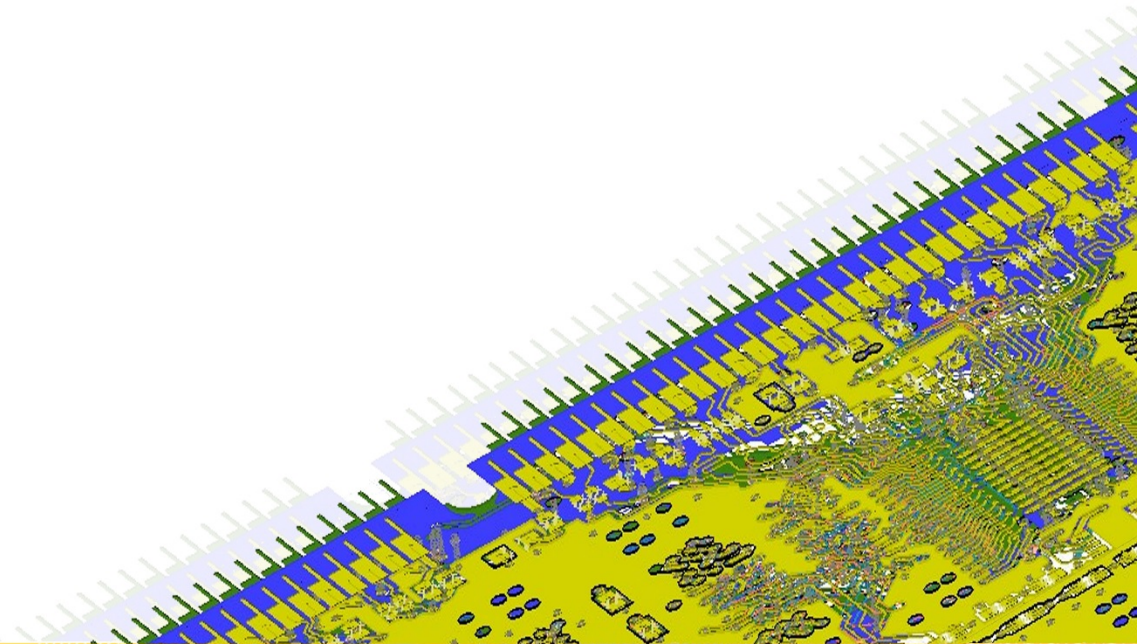
Temperature:



Name	Value
\$Temp	if(Time < 5s, 20, if(Time < 11s, 120, 20))



永磁电机充磁仿真教程



• 仿真目的

- 小型永磁电机（如空调压缩机）在装配时未预先充磁，装配完成后，利用定子线圈对永磁体充磁
- 传统方式下，永磁体性能未知，无法仿真
- 采用Maxwell充磁仿真方法，复制永磁体充磁性能，并用于电磁性能计算

• 仿真流程

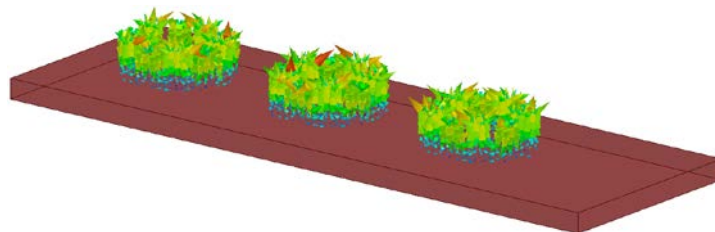
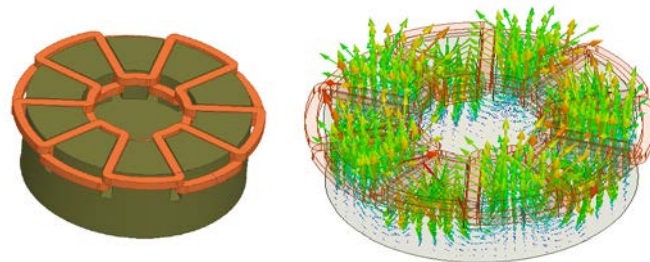
- 计算永磁体的充磁工况
- 计算永磁体在充磁之后的性能

Maxwell 充磁仿真原理



• 永磁体充磁

- 在充磁电流下，永磁体被充磁。
- Maxwell记录最大充磁工作点
- 该工作点可复制到其他模型，计算电机电磁性能



永磁电机充磁仿真

反电势对比

永磁电机充磁仿真



- **目的**

- 通过反电势验证充磁效果

- **主要步骤**

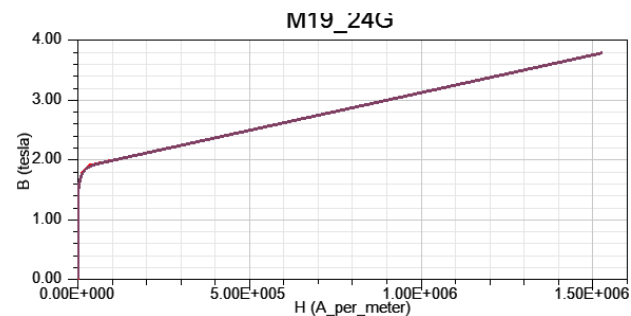
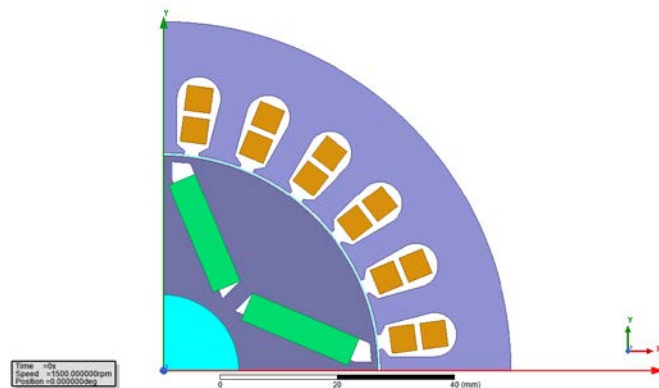
- 建立源模型，计算充磁工作点
- 建立充磁模型，复制源模型的工作点，并计算反电势
- 正常计算反电势
- 结果对比

充磁仿真操作流程

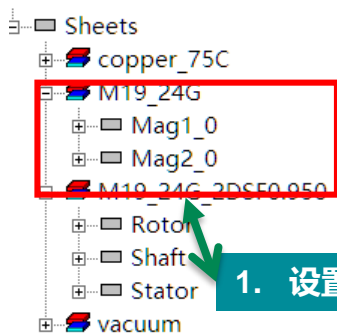
• 要点

- 永磁体未预充磁
- 永磁体材料曲线位于第一象限
- 设置充磁电流
- 永磁体充磁后传递到其他模型中计算电磁性能

• 本例中，永磁体材料与铁心一致



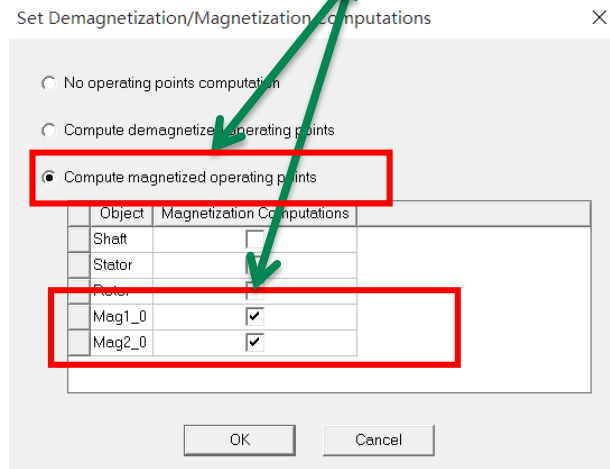
第一步：在源模型中计算充磁点



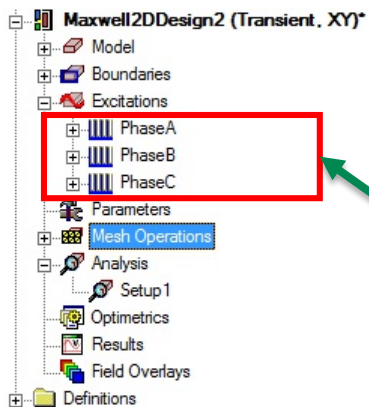
1. 设置磁钢材料

2. 在Excitation右键
键，打开充磁设置

3. 激活充磁仿真，并勾选
所有磁钢



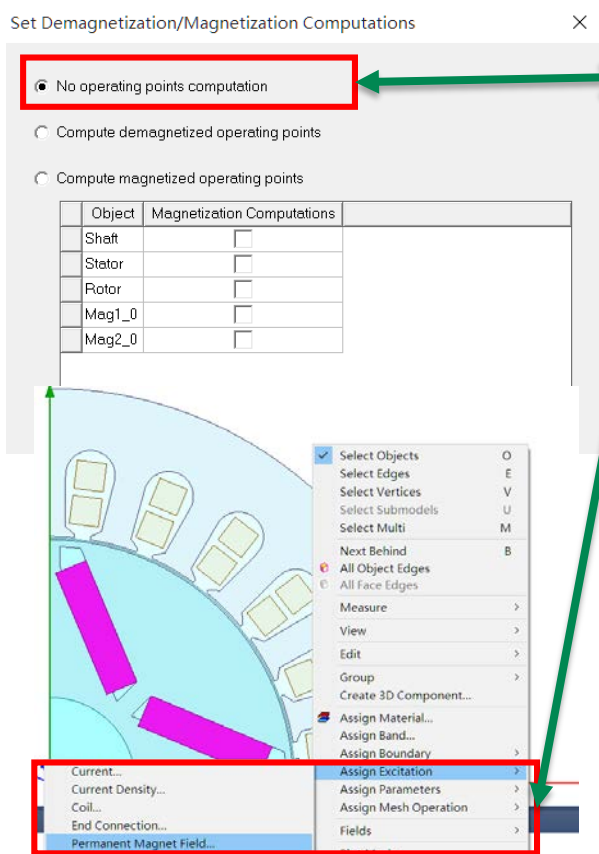
第一步：在源模型中计算充磁点



4. 设置三相充磁电流

5. 计算

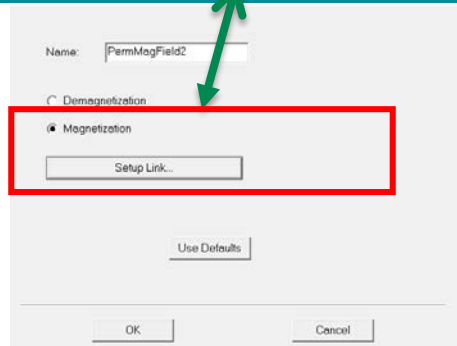
第二步：在新模型中计算电磁性能



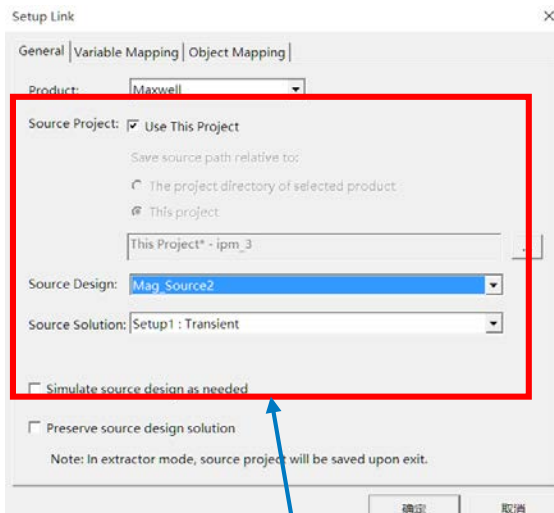
1. 按照上一页的方法，激活设置窗口，并选中该项

2. 选中所有磁钢
3. 在Excitation右键（或者在模型窗口右键，Assign Excitation），激活磁场链接

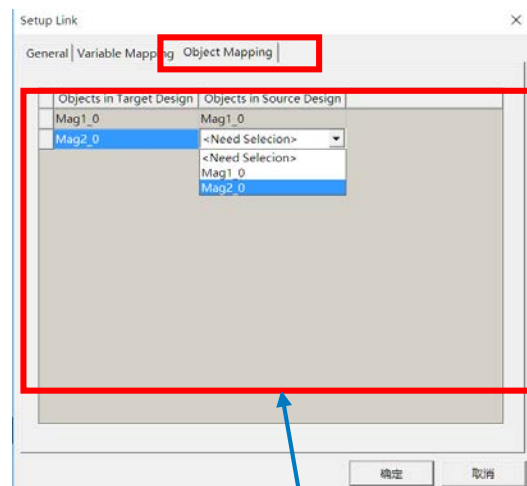
4. 选中Magnetization，并点击 Setup link



第二步：在新模型中计算电磁性能

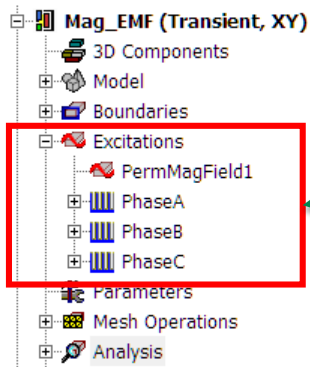


5. 选择计算充磁工况的design



6. 在Object Mapping窗口，指定磁钢与源模型一一对应

第二步：在新模型中计算电磁性能



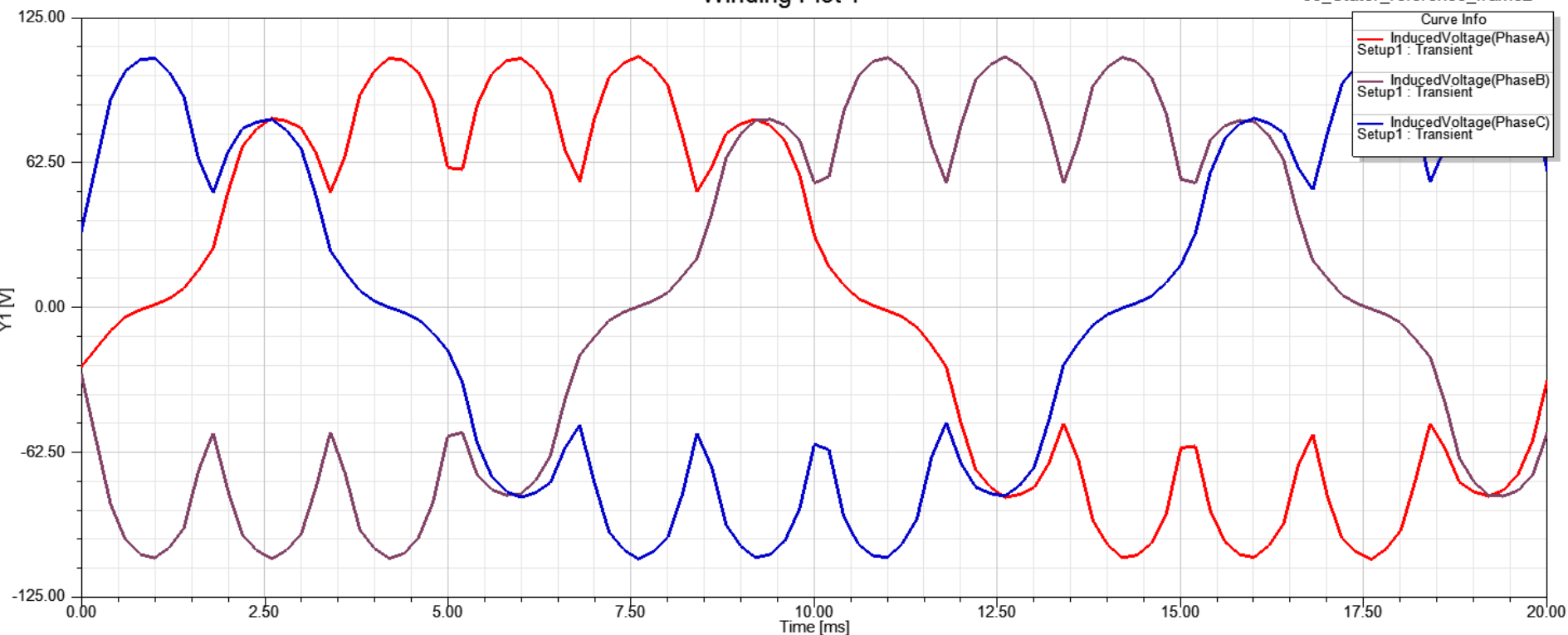
8. 按照需要设置三相电流。
本例中设置0A

9. 计算

第三步：反电势

Winding Plot 1

03_Stator_reference_frame2 ▲





ANSYS

ONVERGENCE

CONFERENCES

2018年7月11-13日 上海

结束



ANSYS

感谢聆听！

