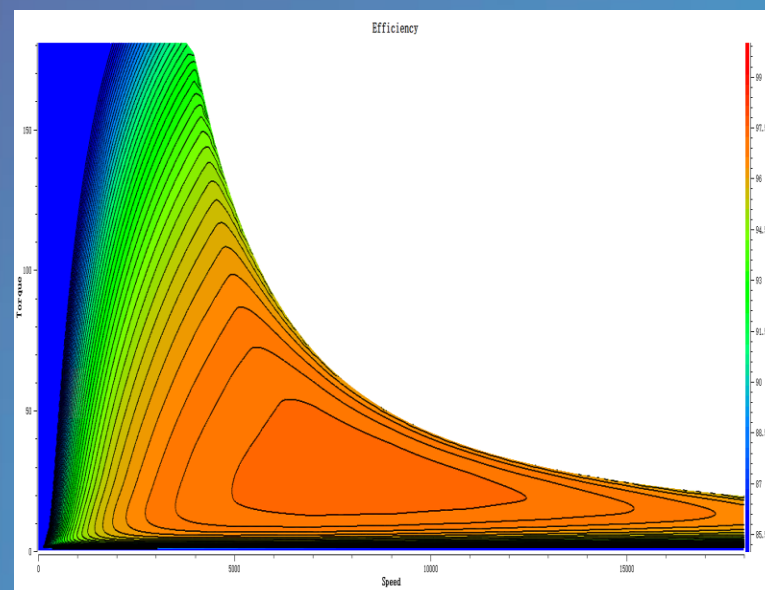




JMAG-Designer效率图

IDAJ中国
电磁小组

目录

1. 丰田普锐斯电机
2. 效率图操作流程
3. 速度优先效率图
4. 分析结果
5. 精度优先效率图
6. 分析结果
7. V形斜极效率图和转矩脉动图分析
8. 小结

1、丰田普锐斯电机

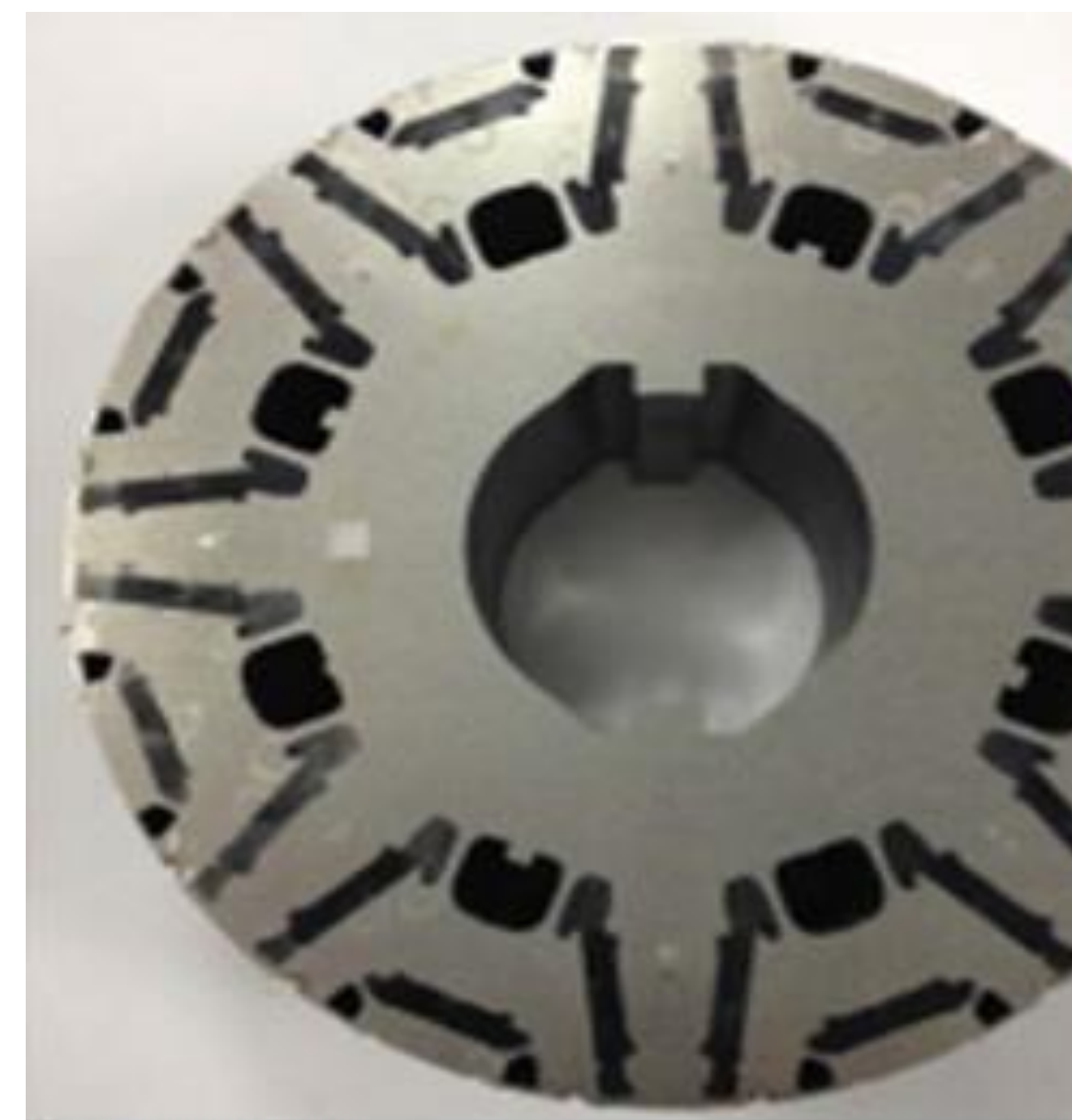
■ 概述

- 丰田普锐斯电机一直以来被称为电机学的一本教科书，从第一代到第四代总共跨越了20多年，它向我们演绎了永磁电机一段非常精彩的进化史。因此我们有必要对它进行详细的研究和分析。
- 本教程首先对丰田普锐斯第四代电机的技术特点进行介绍，接着使用JMAG创建丰田普锐斯第四代电机的效率图，最后分析如果普锐斯电机采用V形斜极后它的效率图和转矩脉动MAP图会如何变化。
- 电机设计最初会看到大量的一般设计方案，直到被缩小到满足要求的设计为止。在此缩小过程中为每个电机设计方案绘制效率图。使用效率图确认可能的驱动区域，并且每个设计方案都带有效率图将是有利的。一旦缩小到预期设计，就可以考虑逆变器的损耗，并创建更高精度的效率图，然后进行评估。
- 创建效率图通常需要相当多的工作，但通过使用JMAG效率图的研究可以实现无缝的调查过程。JMAG V18.0增加了在JMAG-Designer中直接创建效率图的功能，同时可以使用Multi-Slice条件仿真2D模型的V型斜极，创建斜极模型的效率图和转矩脉动MAP图。
- 本教程通过假设Prius 2017模型采用V形斜极为切入口，展示了JMAG简单方便的效率MAP图和转矩脉动MAP图创建流程。

■ 丰田普锐斯电机技术简介



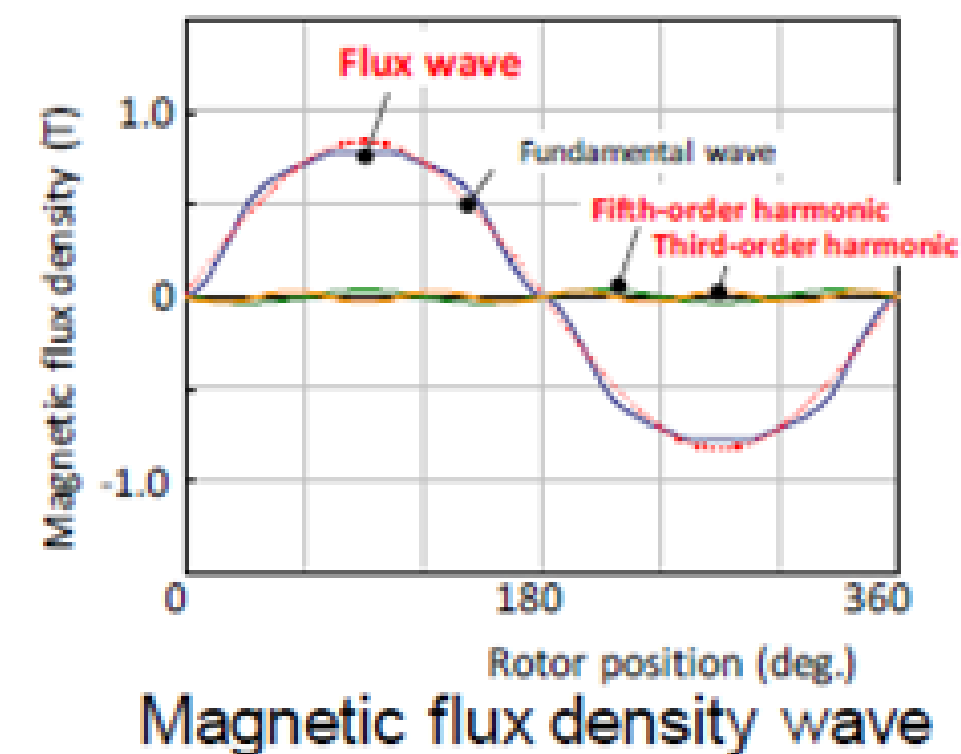
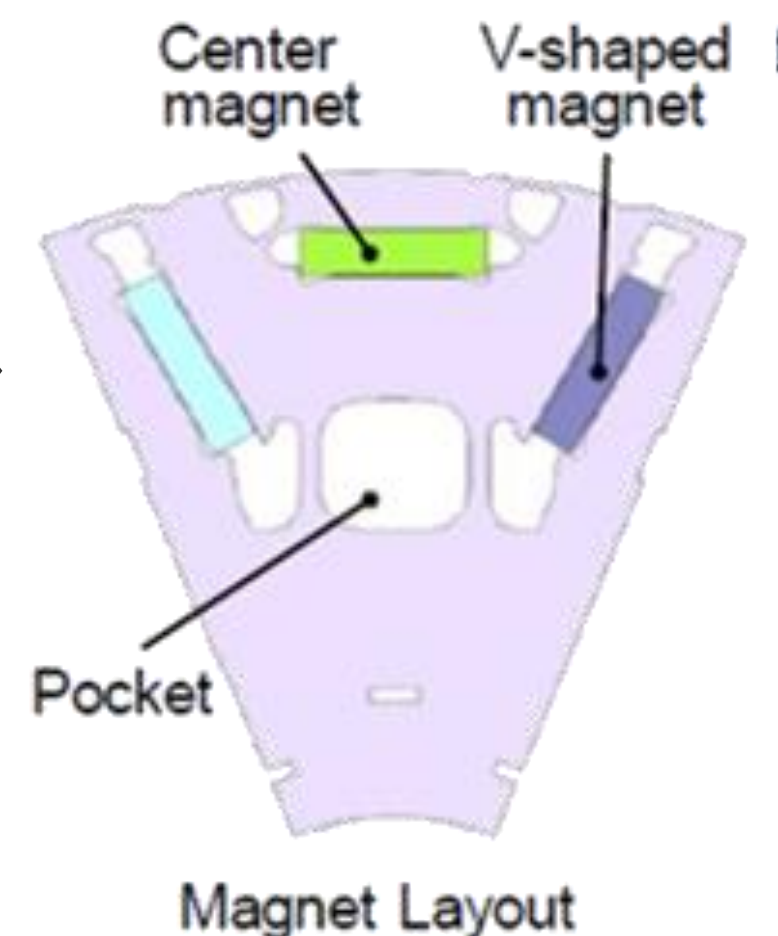
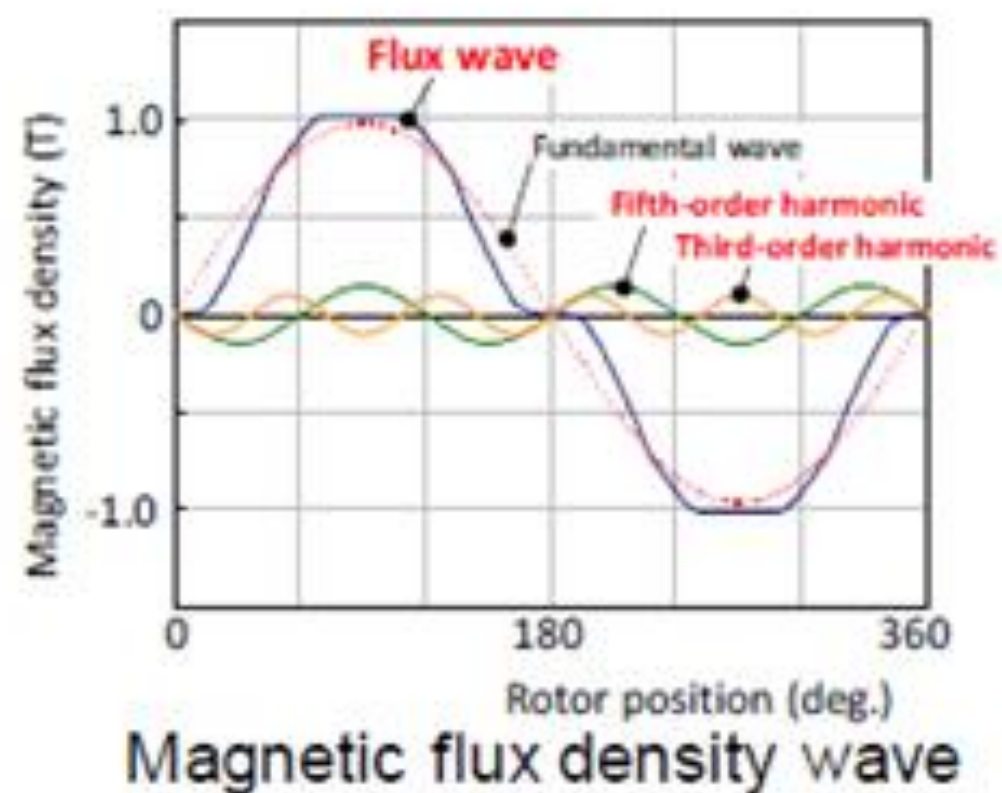
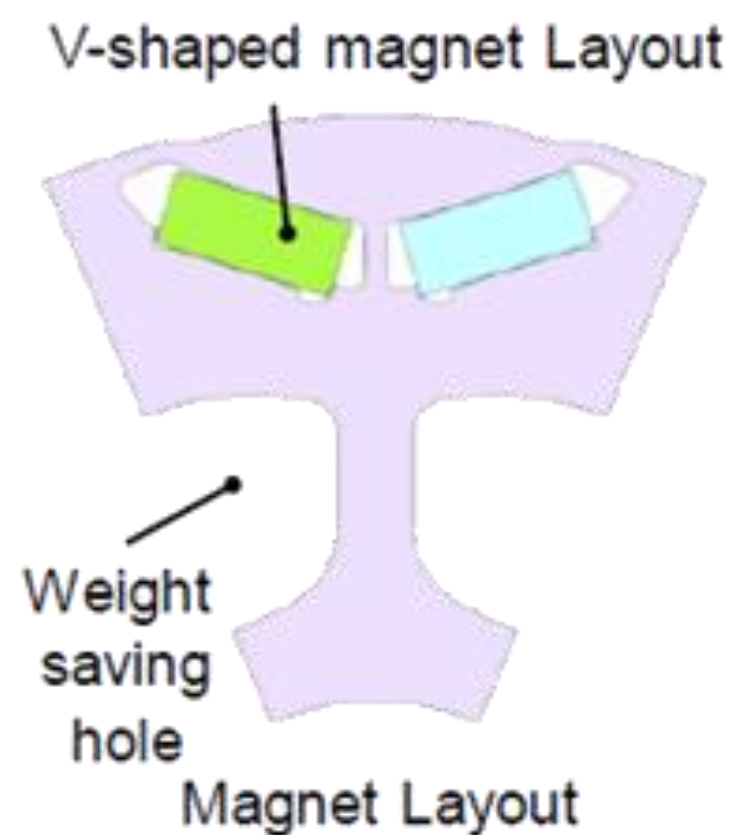
priusIII代（2010年）



priusIV代（2017年）

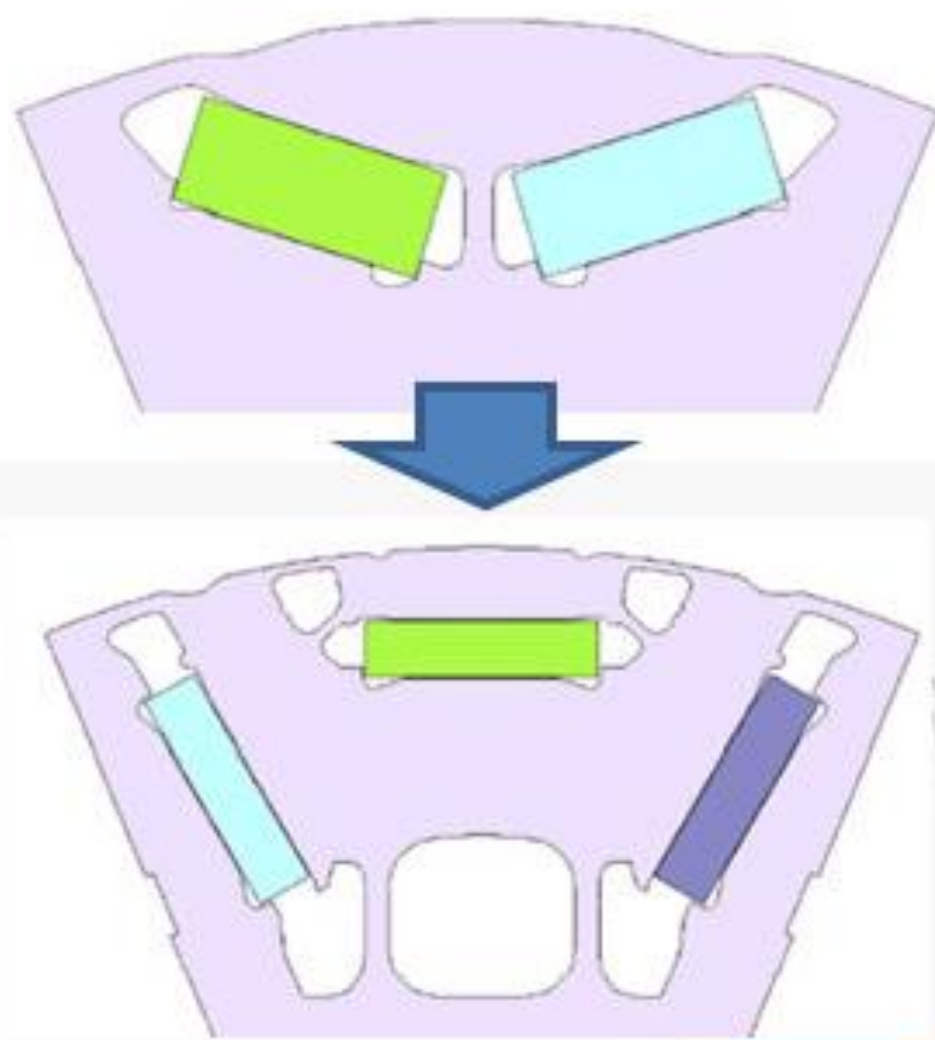
- 从图中可以看出，普锐斯2017采用了双层磁钢结构。
- 双层结构有利于提高磁密的正弦性，从下页的分析中，很容易发现，IV代的气隙磁密3、5次谐波都得到抑制，正弦度极高。

■ 丰田普锐斯电机技术简介



- 双层结构提高正弦性，降低磁铁磁通的高次谐波，降低NVH。
- 高次谐波减小还有利于降低铁损，从而提高效率。

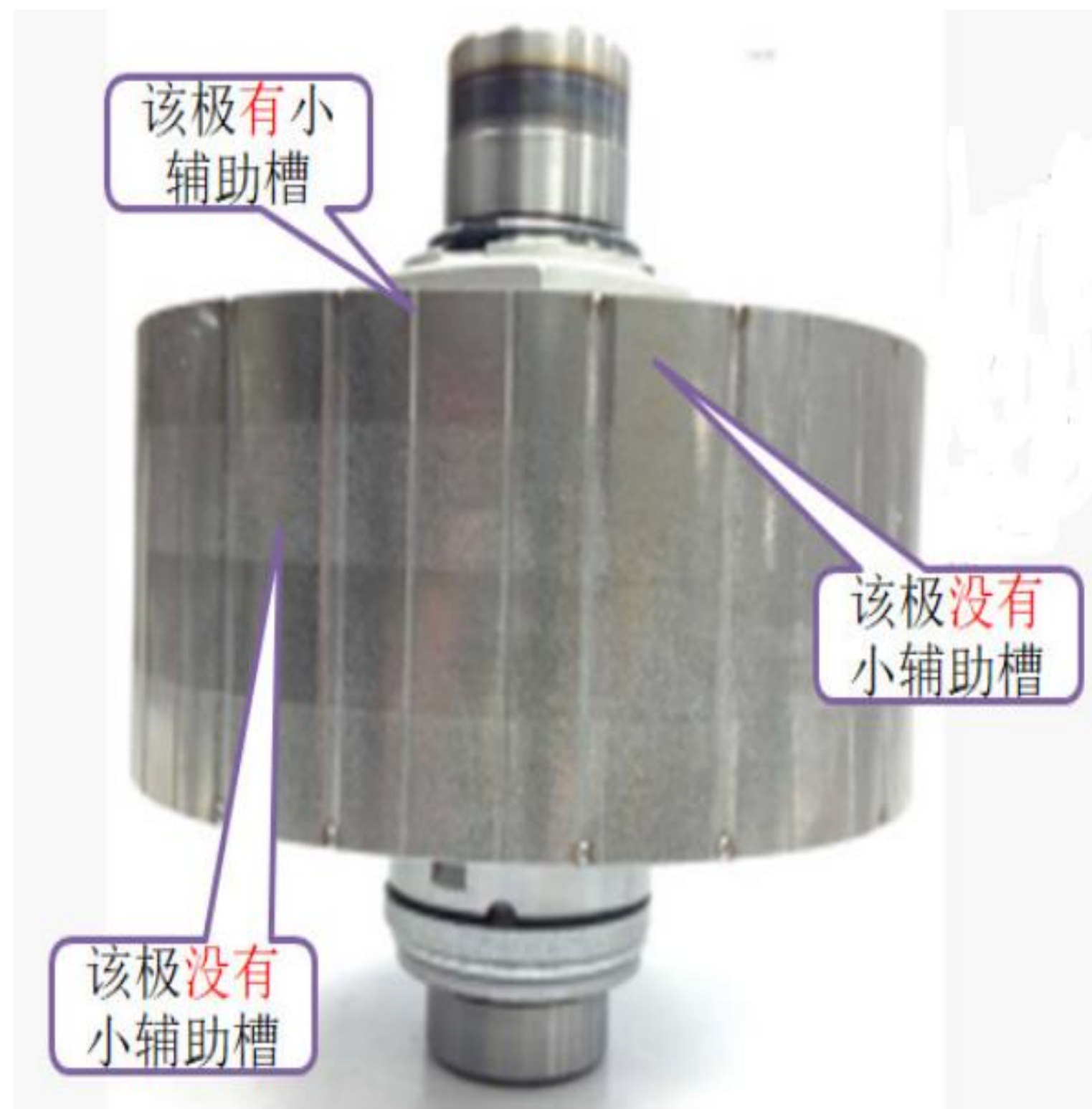
■ 丰田普锐斯电机技术简介



磁钢用量降低15%，
稀土用量降低85%

- 双层比单层d轴磁阻大，磁极结构更利于提高磁阻转矩，实现少稀土化，而q轴磁路未受多大影响，因此凸极比可以提高。

■ 丰田普锐斯电机技术简介



- 错位辅助槽的使用，进一步降低齿槽转矩和转矩脉动。

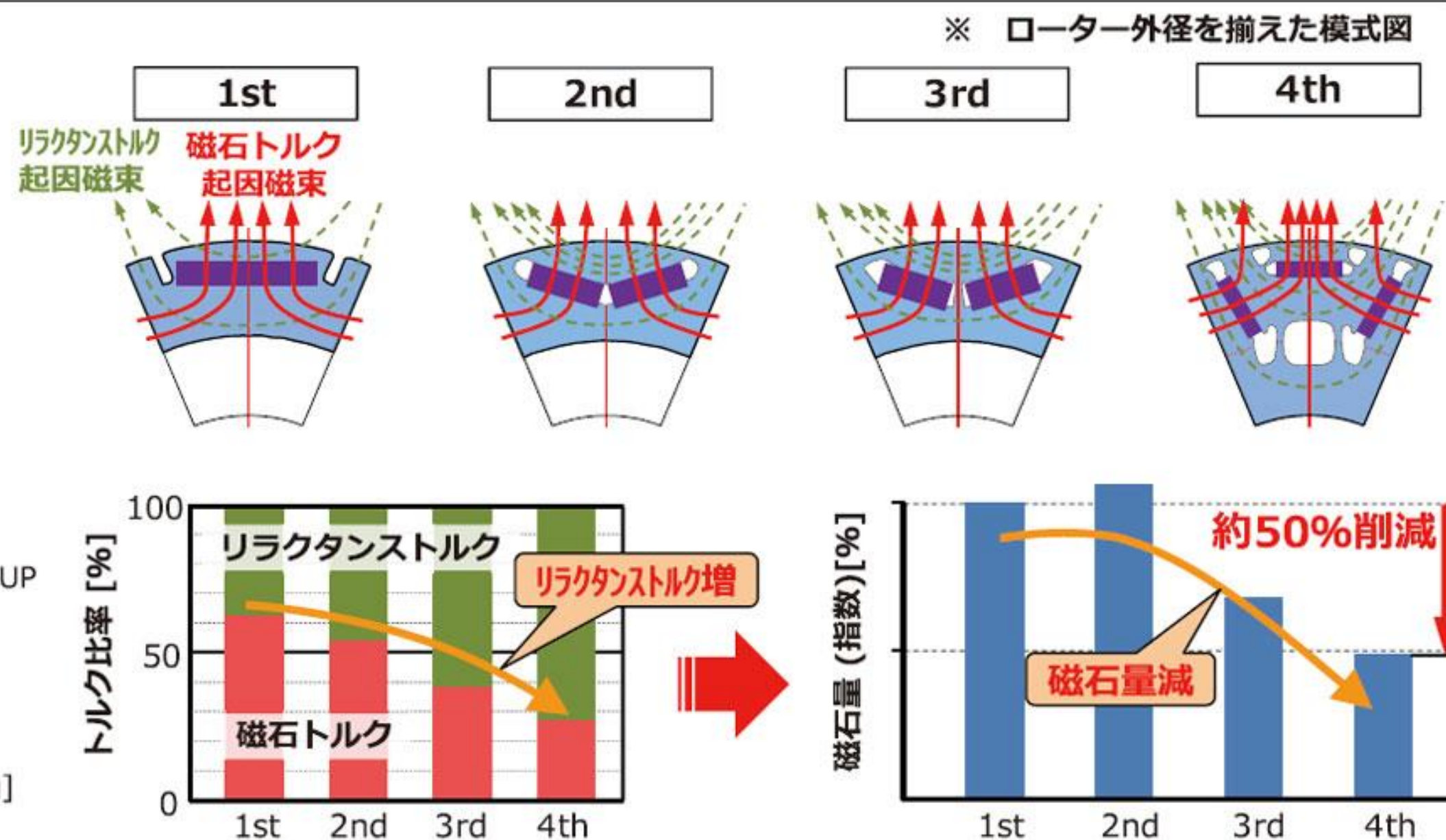
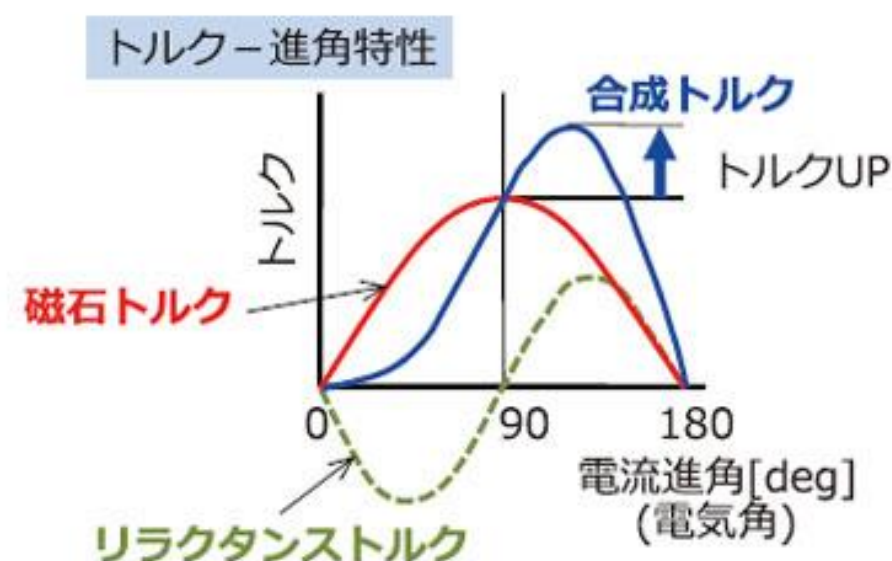
■ 丰田普锐斯电机技术简介

■ 低コスト化

1) 磁石量低減

高額な磁石を削減し、
高トルク発生する技術

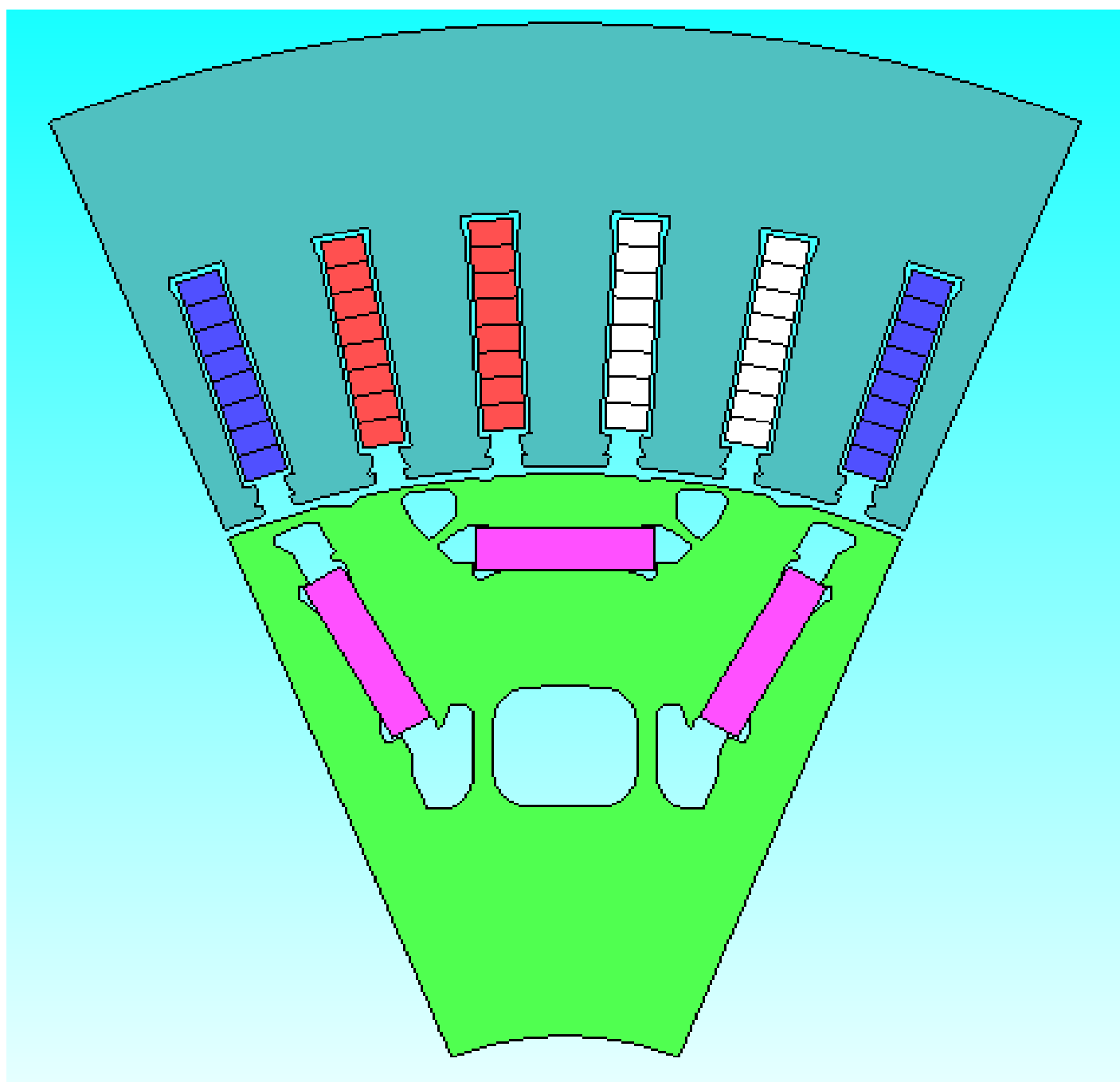
リラクタンストルク比率向上
(ローター磁石配置構造進化)



- 从图中可以发现，丰田通过结构优化不断提高磁阻转矩，减少磁铁的用量，从第一代到第四代，磁铁用量减少了约50%。

2、效率图操作流程

■ 丰田Prius 2017电机模型

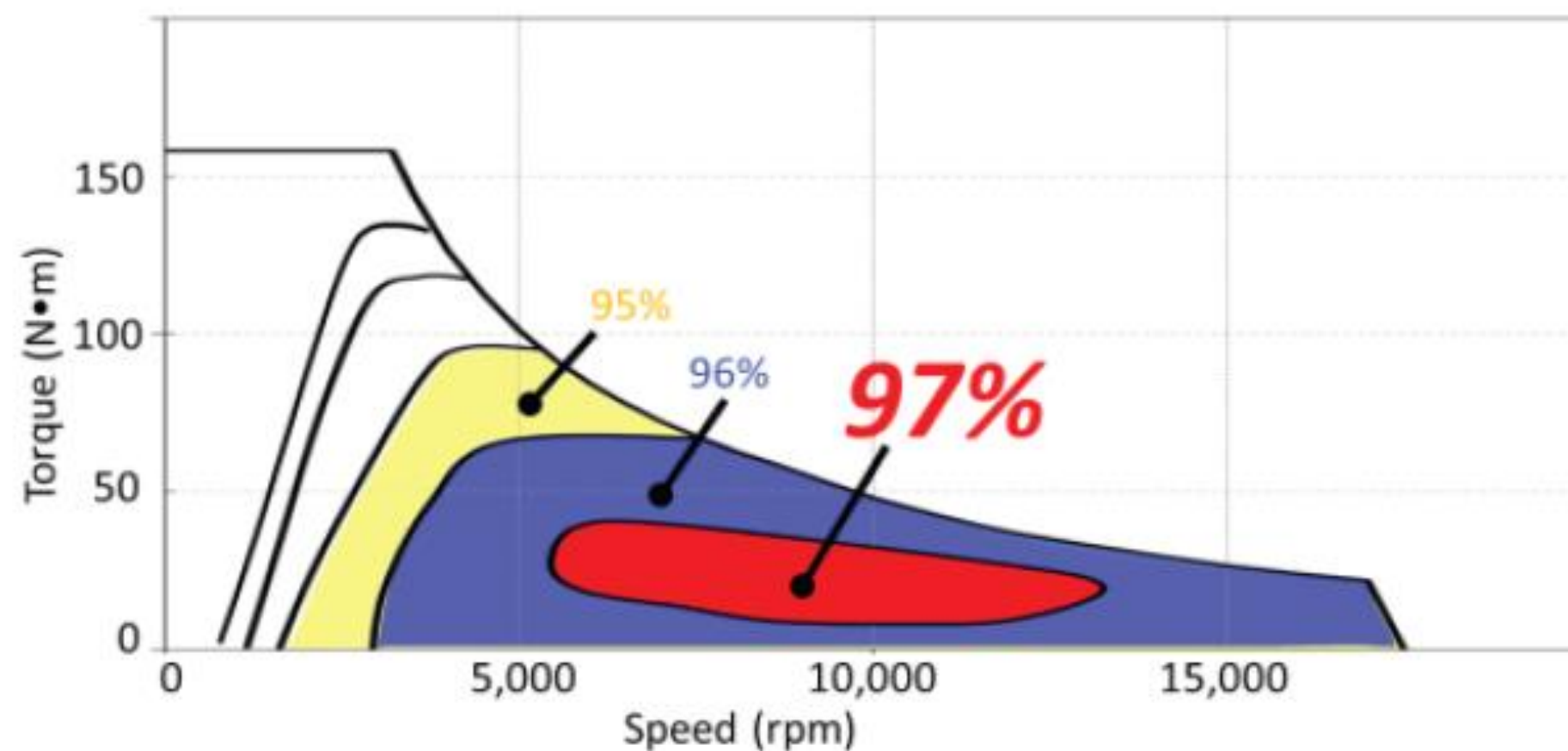


丰田Prius 2017

主要参数/单位	数值
极数/槽数	8/48
定子外径/ mm	215
转子外径/ mm	140.5
气隙长度/ mm	0.7
铁心长度/ mm	61

- 左图为丰田普锐斯第四代电机的JMAG模型。同时表中给出了该电机的基本结构尺寸。

■ 工况点设置



工况	转速	转矩	功率
爬坡点	1000	168	17.6
峰值功率点	3015	168	53.0
高效点	6000	40	25.1
高速点	17000	8	14.2

- 假定丰田普锐斯的4个重要工况点数据如上表所示，主要包括爬坡点、峰值功率点、高效点和高速点，效率MAP设置时包含了这4个重要的工况。

■ 速度优先效率图操作流程

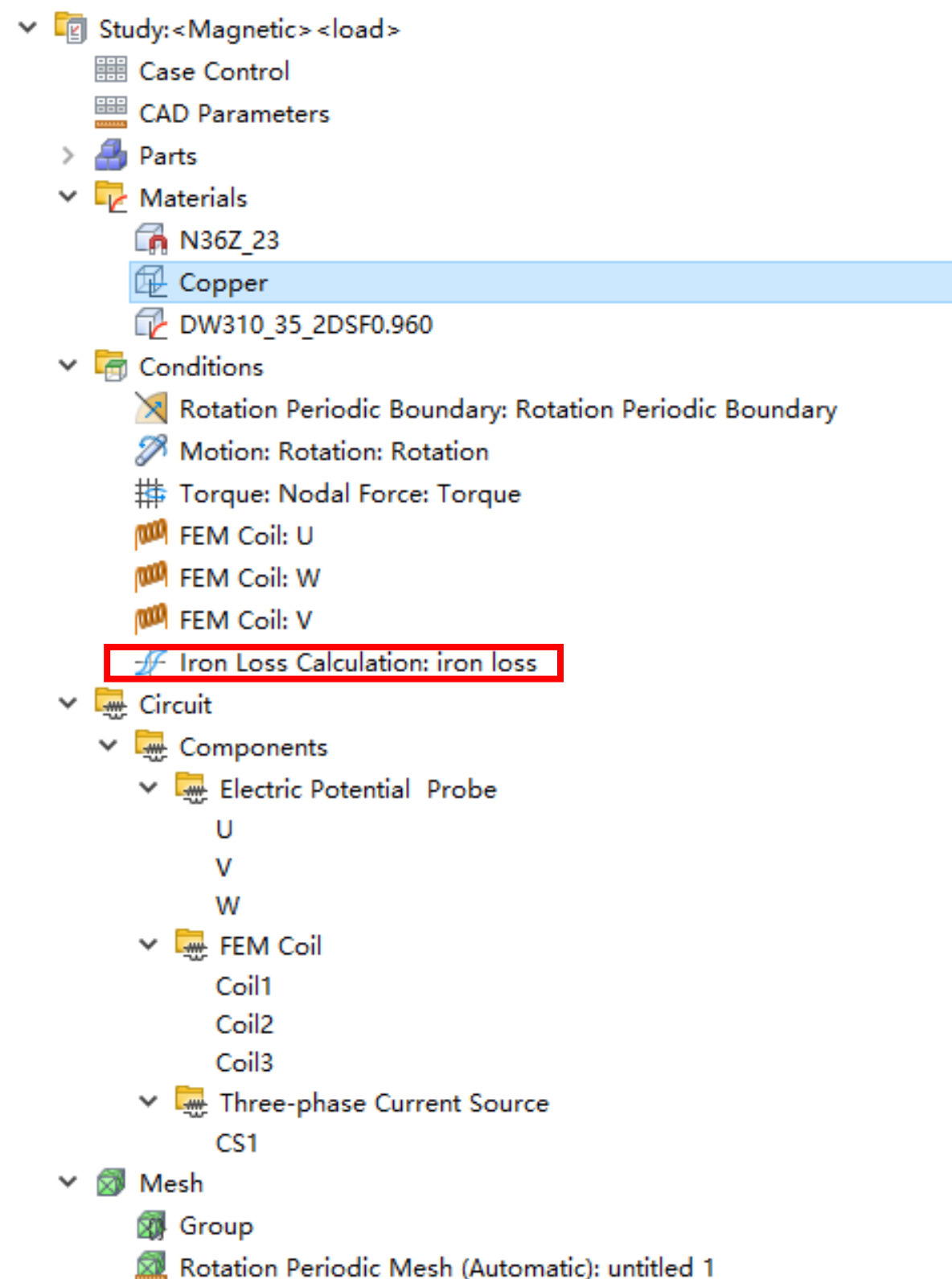
- 创建一个负载Study。
- 由负载的Study复制一个效率响应Study。
- 选择速度优先模式，创建响应表，即设置电流幅值、相位和转速扫描点。
- 计算。
- 设置效率MAP图参数，即设置控制方式等相关参数。
- 显示效率图。

■ 精度优先效率图操作流程

- 利用速度优先效率MAP图创建精度优先效率MAP图
- 设定响应表，选择响应参数
- 设置自定义控制电路
- 计算
- 显示效率图

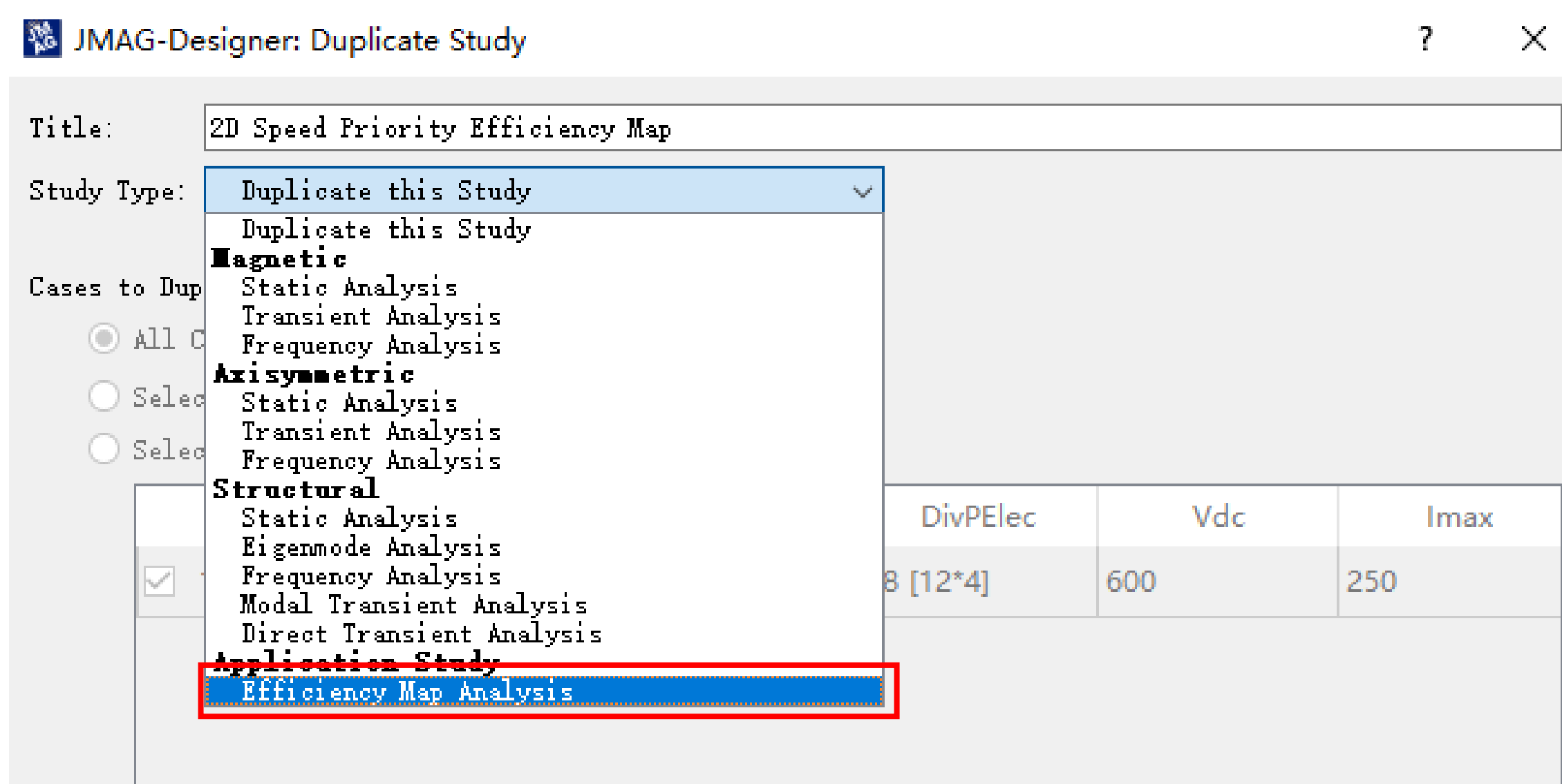
3、速度优先效率图

■ 创建一个负载Study



- 效率图的Study所有的设置和通用的负载Study设置是一样的。
- 如果需要计算铁损，则必须增加铁损条件。

- 由负载的Study复制一个效率响应Study，如下右图所示；复制后的Study如右图所示。



JMAG-Designer: Duplicate Study

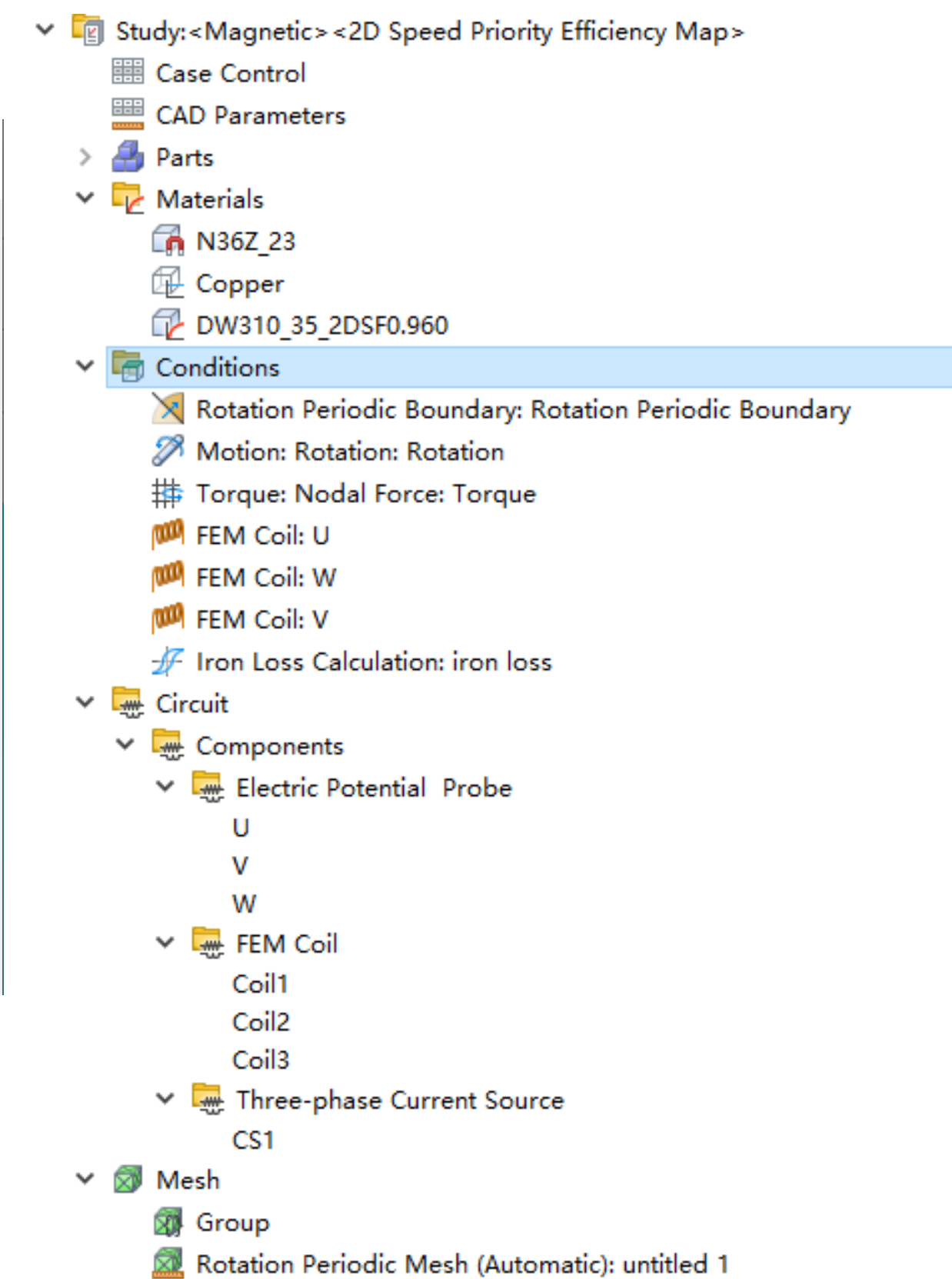
Title: 2D Speed Priority Efficiency Map

Study Type: Duplicate this Study

Cases to Dup

- ☒ All Cases
- ☐ Selected Cases
- ☐ Selected Cases

Category	Analysis Type	DivPElec	Vdc	I _{max}
Magnetic	Static Analysis			
	Transient Analysis			
	Frequency Analysis			
Axisymmetric	Static Analysis			
	Transient Analysis			
	Frequency Analysis			
Structural	Static Analysis			
	Eigenmode Analysis			
	Frequency Analysis			
	Modal Transient Analysis			
	Direct Transient Analysis			
Application Study				
Efficiency Map Analysis				

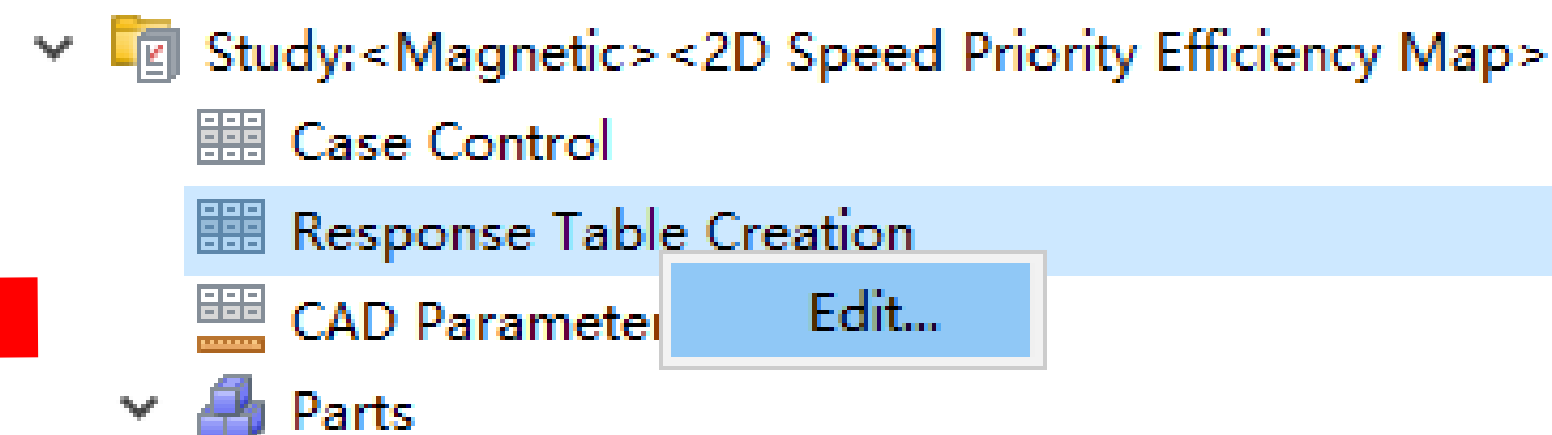
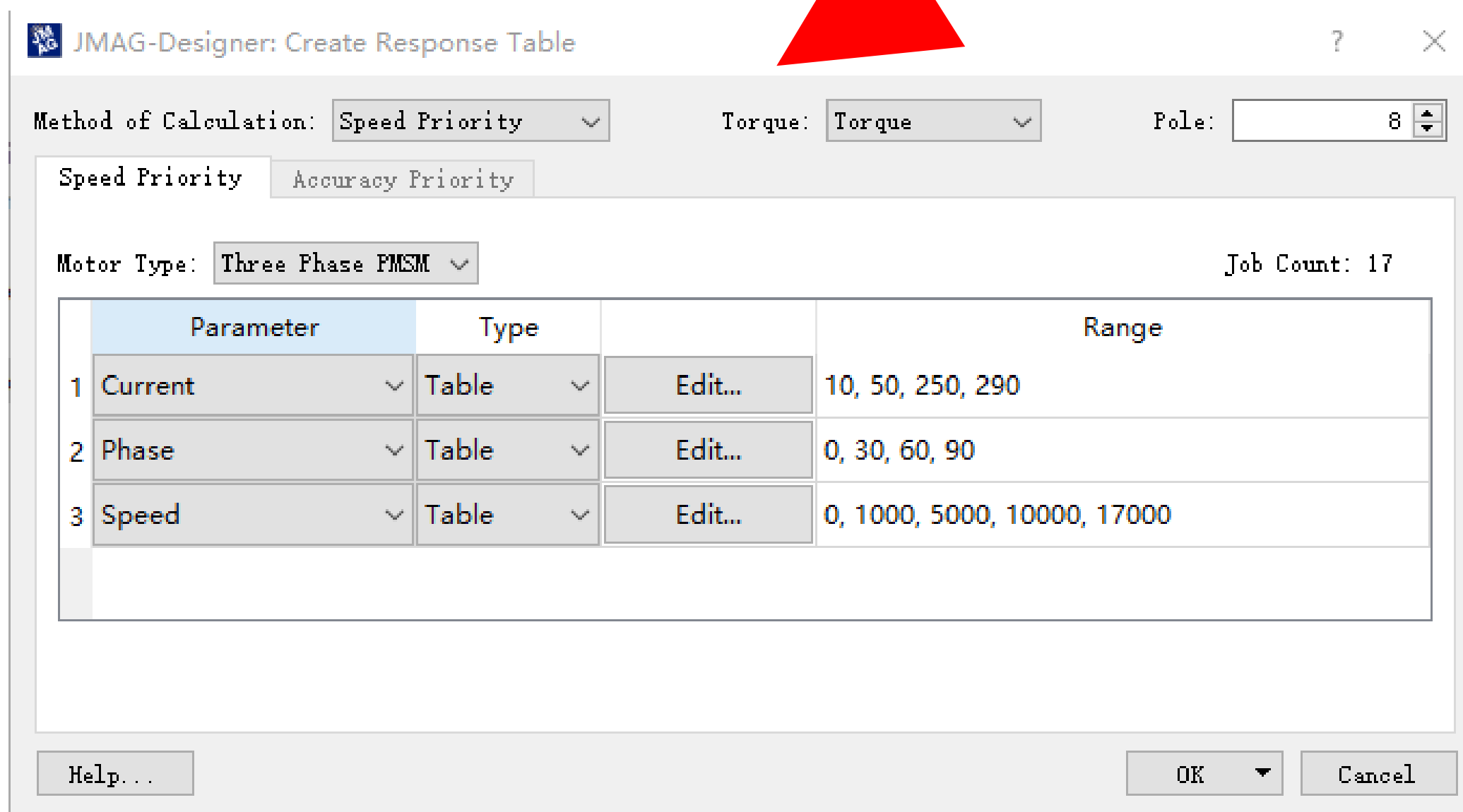


Study: <Magnetic> <2D Speed Priority Efficiency Map>

- Case Control
- CAD Parameters
- Parts
- Materials
 - N36Z_23
 - Copper
 - DW310_35_2DSF0.960
- Conditions
 - Rotation Periodic Boundary: Rotation Periodic Boundary
 - Motion: Rotation: Rotation
 - Torque: Nodal Force: Torque
 - FEM Coil: U
 - FEM Coil: W
 - FEM Coil: V
 - Iron Loss Calculation: iron loss
- Circuit
 - Components
 - Electric Potential Probe
 - U
 - V
 - W
 - FEM Coil
 - Coil1
 - Coil2
 - Coil3
 - Three-phase Current Source
 - CS1
- Mesh
 - Group
 - Rotation Periodic Mesh (Automatic): untitled 1

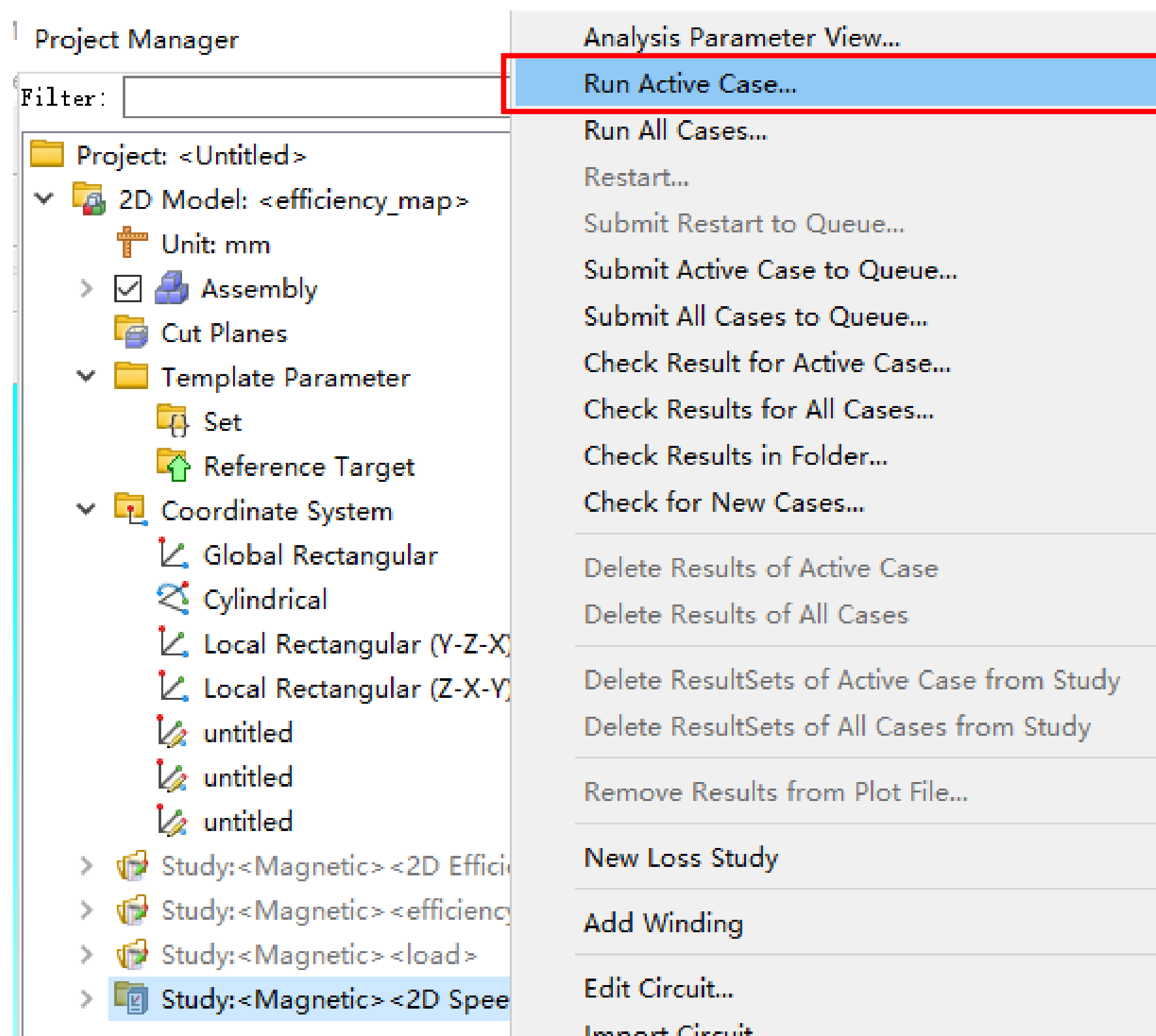
■ 创建响应表。

- 即设置电流幅值、相位和转速扫描点。下面图只是示意图，可以根据自己的需求进行对3个参数扫描值进行设置。

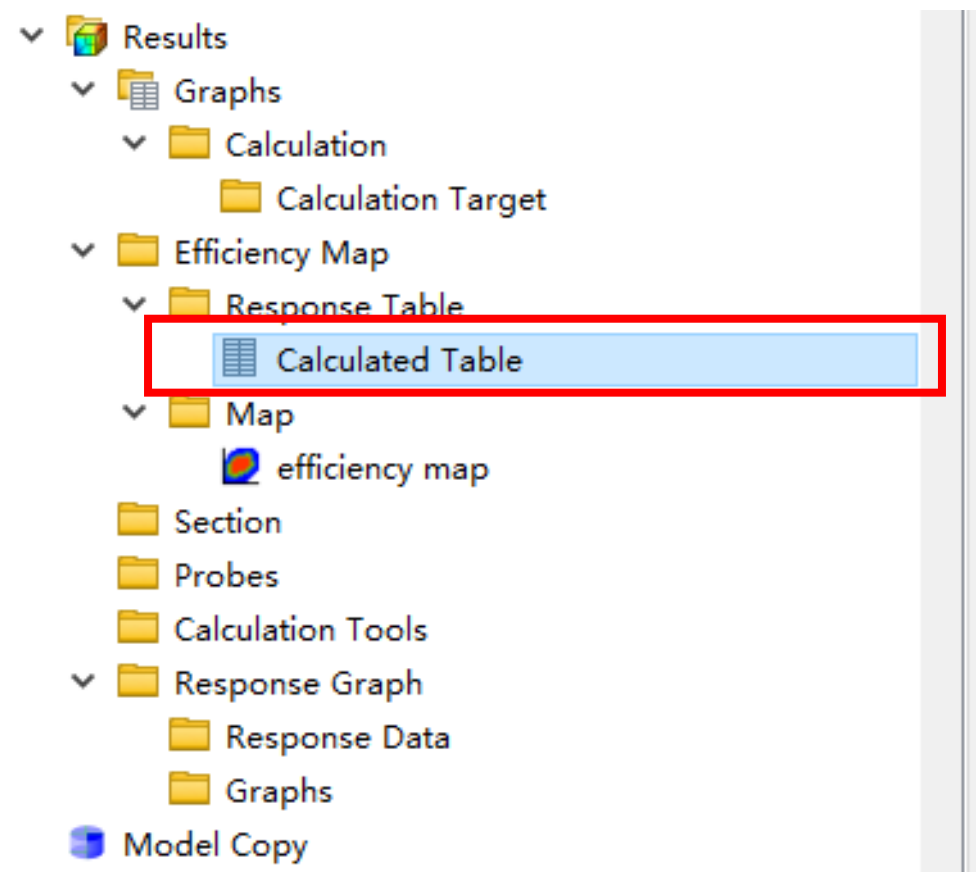


- Current: 电流幅值
- Phase: 相位
- Speed: 速度
- Method of Calculation: 计算方法选择
(速度优先/精度优先)
- Torque: 转矩条件
- Pole: 极数

■ 运行计算



■ 确认响应表



show



JMAG-Designer: Response Table

Table Name: Calculated Table

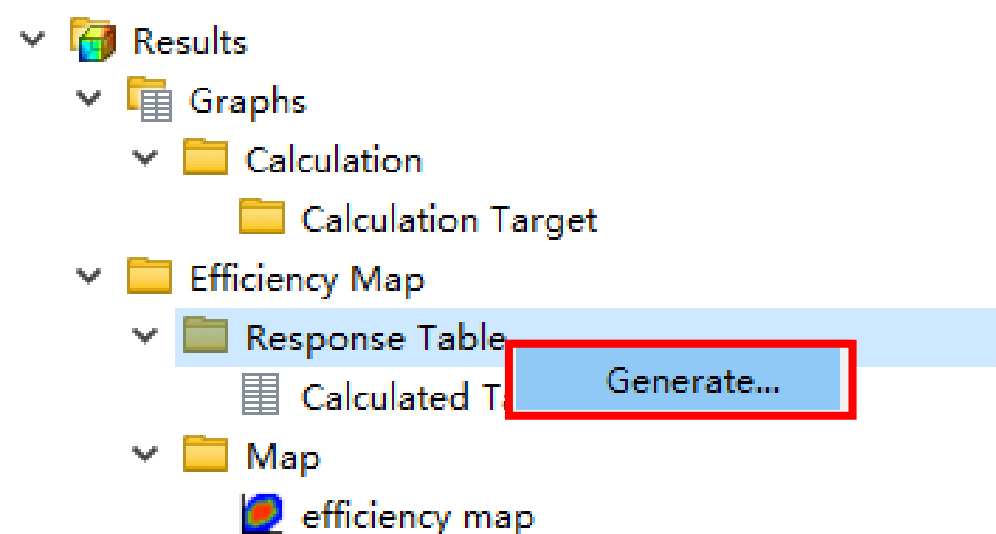
	Current	Phase	Speed	Torque	Torque Ripple	Voltage	ndamental Volta	Total Loss	Iron Loss	Hysteresis Loss	urrent Loss (Iro	Coppe
1	0	0	0	-3.55131e-05	-19853.6	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1000	-3.55131e-05	-19853.6	37.9639	36.8242	3.60842	3.60842	2.98728	0.621144	0
3	0	0	5000	-3.55131e-05	-19853.6	189.82	184.121	30.4645	30.4645	14.9362	15.5283	0
4	0	0	10000	-3.55131e-05	-19853.6	379.639	368.242	91.9857	91.9857	29.8725	62.1132	0
5	0	0	17000	-3.55131e-05	-19853.6	645.387	626.012	230.29	230.29	50.7832	179.507	0
6	10	0	0	3.10175	0.371861	0.831384	0.823032	7.2	0	0	0	7.2
7	10	0	1000	3.10175	0.371861	43.3524	42.7839	12.219	5.01901	4.17327	0.845738	7.2
8	10	0	5000	3.10175	0.371861	219.113	216.777	49.2092	42.0092	20.8661	21.143	7.2
9	10	0	10000	3.10175	0.371861	438.815	434.271	133.504	126.304	41.7323	84.5721	7.2
10	10	0	17000	3.10175	0.371861	746.396	738.762	322.558	315.358	70.9449	244.413	7.2
11	10	30	0	3.18813	0.33698	0.831384	0.839996	7.2	0	0	0	7.2
12	10	30	1000	3.18813	0.33698	38.956	38.0622	11.2815	4.08155	3.36451	0.717032	7.2
13	10	30	5000	3.18813	0.33698	197.992	193.669	41.9478	34.7478	16.8224	17.9254	7.2
14	10	30	10000	3.18813	0.33698	396.788	388.177	112.547	105.347	33.6448	71.7018	7.2
15	10	30	17000	3.18813	0.33698	675.102	660.488	271.614	264.414	57.1962	207.218	7.2
16	10	60	0	2.04491	0.408438	0.831384	0.848351	7.2	0	0	0	7.2
17	10	60	1000	2.04491	0.408438	34.4623	32.6068	10.3419	3.14191	2.56197	0.579937	7.2
18	10	60	5000	2.04491	0.408438	174.663	165.582	34.5078	27.3078	12.8097	14.4981	7.2
19	10	60	10000	2.04491	0.408438	349.914	331.805	90.812	83.612	25.6194	57.9925	7.2
20	10	60	17000	2.04491	0.408438	595.265	564.518	218.351	211.151	43.553	167.598	7.2
21	10	90	0	-0.000311509	-2515.2	0.831384	0.839996	7.2	0	0	0	7.2

Help... Export... Close

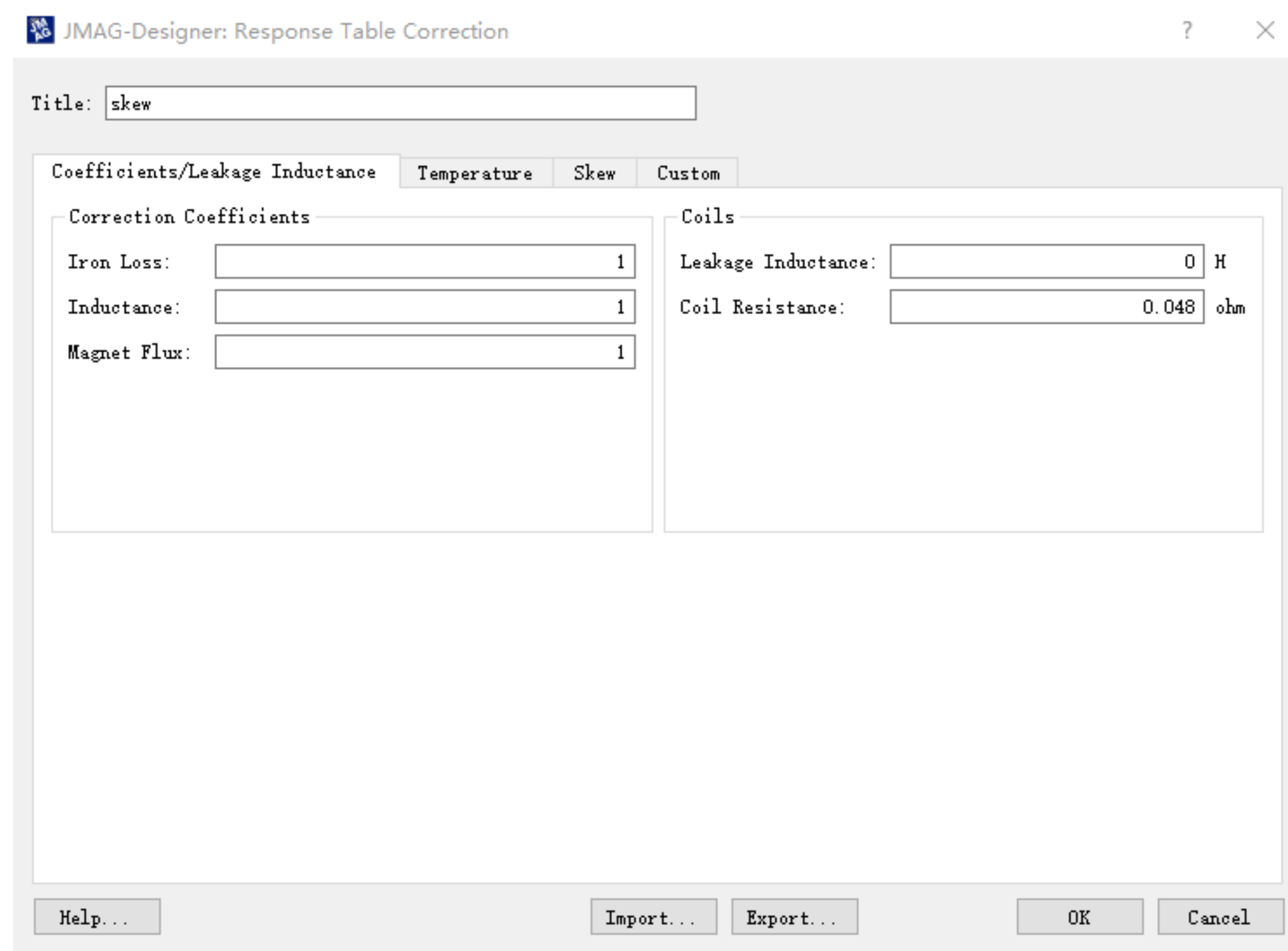
■ 响应值定义

物理量	描述
Current (A)	[Create Response Table]对话框中指定的值。即输入变量。
Current phase (deg)	[Create Response Table]对话框中指定的值。即输入变量。
Speed (r/min)	[Create Response Table]对话框中指定的值。即输入变量。
Torque (Nm)	在[Create Response Table]对话框的[Torque]下拉菜单中选择的转矩条件下的平均转矩。
Torque ripple	“扭矩脉动率”。 这被定义为（最大扭矩 - 最小扭矩）/平均扭矩。
Iron loss (W)	铁损条件下的铁损值（磁滞损耗和焦耳损耗之和）。
Hysteresys loss (W)	铁损条件下的磁滞损耗。
Joule loss (W)	由损耗工具计算的层压涡流损耗。
Total loss (W)	铁损和铜损之和。
Copper loss (W)	绕组中的损耗。使用线圈电阻和电流计算。Wcopper=I²R：铜损（W）， I：线圈电流（A）， R：线圈电阻（欧姆）。
Voltage (V)	U和V相之间的线电压峰值电压。
Fundamental voltage (V)	U相和V相之间的线间电压的基波值。
d-axis flux (Wb)	使用Park变换将线圈的磁链转换为d轴。
q-axis flux (Wb)	使用Park变换将线圈的磁链转换为q轴。
Ld, Lq (H)	直轴和交轴电感。 它们是使用以下等式计算的静电感。（ $\phi_{total}-\phi_{magnet}$ ）/I，其中 ϕ_{total} 为总磁链， ϕ_{magnet} 为磁铁磁链，I为电流。
Phase offset (deg)	这将会添加到“beta”相位角以获得U相中的电流的值。这可以通过空载磁链相位得到。
Magnet flux (Wb)	由磁铁引起的线圈中磁链的大小。

■ 响应表创建

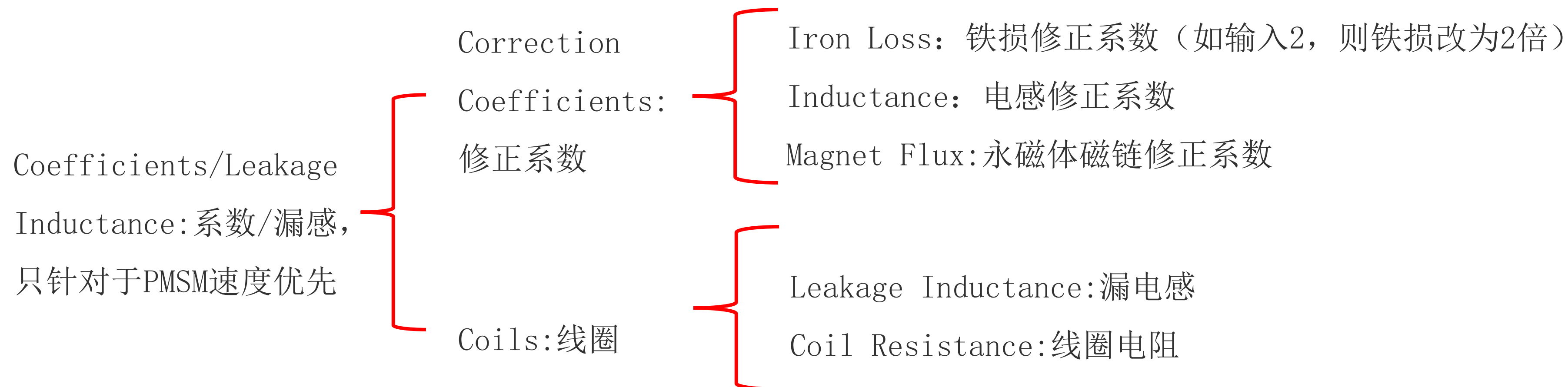


Generate



■ 响应表创建

- Title: 创建响应表名称, 并将显示在项目树下
- Import: 导入修正设置文件 (*.xml)
- Export: 导出修正设置文件 (*.xml)

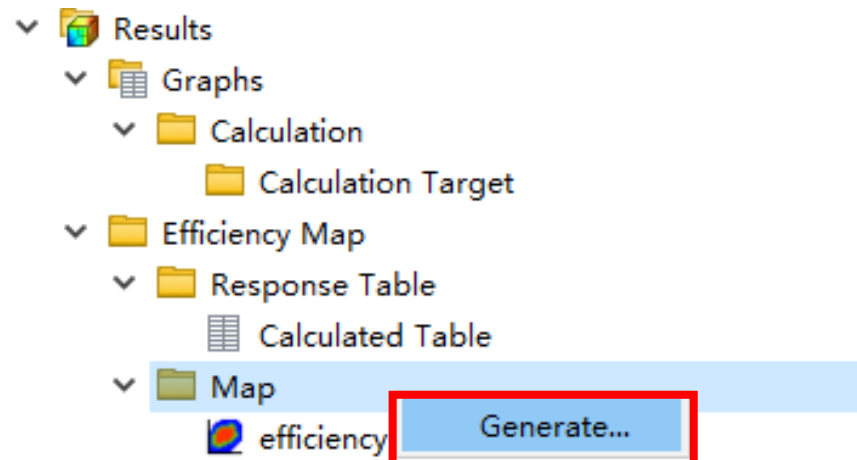


■ 响应表创建

- Temperature（温度）：只针对于PMSM速度优先
 - Coil（线圈）：线圈温度修正符合公式 $R_{new} = R + R \times C_6 \times (T - T_{base})$ 其中 R_{new} 为修正后电阻值， R 为修正前电阻值， C_6 为温度修正系数， T 为电机驱动时温度， T_{base} 为线圈参考温度。
 - Magnet（磁钢）：磁钢温度修正符合公式 $F_{new} = F + F \times C_7 \times (T - T_{base})$ ，其中 F_{new} 为修正后磁钢磁链值， F 为修正前磁钢磁链值， C_7 为磁钢温度修正系数， T 为电机驱动时温度， T_{base} 为磁钢参考温度
- Skew（斜极）：只针对于PMSM速度优先，可设置斜极类型（线性斜极、V字形斜极、分步式斜极）、斜极角度、斜极零件（定子、转子）
- Custom（用户）：用户自定义修正物理量，可设置输入值、FEA结果、表达式形式（表达式使用参数值）

Coefficients/Leakage Inductance Temperature Skew Custom				
Custom Calculations				
	Parameter	Variable	Type	Expression
1	Current	in_1	Input Value	
2	Phase	in_2	Input Value	
3	Speed	in_3	Input Value	
4	Torque	res_1	Custom Expression	in_1

- 设置效率MAP图参数，即设置控制方式等相关参数。



Efficiency Map

OK Cancel Help...

Title: speed

Response Table: Calculated Table

Inverter Rating

Max Voltage: 600 V

Max Current: 290 A

Voltage Limit: Peak Voltage Amplitude

Motor Control

☒ Max Power / Efficiency

☐ Basic Control

Control Type: MTPA

Mode

☒ Motor Mode

☐ Motor + Generation Mode

Mechanical Loss

Loss Factor: 0 W / k rpm

Evaluation Resolution

Speed Divisions: 20

Torque Divisions: 20

Correction

Table Correction: No Correction

	Speed	Torque	Scaling
1			
2			

- [Title]: 输入效率图的名称。输入的字符串显示在[Project Manager]树中。
- [Response Table]: 选择用于创建效率图的响应表。
- [Inverter Rating]: 逆变器范围，仅适用于[Speed Priority]
- [Max Voltage (V)]: 输入逆变器总线电压（下页图中虚线包围的位置的电压），默认值为0V。当电动机的相电压的幅度是 V_{ph} 时，星型连接在 $\sqrt{3} \times V_{ph} \leq V_{max}$ 范围内，三角形连接在 $V_{ph} \leq V_{max}$ 的范围内。

➤ [Max Current (A)]

输入从逆变器提供给电机的线电流的最大幅度。默认值是[Response Table Creation]对话框中指定的输入电流的最大值。

当电动机的相电流的幅度为 I_{ph} 时，对于星形连接的电动机，被控制在 $I_{ph} \leq I_{max}$ 的范围内。对于三角形连接，电机控制在 $I_{ph} \times \sqrt{3} \leq I_{max}$ 的范围内。

✓ [Voltage Limit]

- **[Peak Voltage Amplitude]:**评估电压波形最大值是否达到极限。
- **[Fundamental Voltage Amplitude]:**评估电压波形基波最大值（幅值）是否达到极限。

- **[Motor Control]** : 仅适用于速度优先模式
- 选择[Max Power/Efficiency]或[Basic Control]。选择[Basic Control]时, 请指定 [Control Type]。
控制类型如下。（* 对于精度优先模式, 可以在控制电路使用任何类型的控制。）

控制类型	描述
[Max Power/Efficiency]	在改变电流幅值/电流相位的同时, 搜索效率最大化的点。
[Max Torque/Current (MTPA)]	对于给定电流, 控制电流相位以使扭矩保持最大化。
[Max Torque/Current+Field Weakening]	当端电压都低于最大电压时, 对于给定电流, 控制电流相位以使转矩保持最大。
	当任何端子电压上升到高于最大电压时, 通过弱磁控制, 即电流相位超前, 直到端子电压降至最大电压以下。
[Unity Power Factor]	控制电流使功率因数保持为1。
[Id = 0]	控制d轴电流使其保持在0A, 即相电流保持在0度。

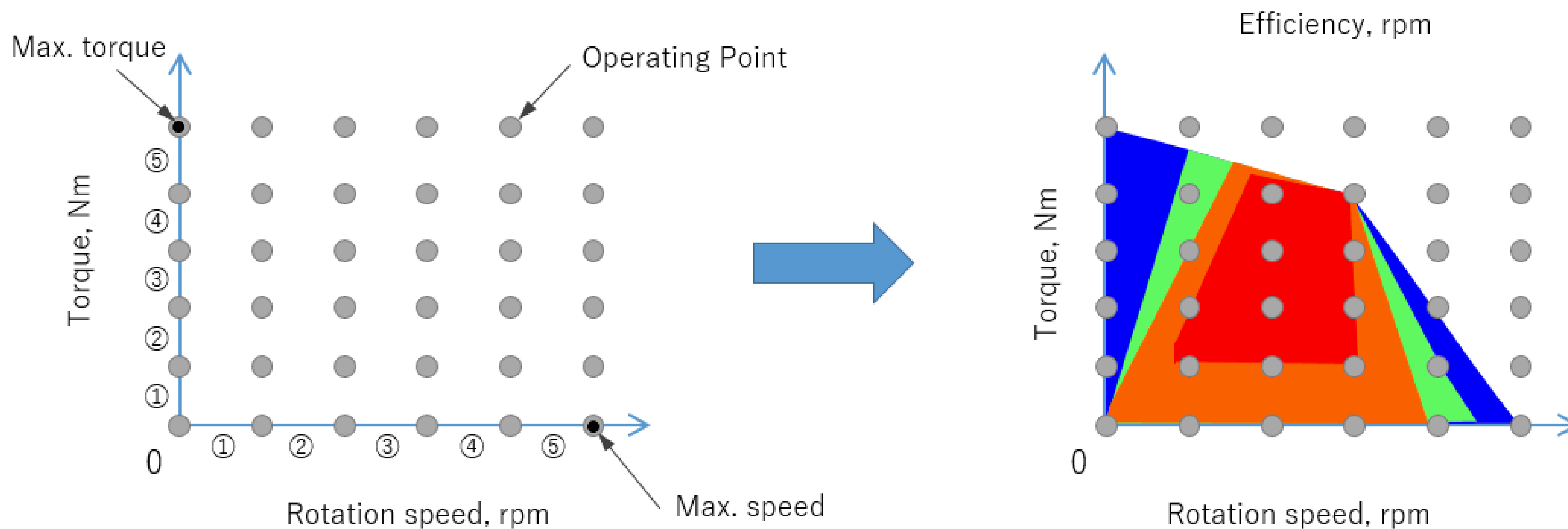
➤ [Mechanical Loss]

参数	描述
[Loss Factor (W/k rpm)]	在考虑与速度成比例的机械损耗时，输入校正系数。

➤ [Evaluation Resolution] * 仅适用于速度优先模式

输入速度和扭矩的分割数。使用更多划分数后，将创建更准确的MAP。但是，创建map所需的时间会更长。

参数	描述
[Speed Divisions]	转速从0到最大转速采用等间隔划分。最小分割数为5。
[Torque Divisions]	扭矩从0到最大扭矩采用等间隔划分。最小分割数为5。



如上图，[Speed Divisions] 设置为5，[Torque Divisions] 设置为5。

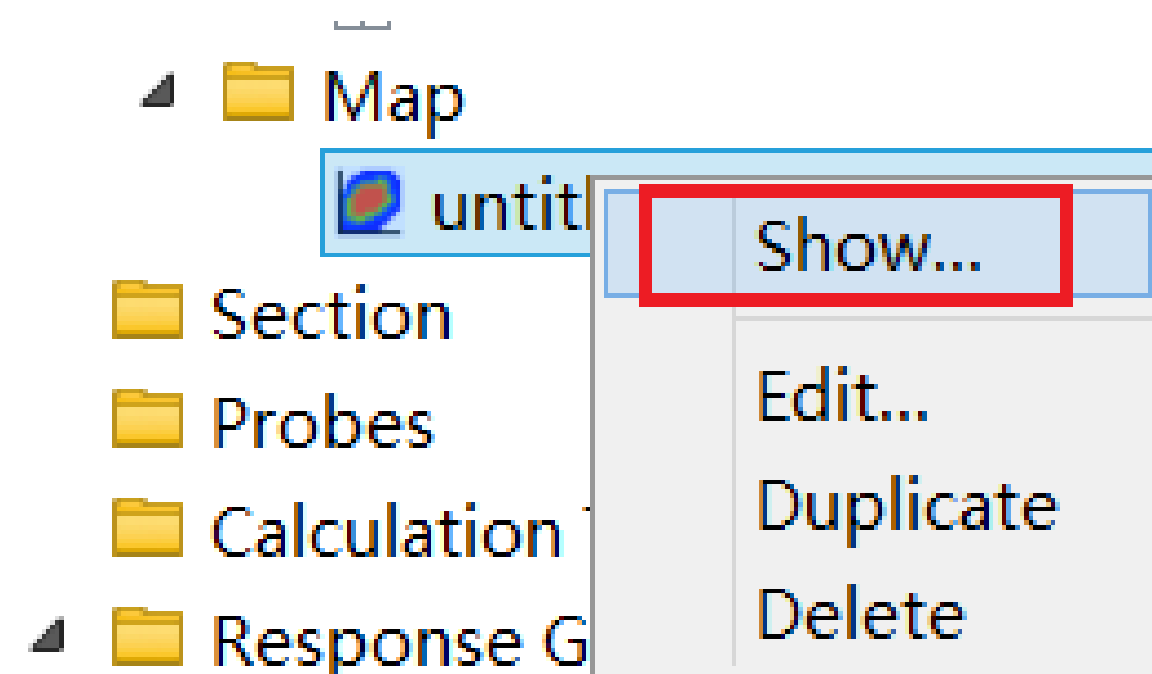
➤ [Correction]

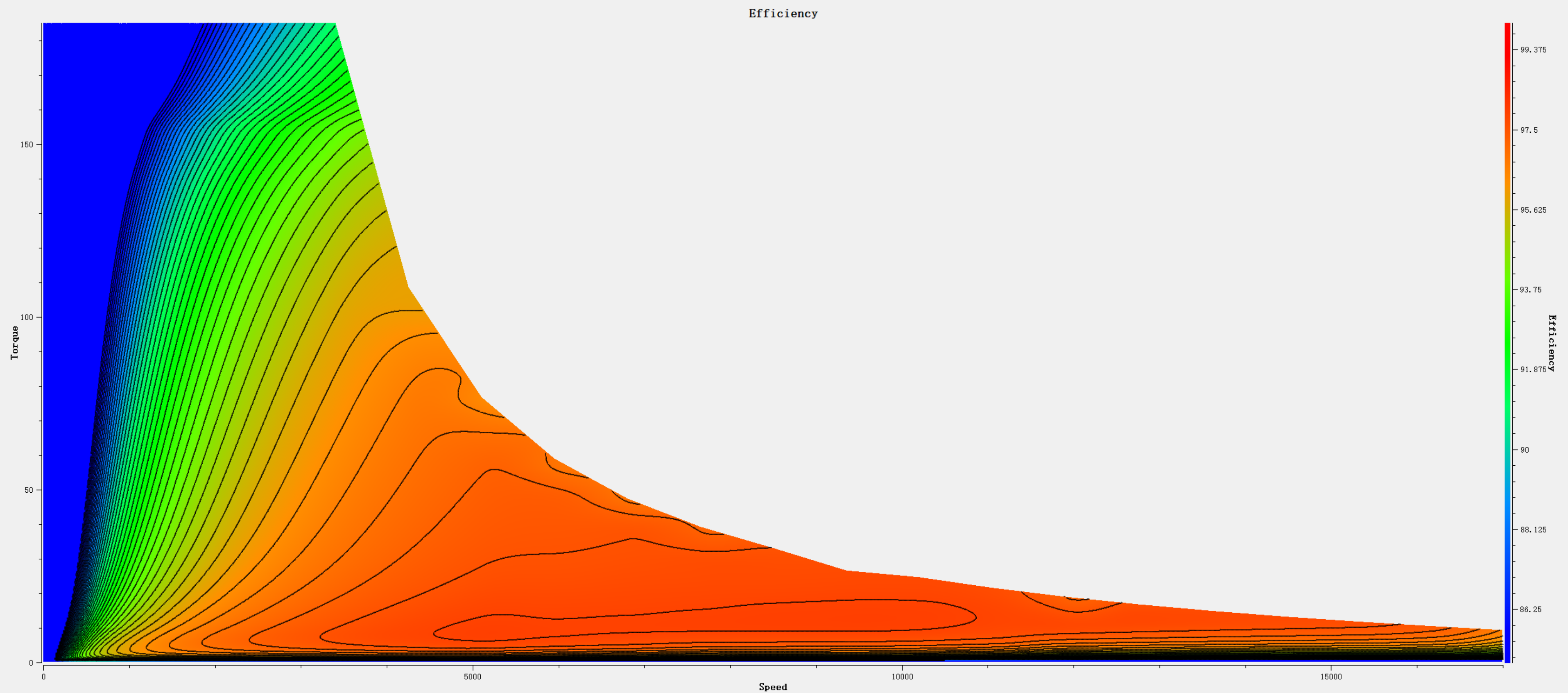
乘数校正可以应用于效率或损耗。

- [Table Correction]: 在 [Table Correction]中选择[Efficiency]或 [Loss]时，输入每个速度和扭矩的修正值。
可以输入超过最大速度或最大扭矩的值。

类型	描述
[No Correction]	不应用乘数校正。
[Efficiency]	系数校正应用于效率。
[Loss]	系数校正应用于损耗。

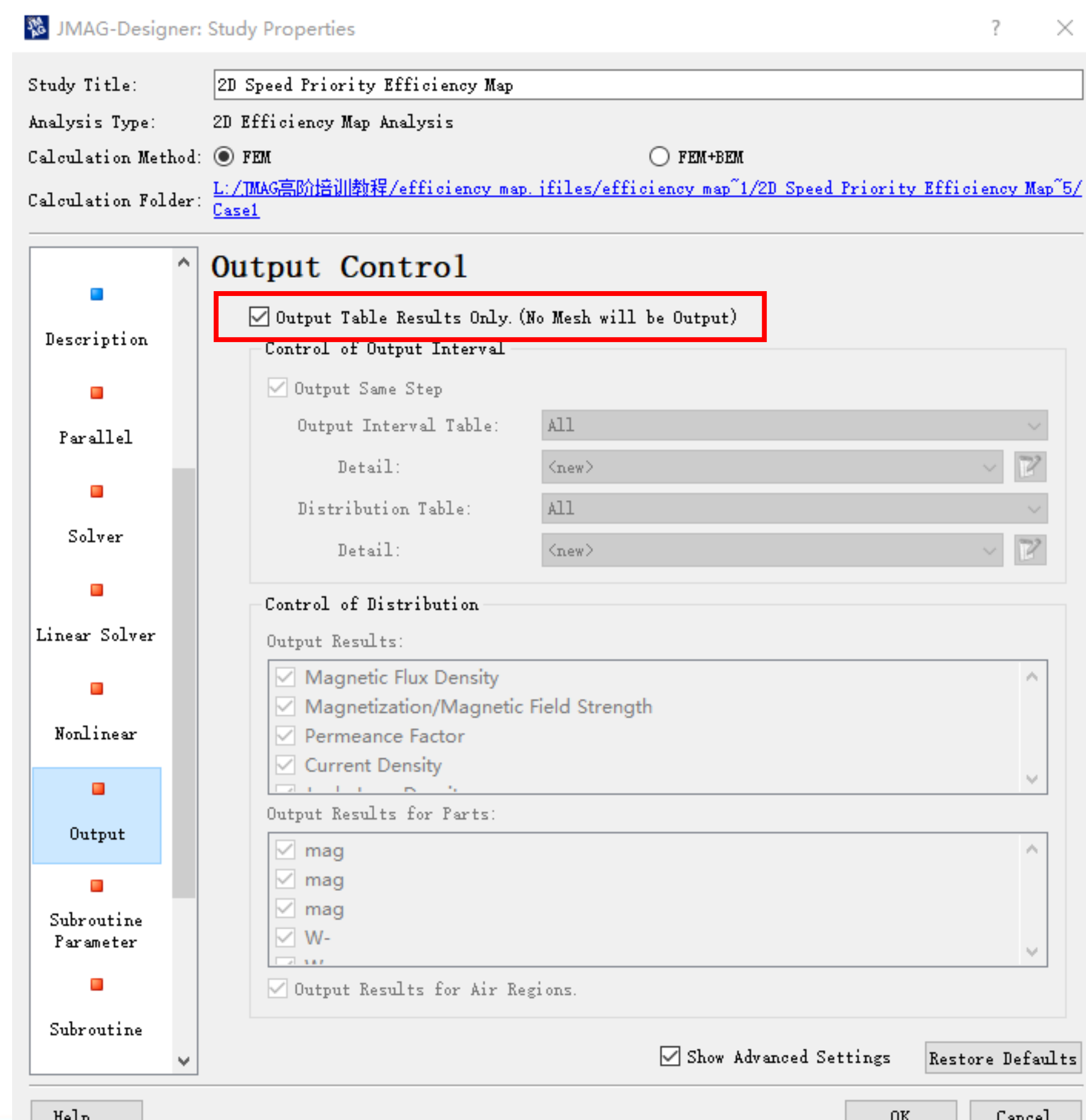
➤ 显示效率图。





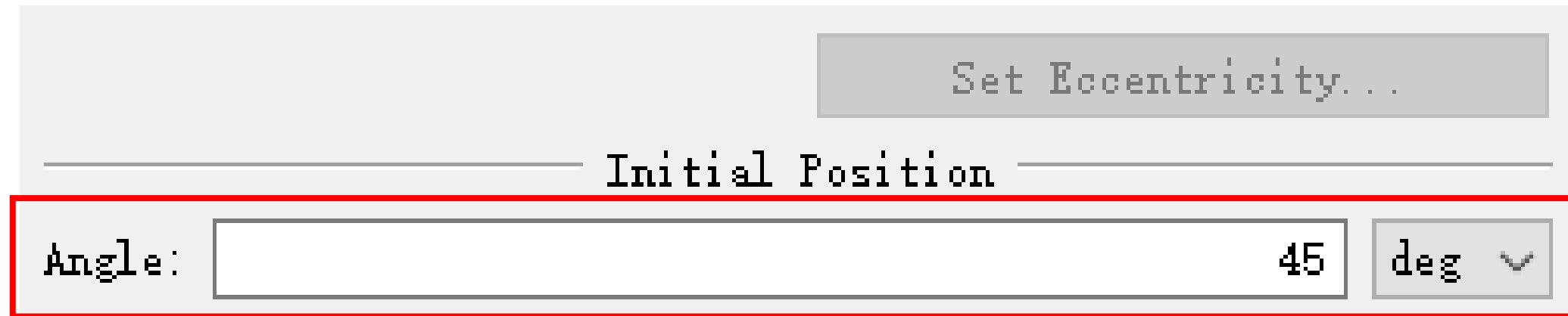
➤ 注意点:

- 计算的点数不能太少，比如电流幅值4个，相位角3个，转速3个，计算后不能显示MAP图。
- 速度优先不能考虑AC损耗，如果按计算AC损耗进行了设置，输出响应表中铜损值为0。
- 为了减小文件大小和加快计算速度，可以不输出网格，如下图所示。



➤ 注意点:

- 计算前是否需要通过设置转子初始位置角让d轴和U轴重合?不需要, 软件会通过offset自动设置为重合。

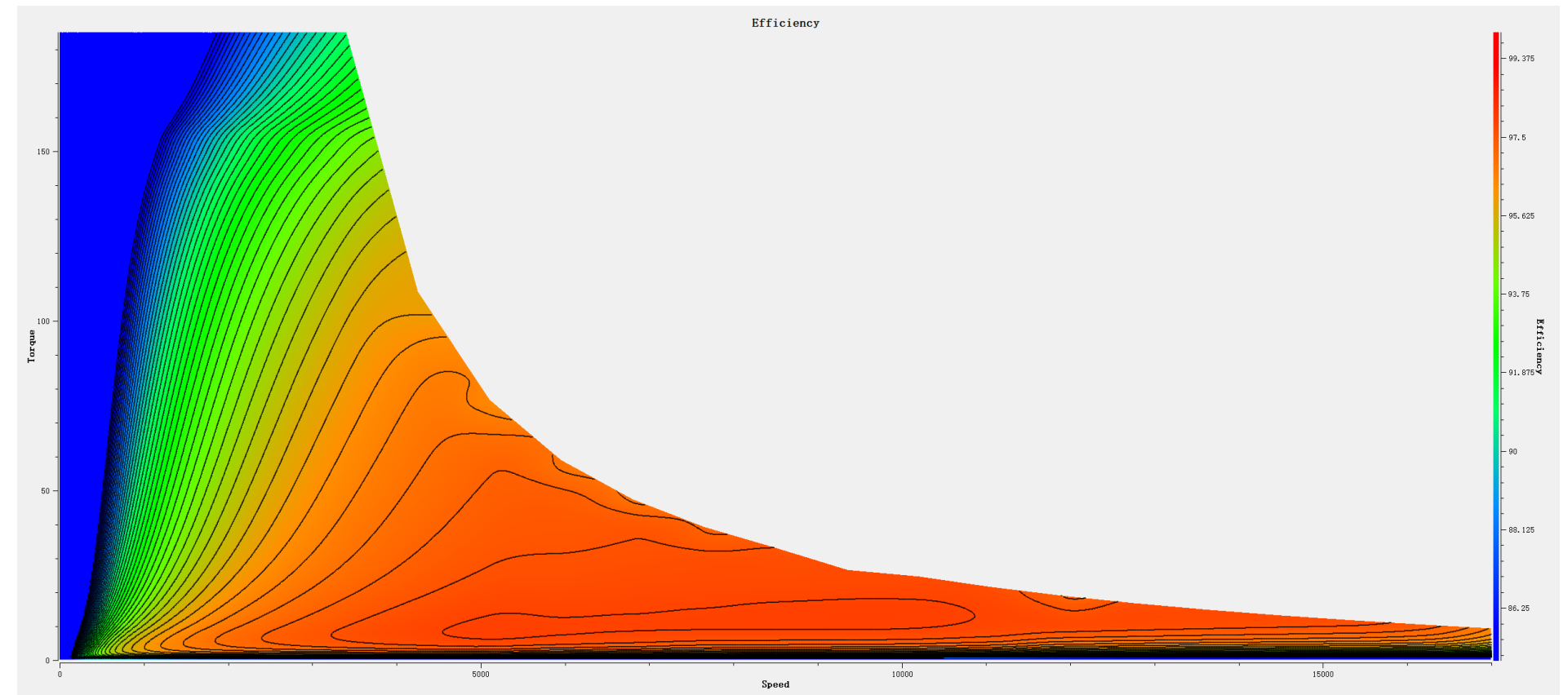
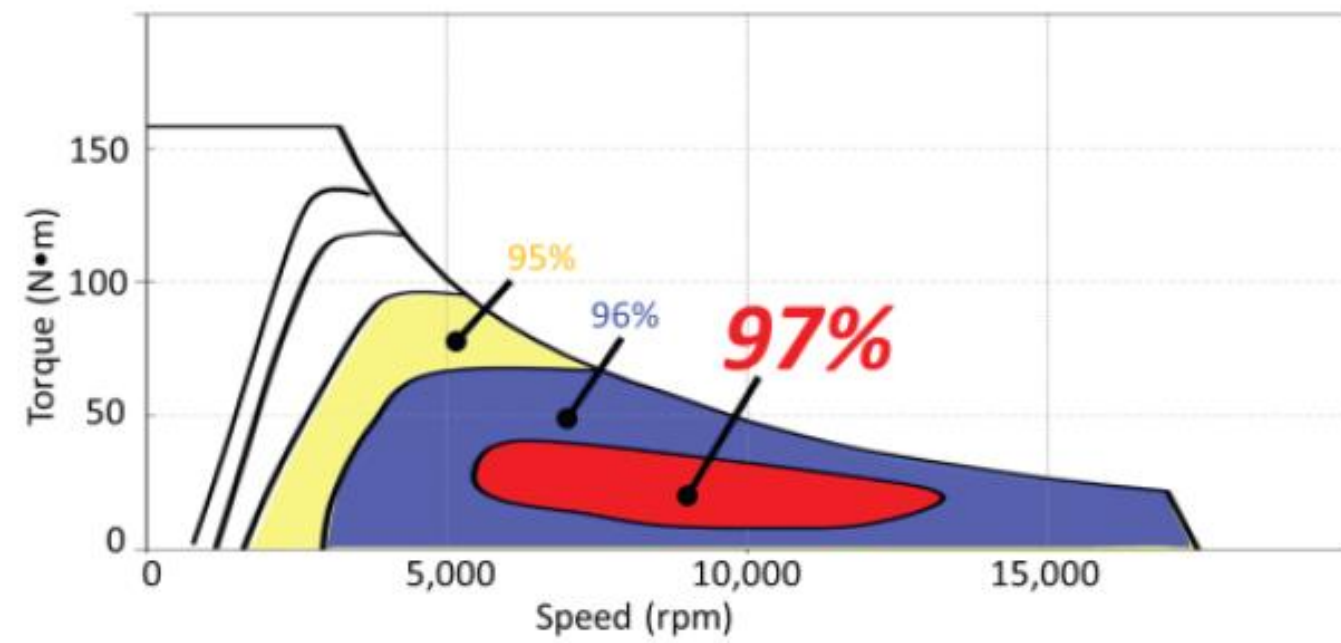


- 效率图Study支持Multi-slice条件, V18.1的Multi-slice支持线性斜极、分布斜极和V型斜极。但是无法确认每个slice的结果。
- 速度优先模式不能考虑涡流损耗。
- 不支持使用稳态近似瞬态分析, 时间周期显式误差校正。
- 不支持extended slide, generate mesh for each step (patch mesh)网格。

4、分析结果

■ 分析结果

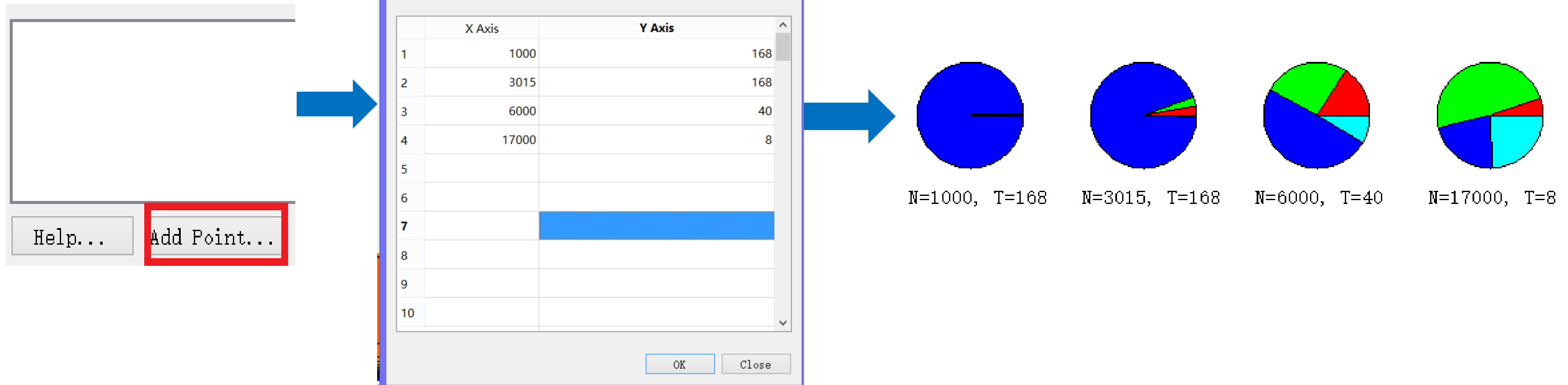
➤ 效率图



- 从公开资料看，Prius2017最大效率97%，JMAG计算的最大效率是97.92%。

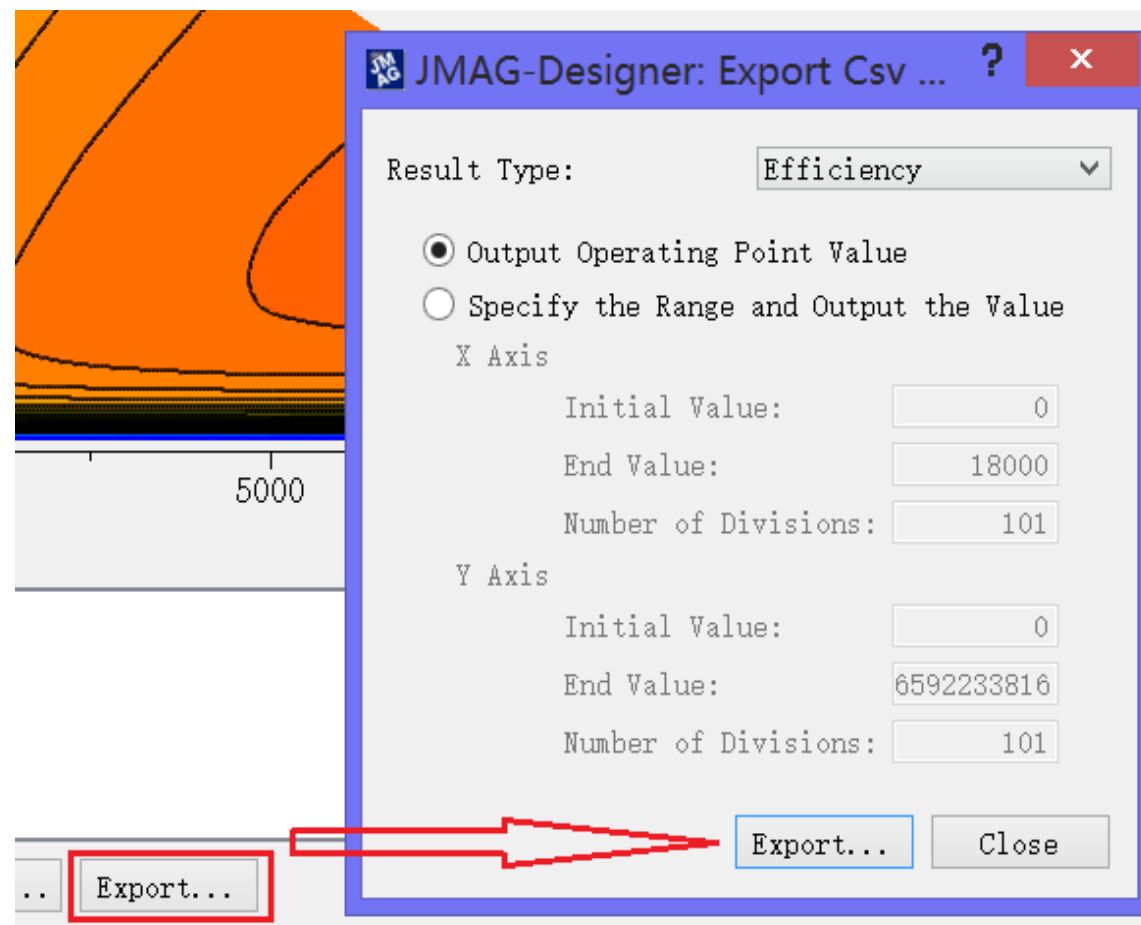
■ 分析结果

➤ 效率图



- 通过以上设置流程，可以得到任意工况点的损耗分布饼图。
- 蓝色为铜损，红色为铁损的磁滞损耗，绿色为铁损中的涡流损耗，兰色为机械损耗。
- 从图中可以看出，低速恒转矩的时候，损耗中以铜损占比最大，随着转速上升，铁损占比逐渐增大。
- 饼图中的机械损耗是按转速升高线性上升的。

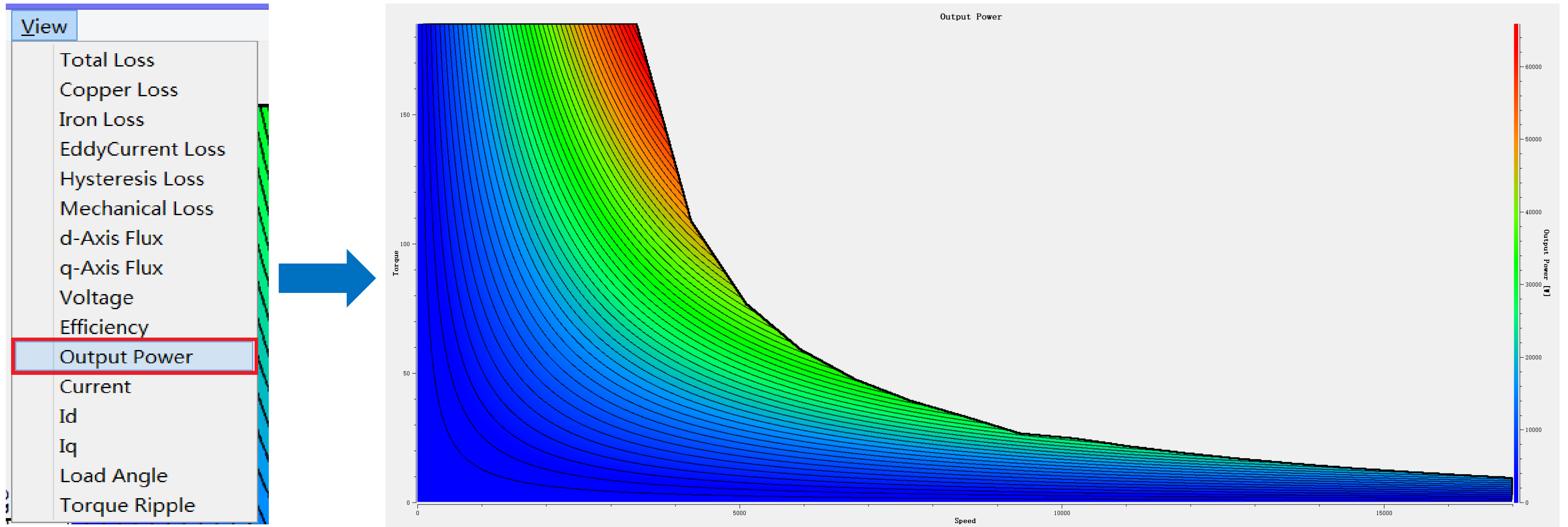
➤ 效率图



工况	转速	转矩	效率
爬坡点	1000	168	79.141%
峰值功率点	3015	168	91.546%
高效点	6000	40	97.458%
高速点	17000	8	96.401%

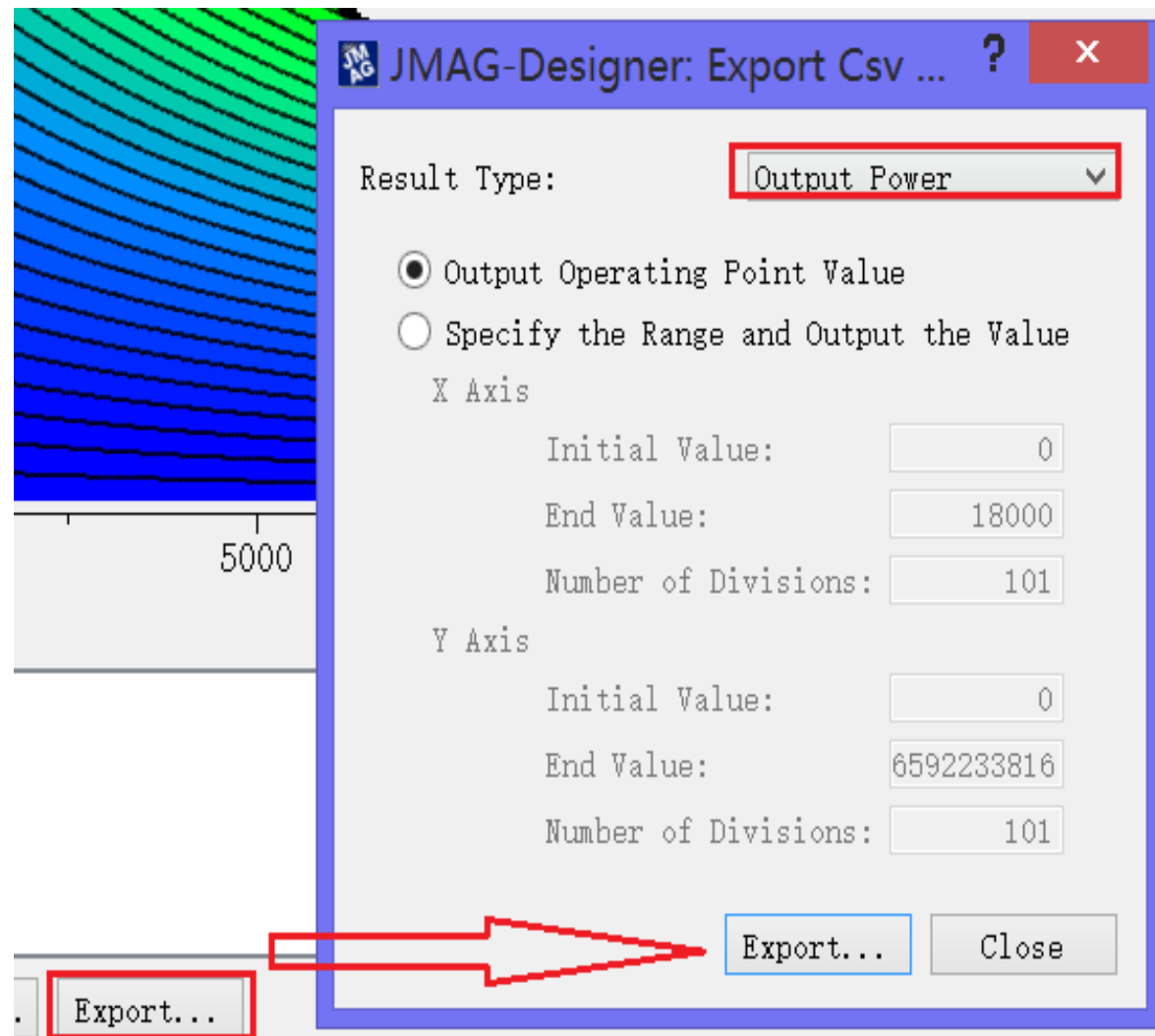
- 通过上述流程图可以得到4个工况点下的效率。

➤ 输出功率图



- 通过上述流程图可以得到输出功率MAP。

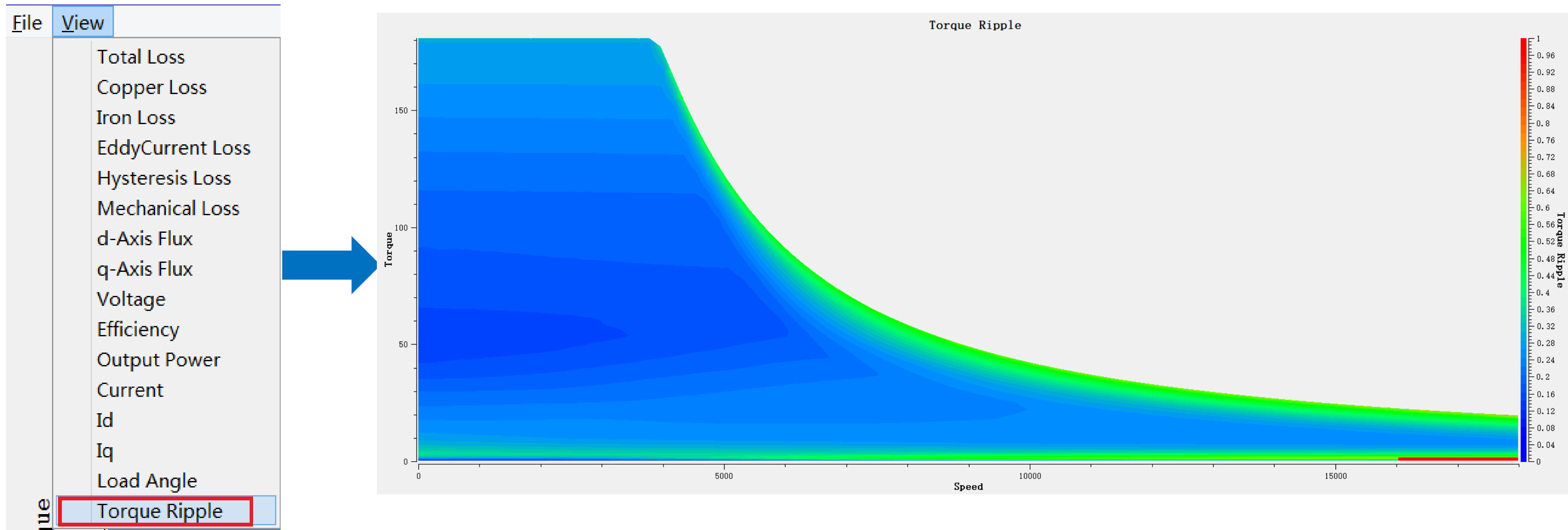
➤ 功率图



工况	转速(rpm)	转矩 (Nm)	功率 (kW)
爬坡点	1000	168	17.6
峰值功率点	3015	168	53.0
高效点	6000	40	25.1
高速点	17000	8	14.2

- 通过上述流程图可以得到4个工况点下的输出功率。

➤ 转矩脉动图

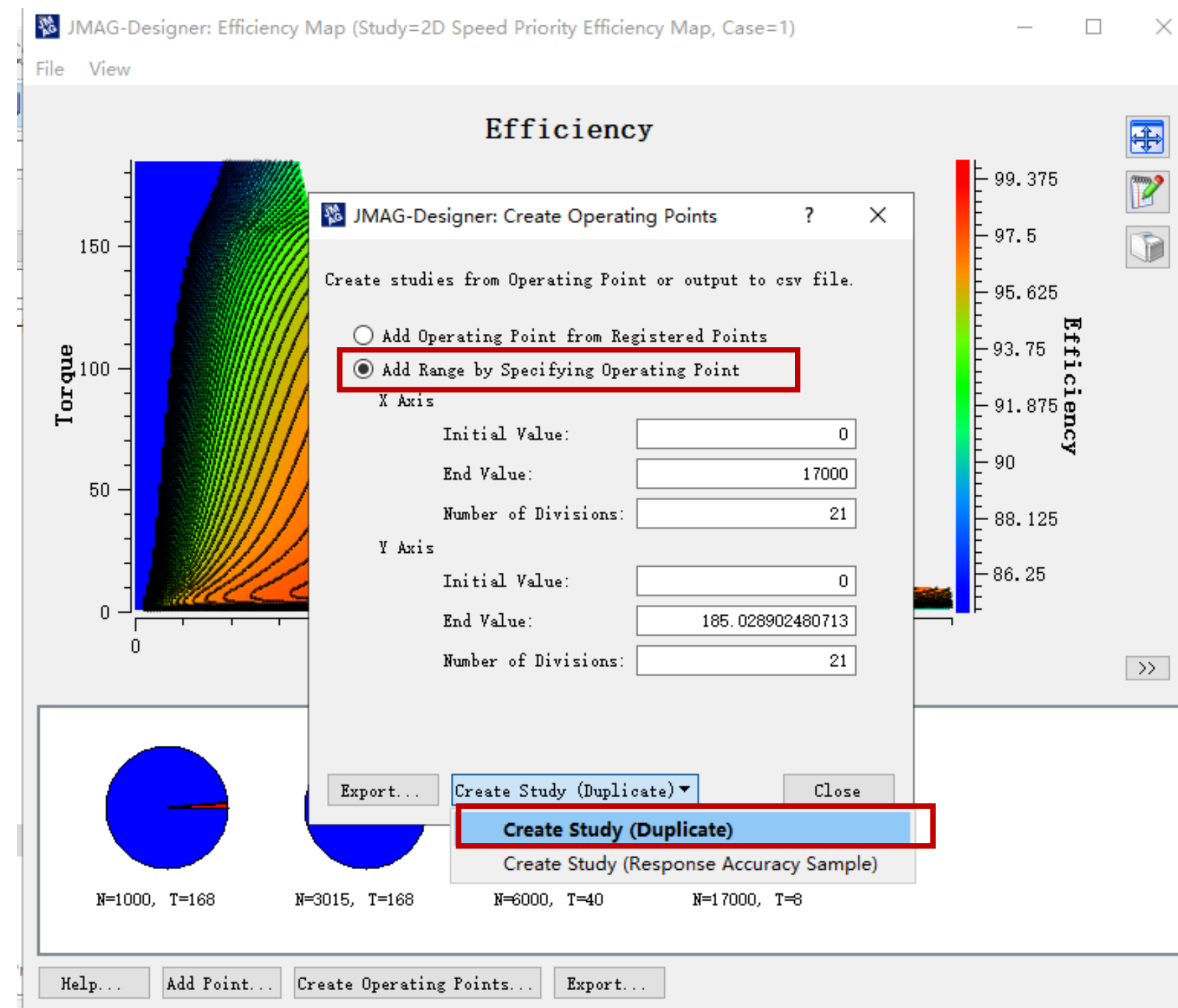


- 通过上述流程图可以得到转矩脉动MAP。

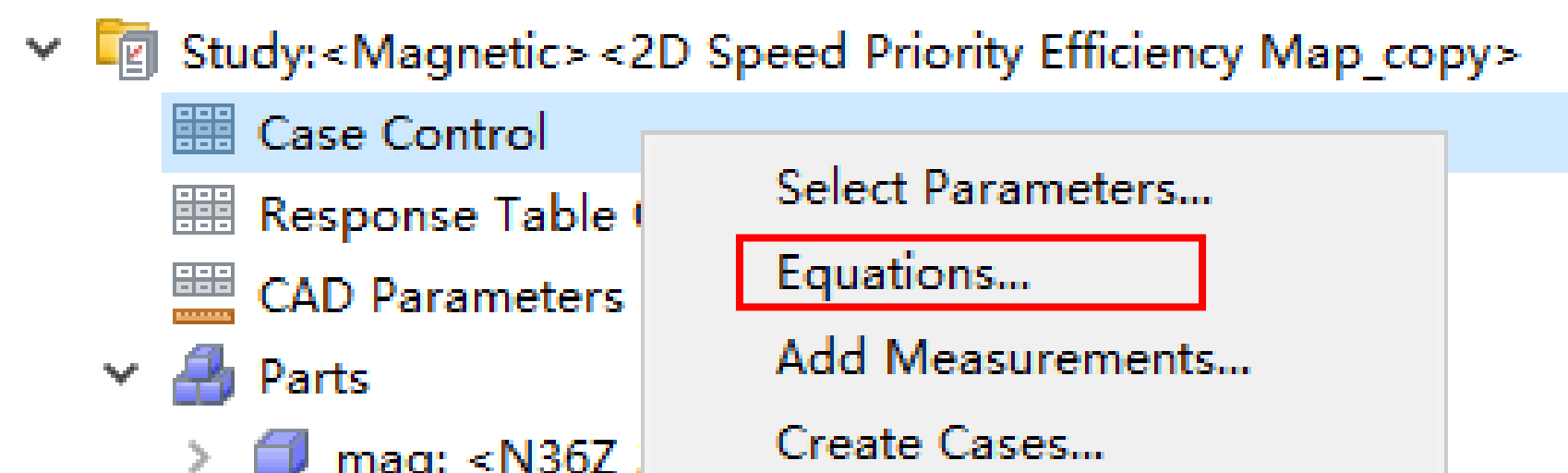
5、精度优先效率图

■ 针对工况点创建精度优先效率MAP图

- 在速度优先效率图上选择Creat Operating Points
- Add Operating Point from Registered Points:选择已添加的工况点
- **Add Range by Specifying Operating Point:根据指定的范围和划分数创建操作点。**
- **选择Create Study（Duplicate）:使用选择的工况点创建study**
- Creat Study（Response Accuracy Samble）：创建study（精度优先响应）



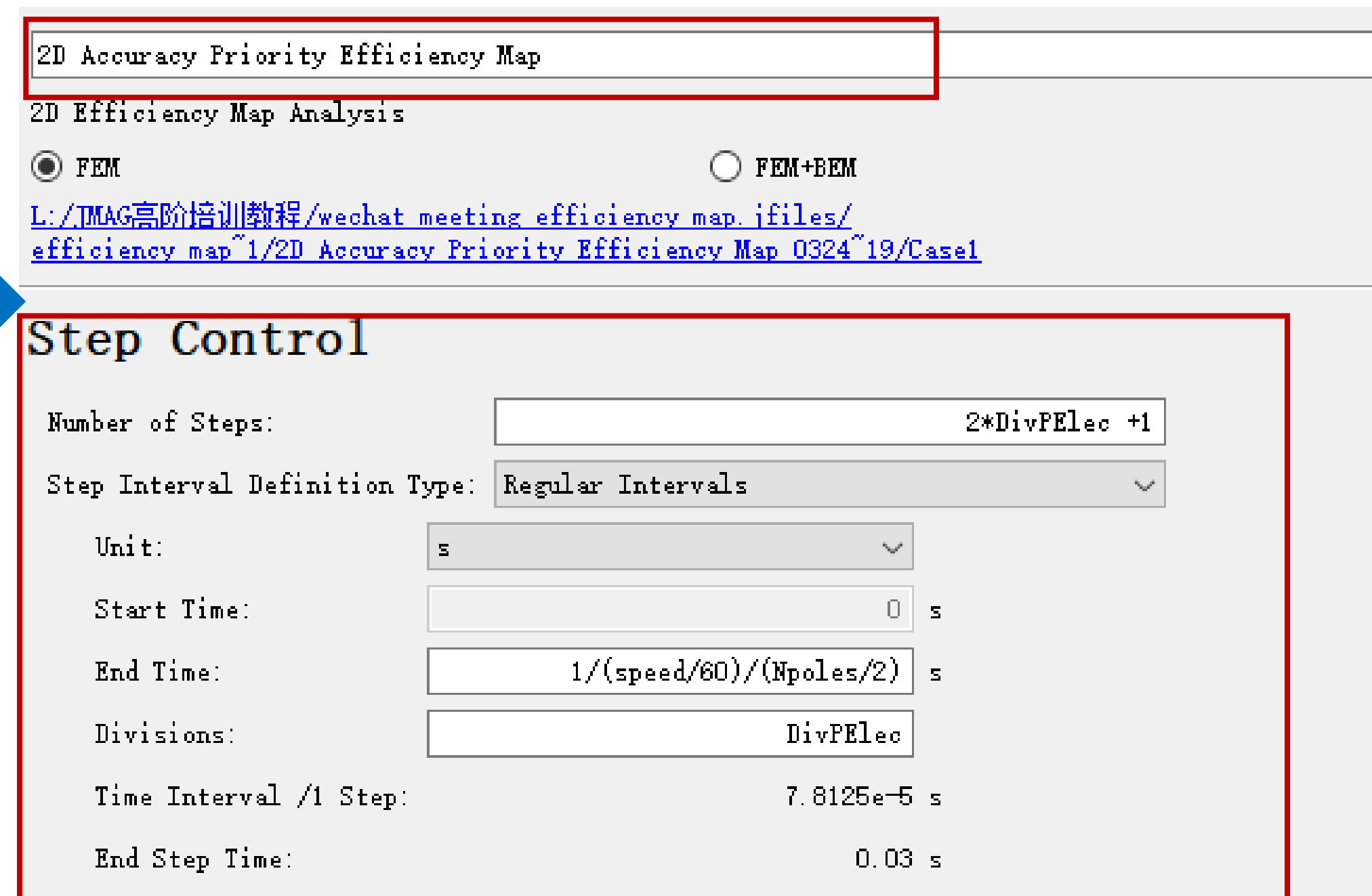
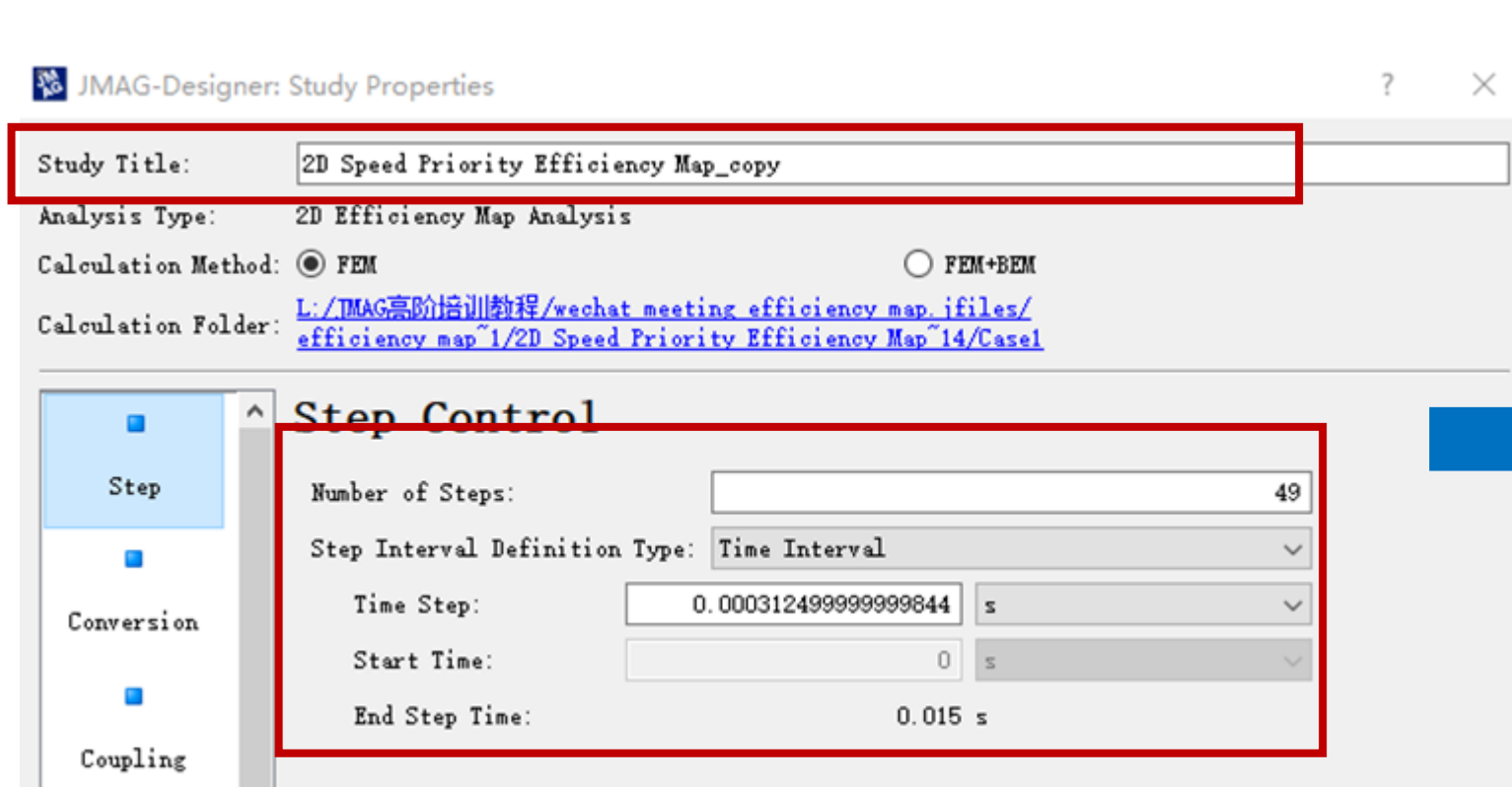
■ 设置参数化



- Npoles: 极数
- Rph:电阻
- Vdc:直流电压
- Imax:最大电流
- Speed:速度
- Imap:电流幅值
- Beta:电流相位角
- Cfreq:载波频率
- Ciamp:谐波幅值
- DivPElec:划分数

	Variable	Type	Expression
1	Npoles	value	8
2	Rph	value	0.048
3	Vdc	value	600
4	Imax	value	250
5	speed	value	1000
6	Imap	value	94.3304
7	beta	value	52.926
8	Cfreq	value	10000
9	Clamp	Expression	0.1*Imap
10	DivPElec	Expression	96

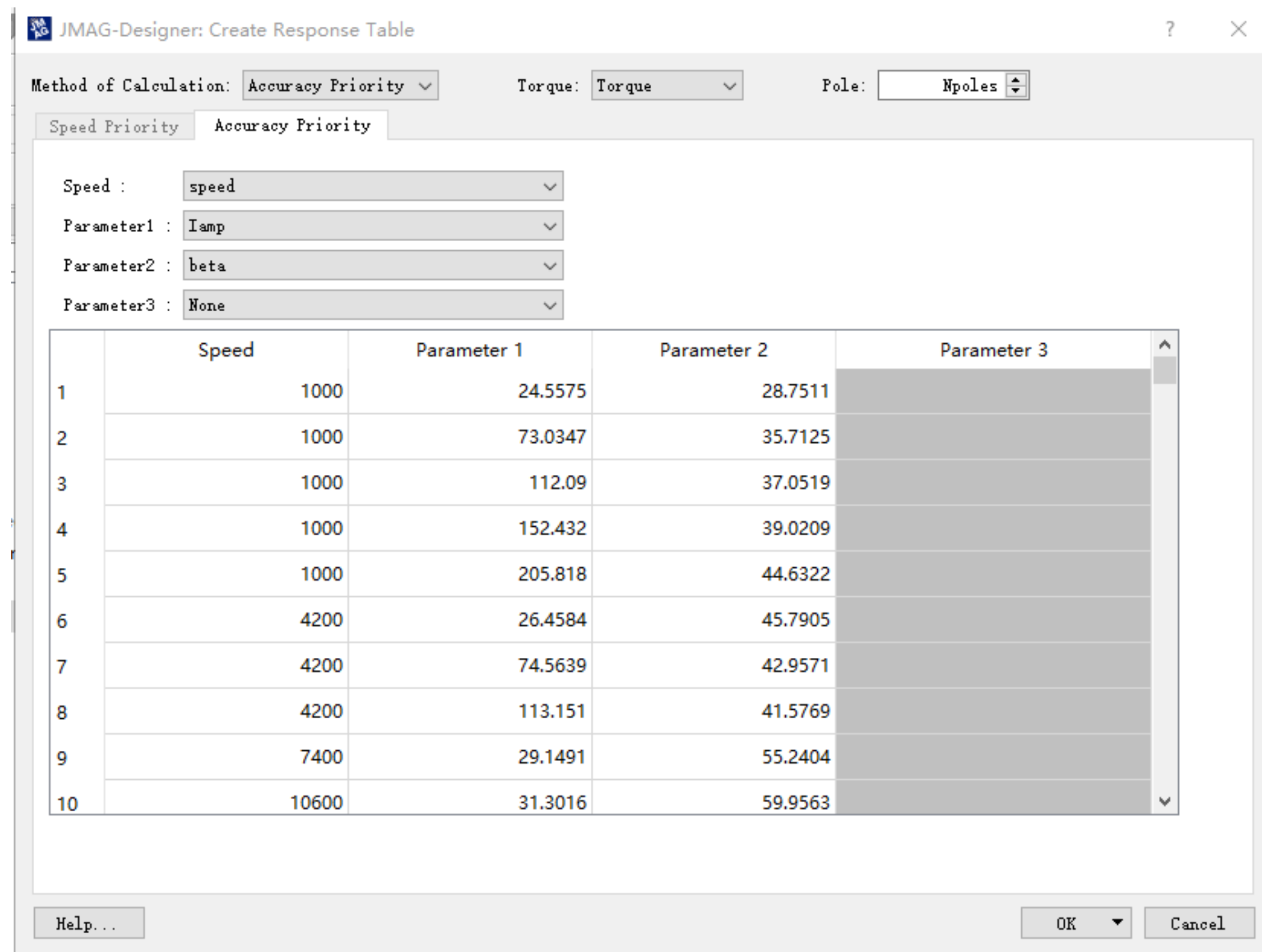
■ 修改名称及步数设置



➤ 为使仿真达到稳态，运行两个电周期

■ 设定响应表，选择响应参数

- Speed:选择速度参数
- Parameter:参数选择，可选择参数设置中所有参数。
- Method of Calculation: 精度优先
- Torque:转矩条件
- Pole:级数
- 设置完成点击OK



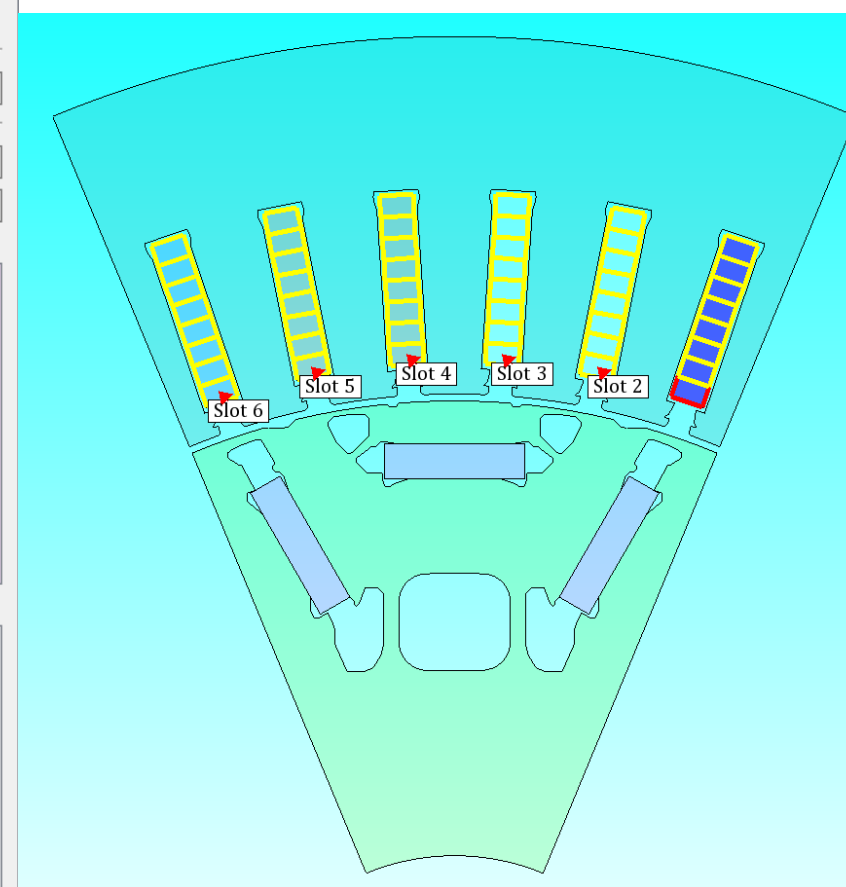
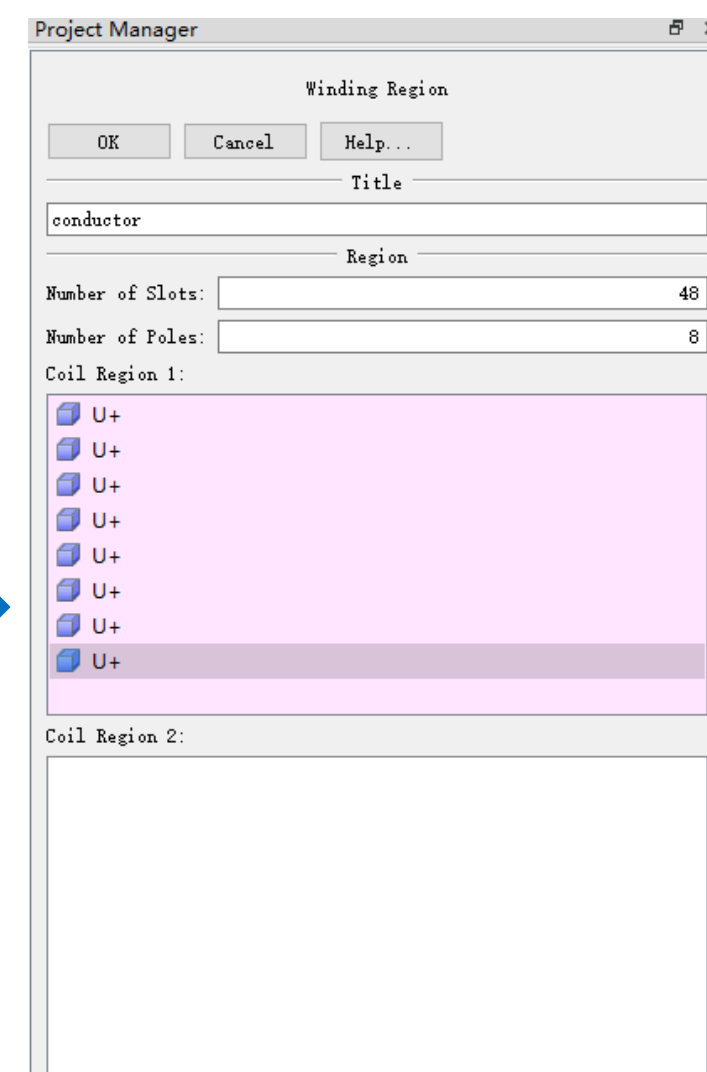
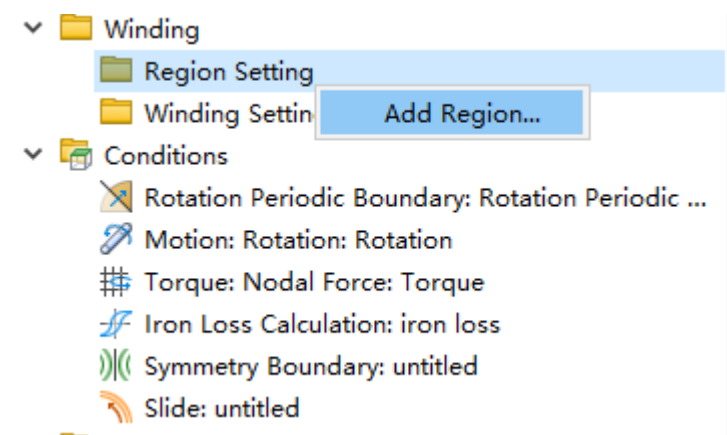
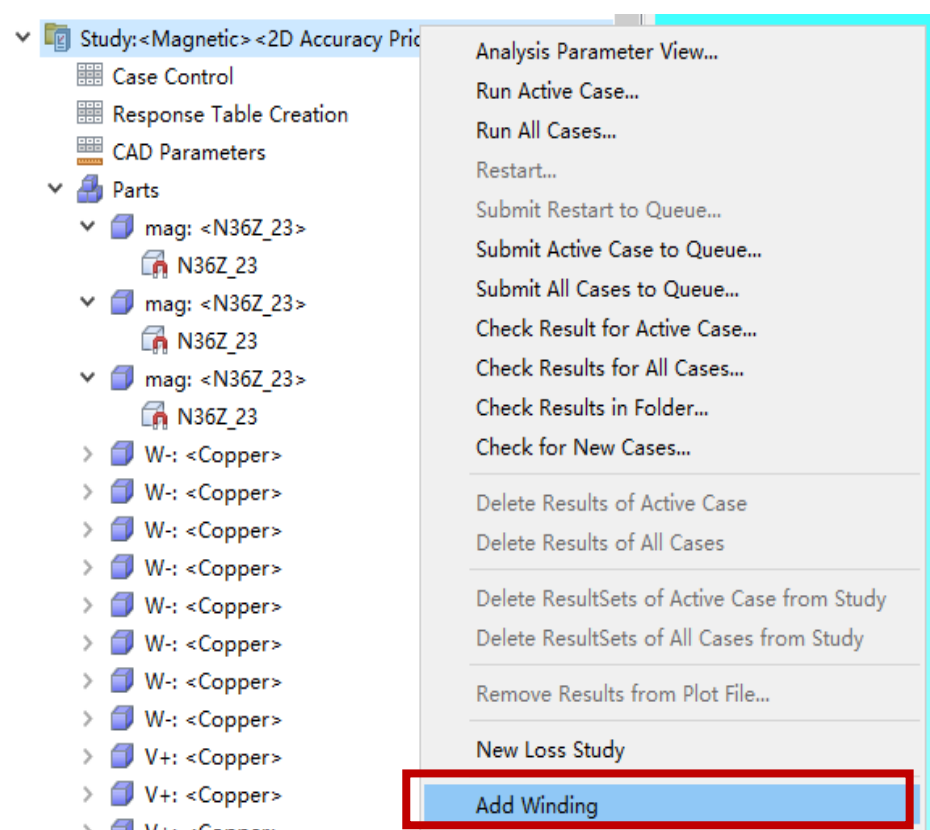
The dialog box "JMAG-Designer: Create Response Table" is shown. It has a title bar with a question mark and a close button. The "Method of Calculation" is set to "Accuracy Priority". The "Torque" is set to "Torque". The "Pole" is set to "Npoles". There are two tabs: "Speed Priority" and "Accuracy Priority". The "Speed Priority" tab is selected. It contains four dropdown menus: "Speed" (set to "speed"), "Parameter1" (set to "Iamp"), "Parameter2" (set to "beta"), and "Parameter3" (set to "None"). Below these is a table with 10 rows and 5 columns: "Speed", "Parameter 1", "Parameter 2", "Parameter 3", and an empty column. The table data is as follows:

	Speed	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	
1	1000	24.5575	28.7511		
2	1000	73.0347	35.7125		
3	1000	112.09	37.0519		
4	1000	152.432	39.0209		
5	1000	205.818	44.6322		
6	4200	26.4584	45.7905		
7	4200	74.5639	42.9571		
8	4200	113.151	41.5769		
9	7400	29.1491	55.2404		
10	10600	31.3016	59.9563		

At the bottom, there are buttons for "Help...", "OK", and "Cancel".

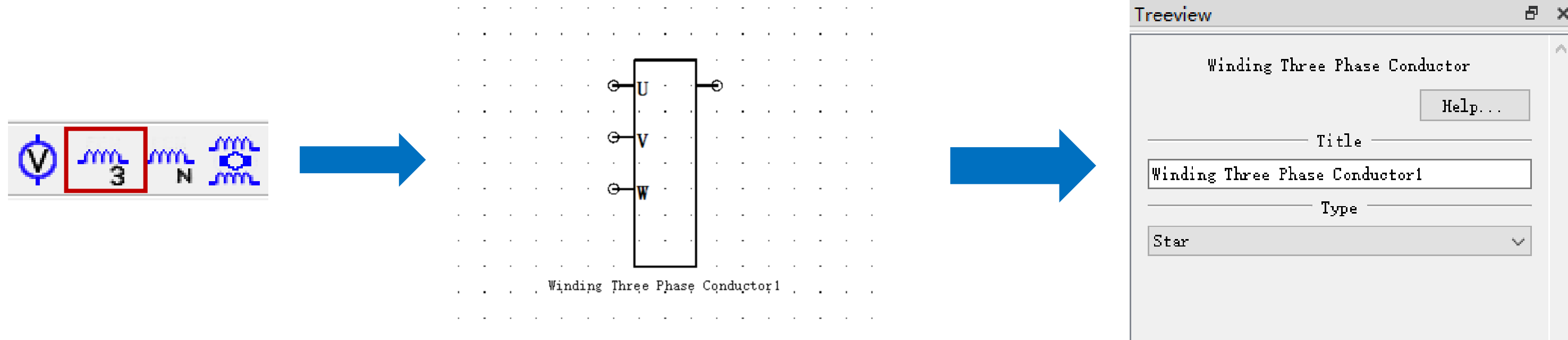
■ 设定绕组条件

- 电机绕组设置为Hair pin，将coil更改为conductor。
- 将原绕组条件删除，study右键选择Add Winding使用绕组编辑器进行导体设置
- Region Setting右键选择Add Region，设置绕组区域
- 更改名称，设置槽数48，极数8。选择U相所有导体在Region 1。



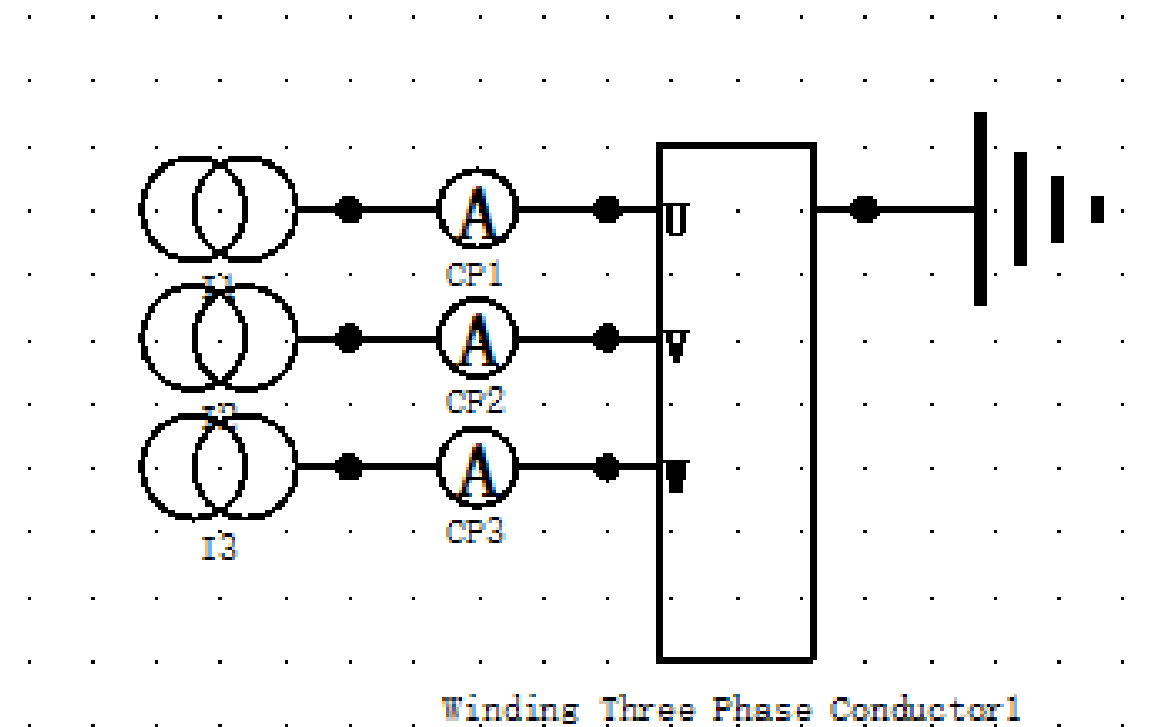
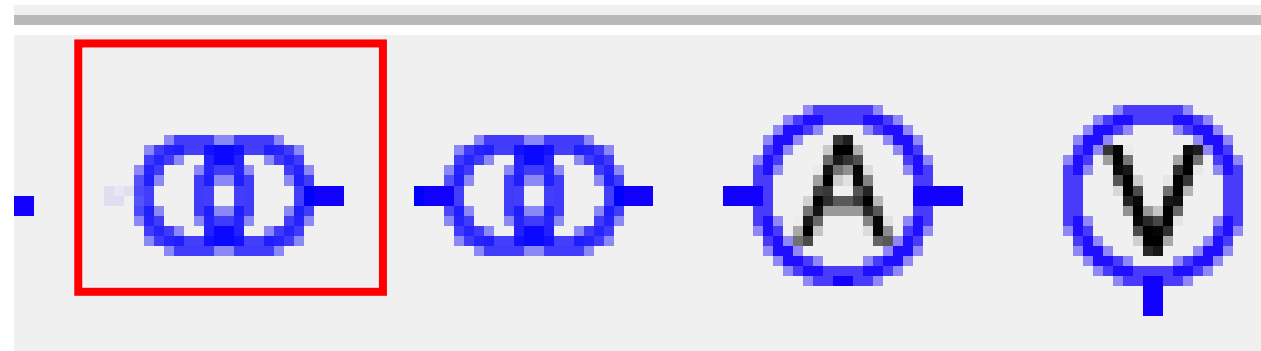
■ 设定导体

- 进入外电路编辑器，选择三相conductor。
- 双击Winding Three Phase Conductor1,设置名称及连接方式



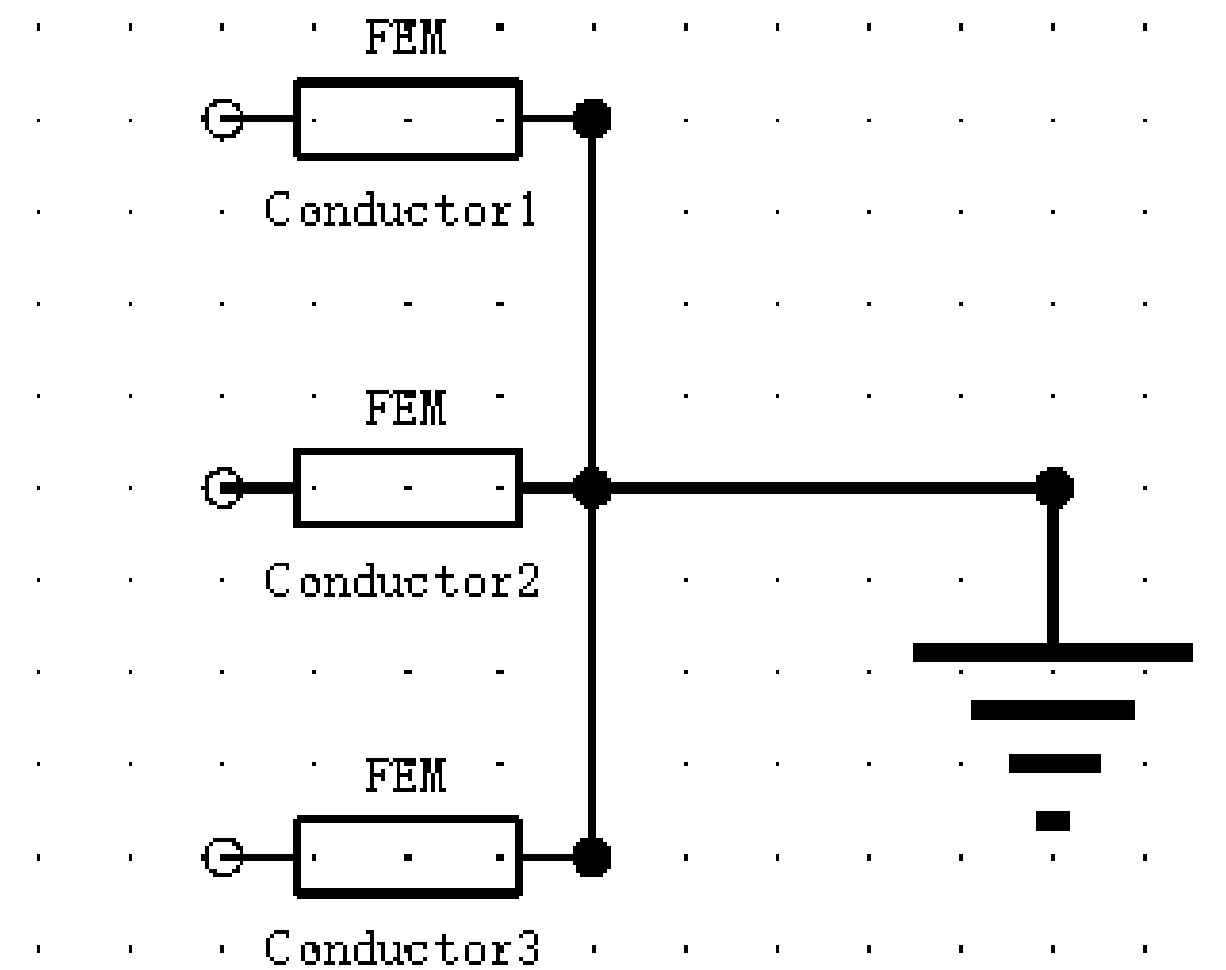
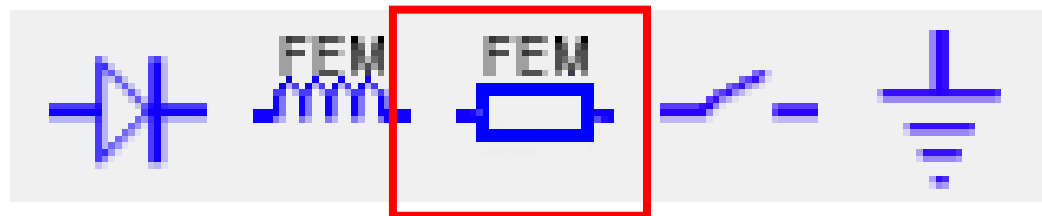
■ 设定外电路

➤ 进入外电路设置，选择电流源供电，连接电路如图所示



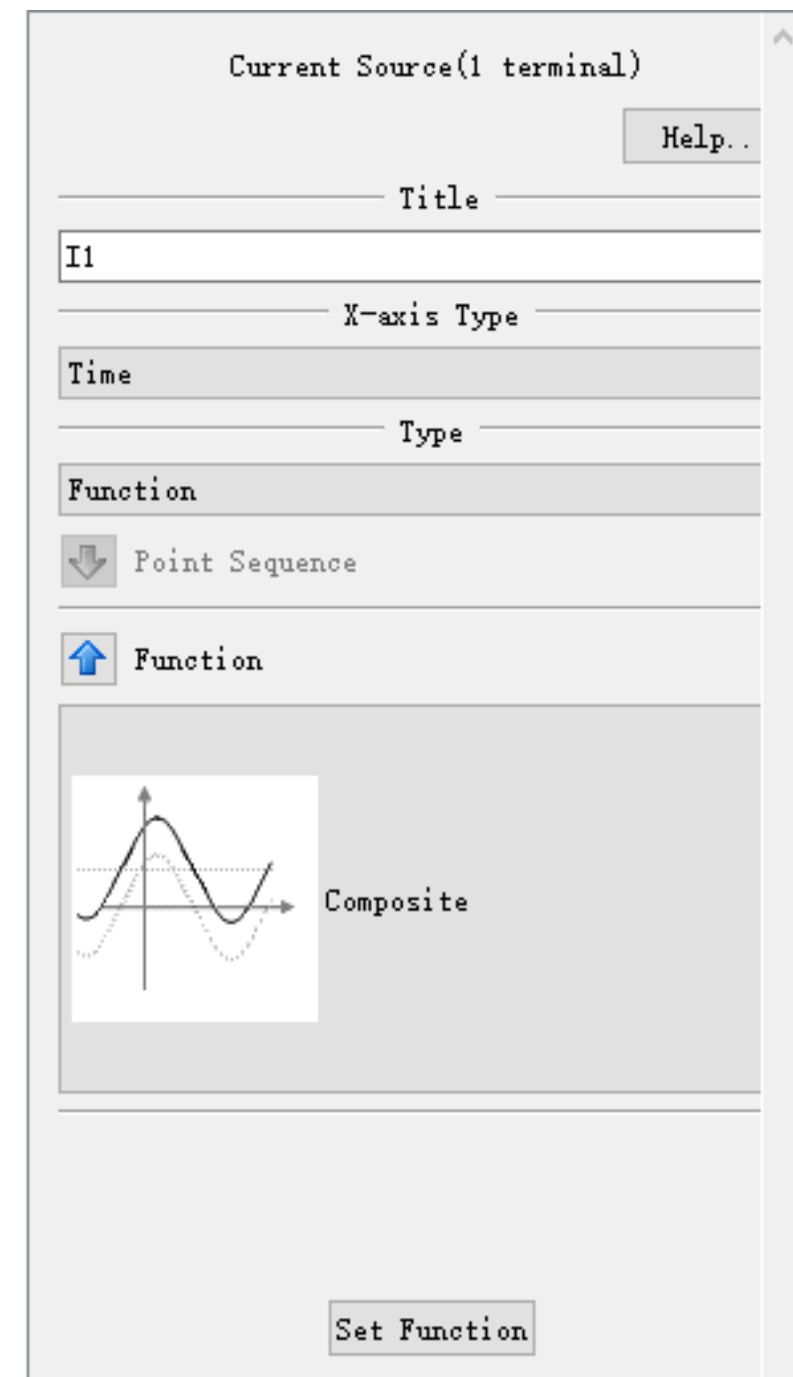
■ 设定外电路

➤ 需要对永磁体涡流损耗进行分析，创建永磁体导体，连接导体如下。



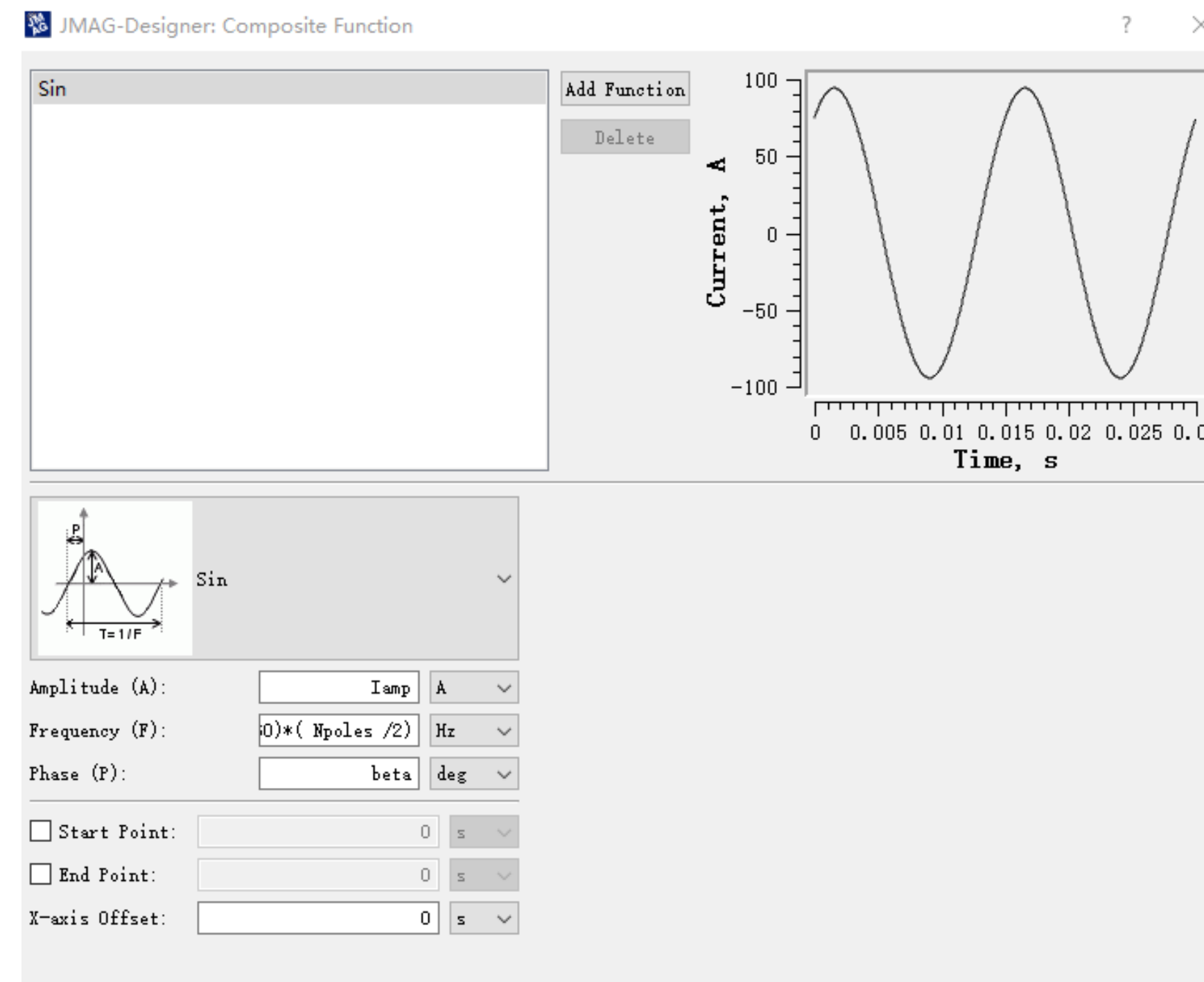
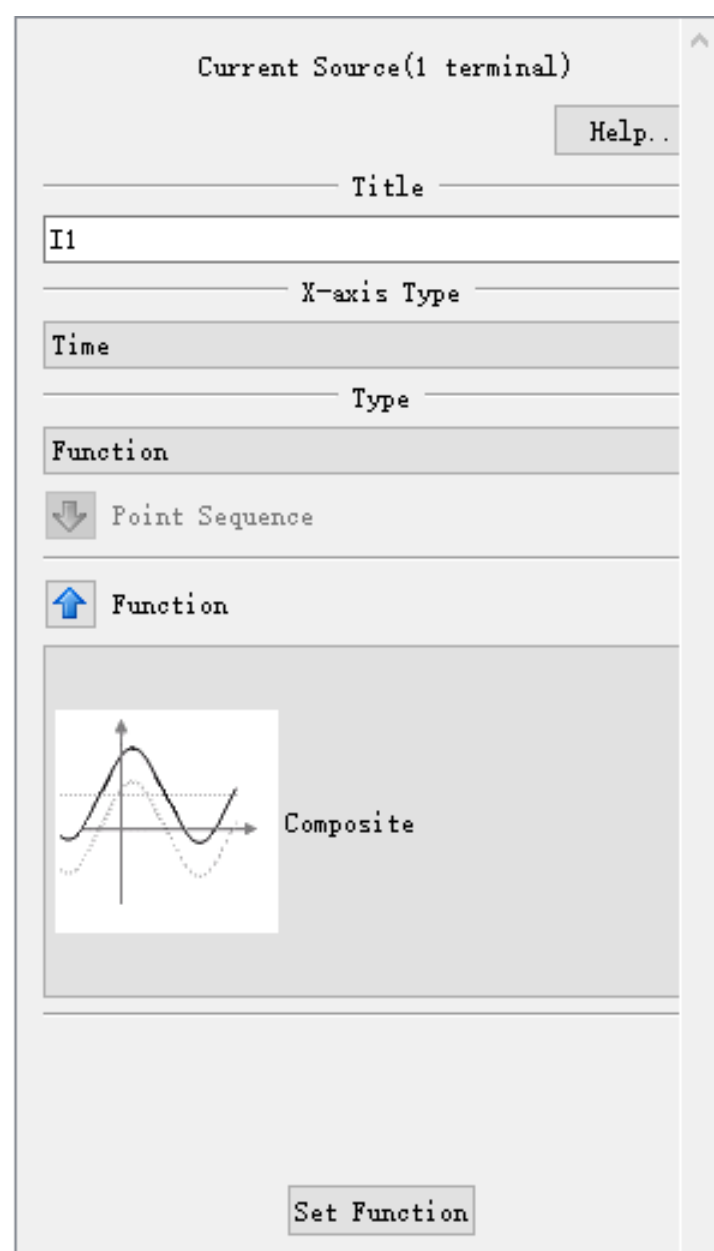
■ 设定电流源

- 设置PWM电流。双击电流源，之后双击I1，进入电流设置。
- 电流源类型（Type）可设置为Function(函数)、Point Sequence(数据列)、External Circuit Simulator(外部电路模拟器)，选择Function。
- Function中选择类型如下：
 - [Constant]：直流
 - [Sin]：正弦
 - [Exp]：指数
 - [Pulse]：脉冲
 - [Step] (rectangular function)：方波
 - [Composite]：复合
 - [Harmonic]：谐波
- 选择Composite



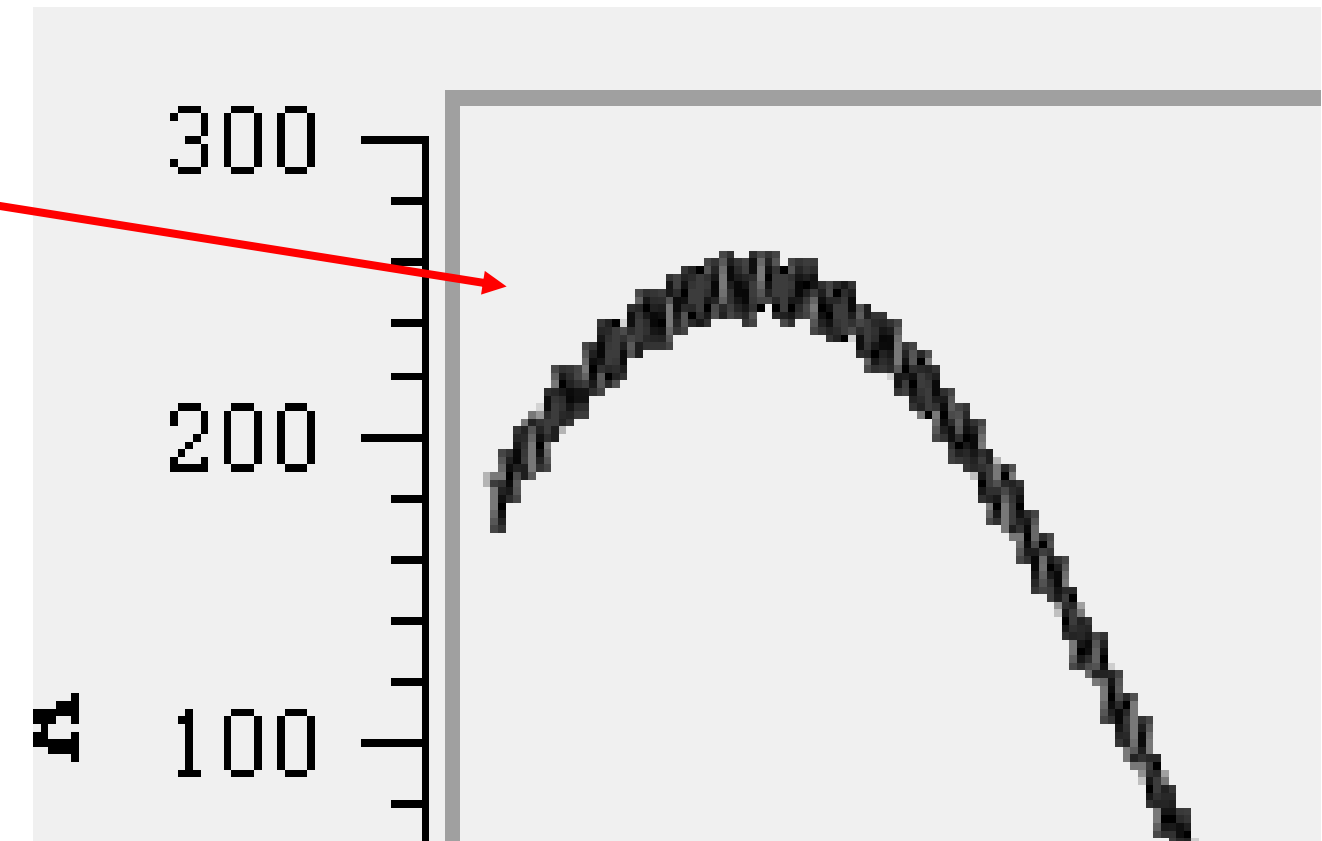
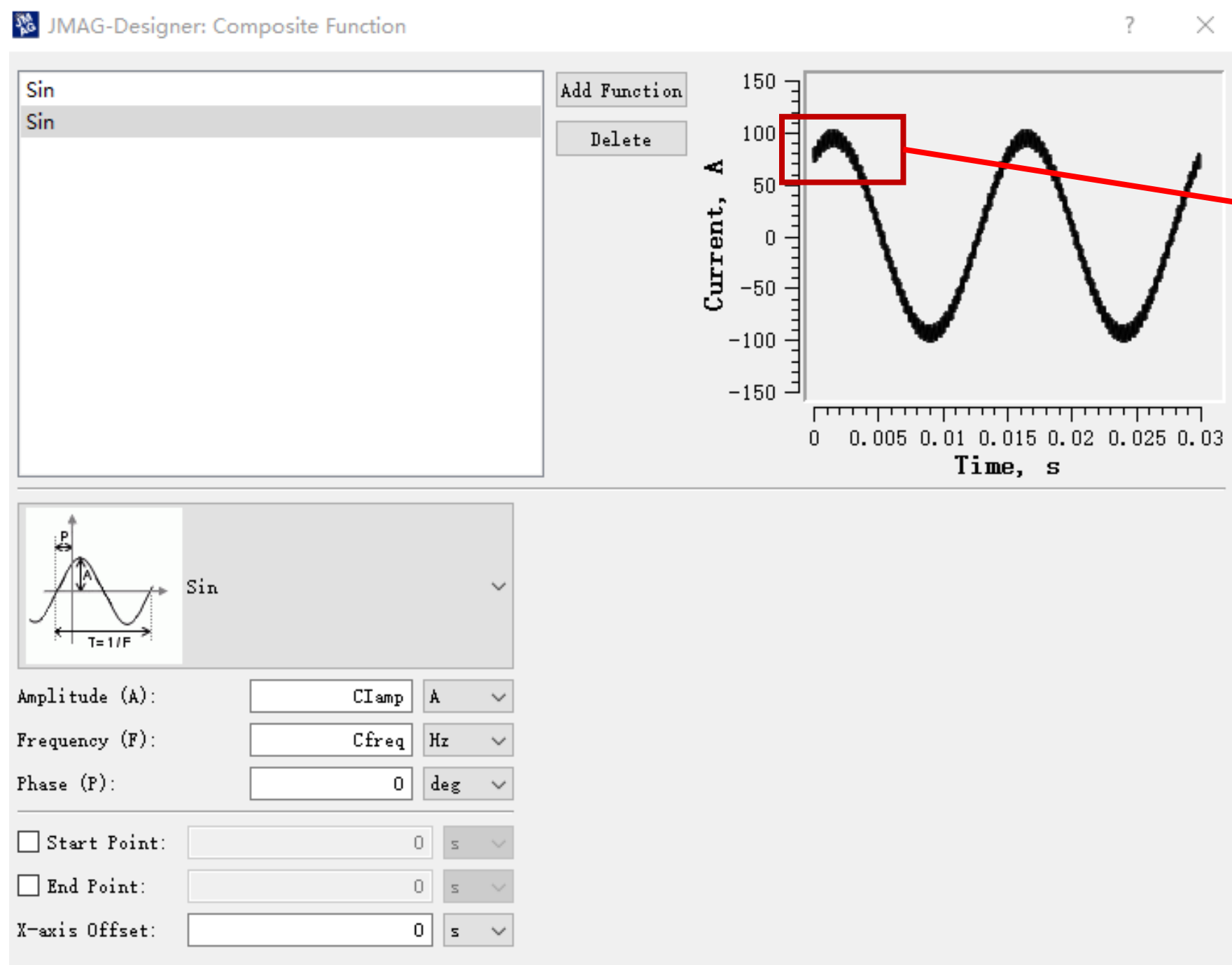
■ 设定电流源

- 选择Set Function，进入电流设置。
- 设置基波电流。将电流类型改为sin，并将幅值、频率及相位分别设置为如图中所示参数。



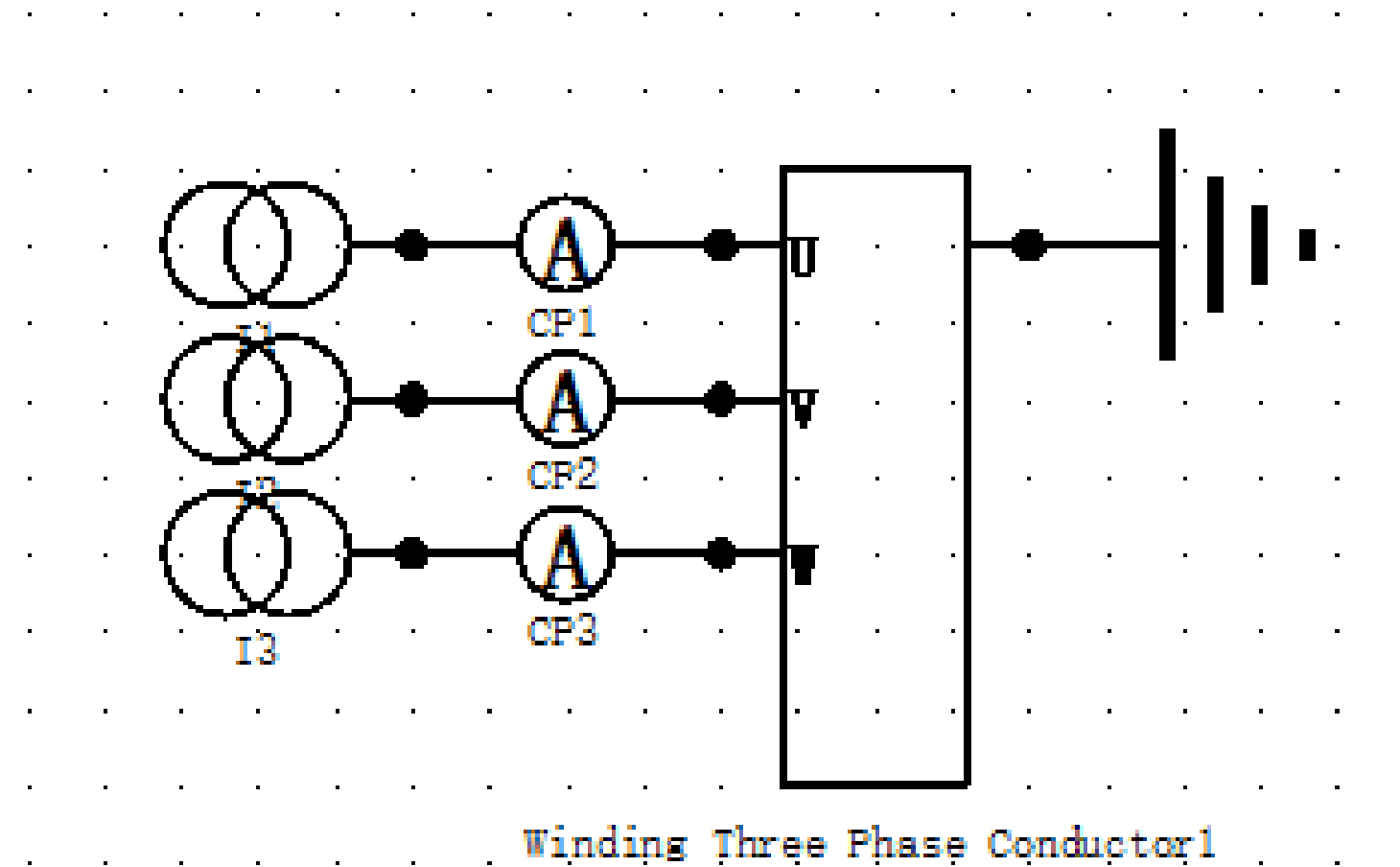
■ 设定电流源

- 设置谐波电流。点击Add Function, 选择sin, 并设置幅值、频率、相位。案例选择10kHz。

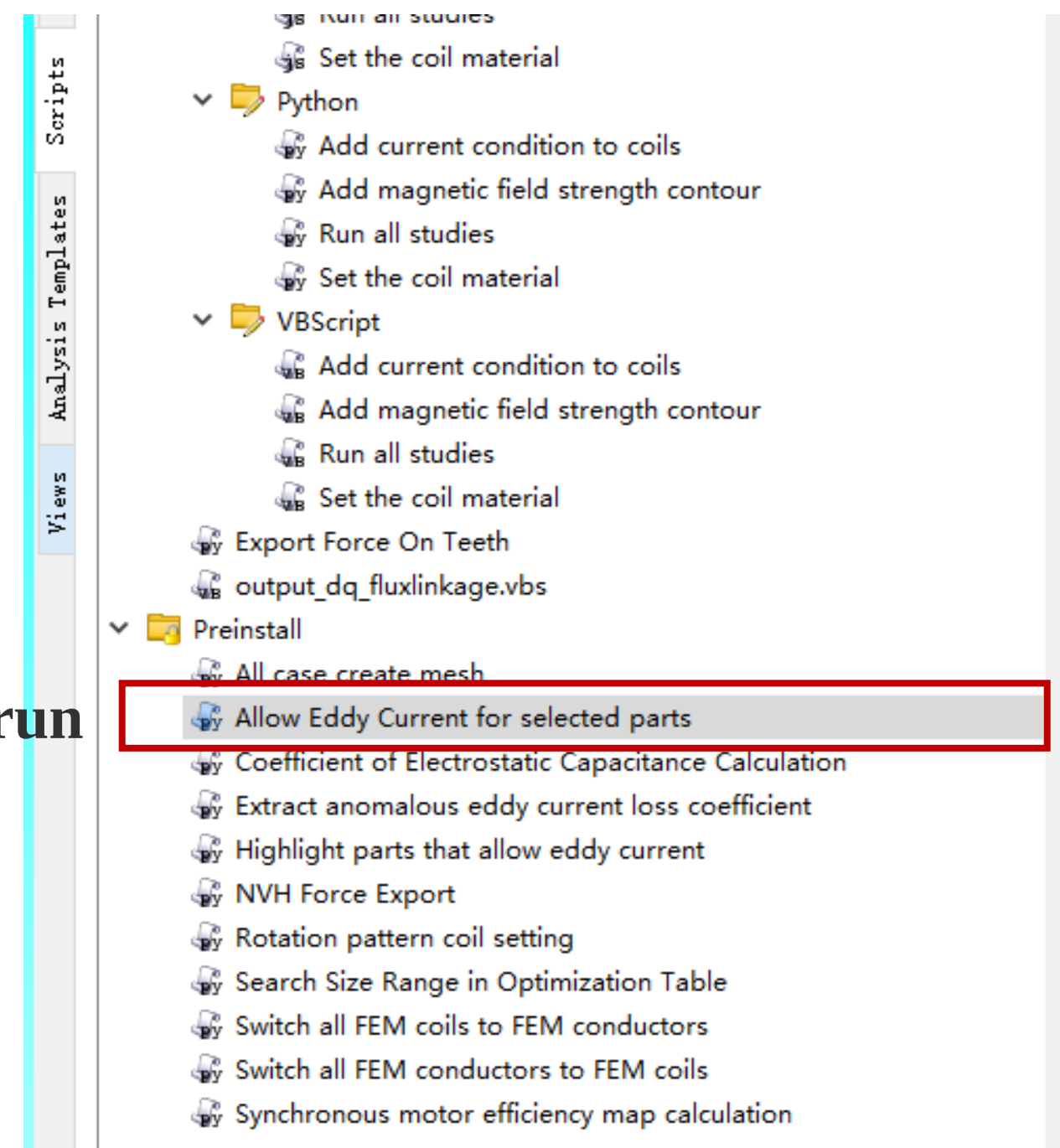
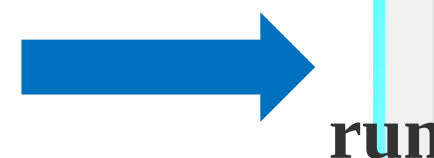
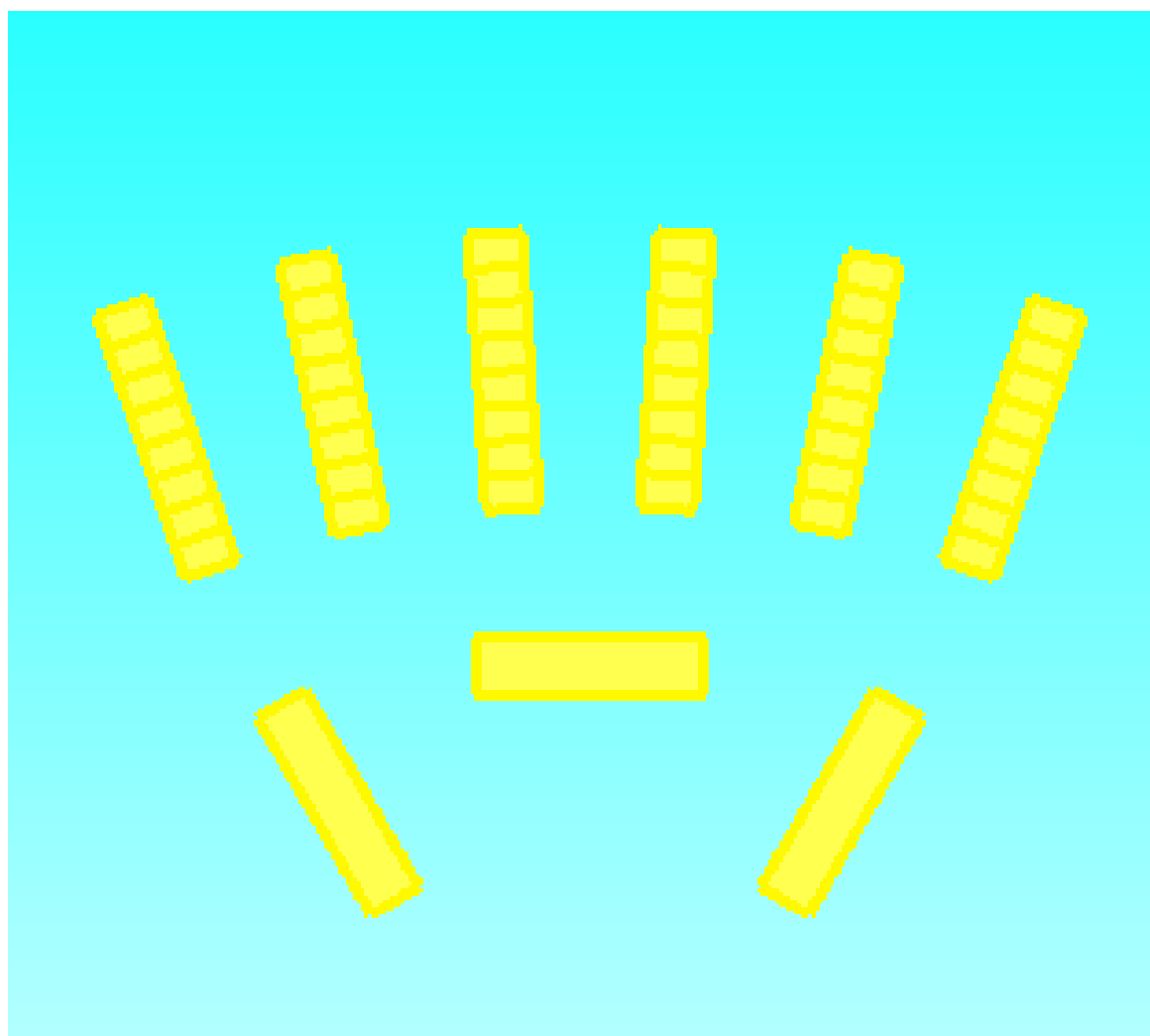


■ 设定电流源

- 同样方法设置V相、W相，并注意设置相位差120电角度。
- 设置完成外电路如下图所示。

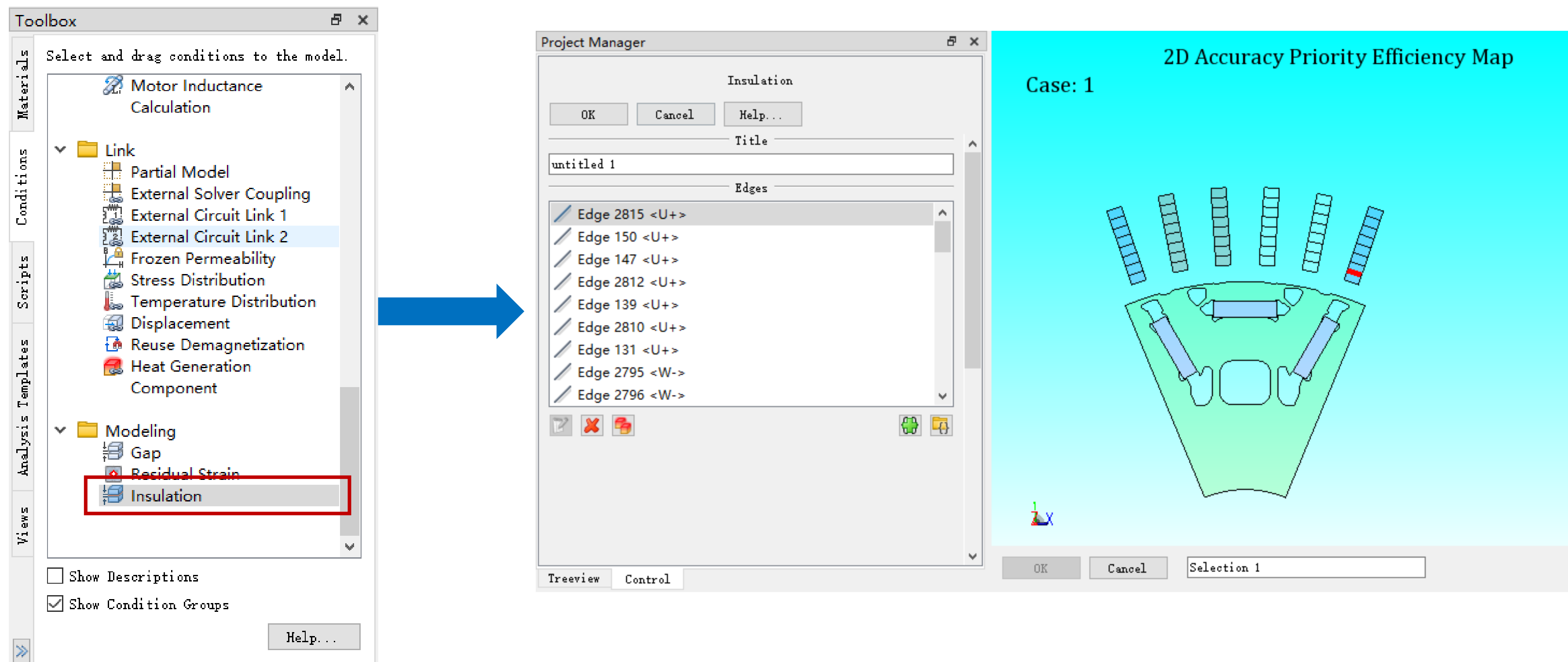


- 设定允许涡流计算
- 精度优先可进行AC损耗计算。将定、转子隐藏，框选绕组及永磁体，并设置材料电阻率或者电导率。
- 选择工具箱中脚本：Allow Eddy Current for selected parts，右键选择run,设置涡流。

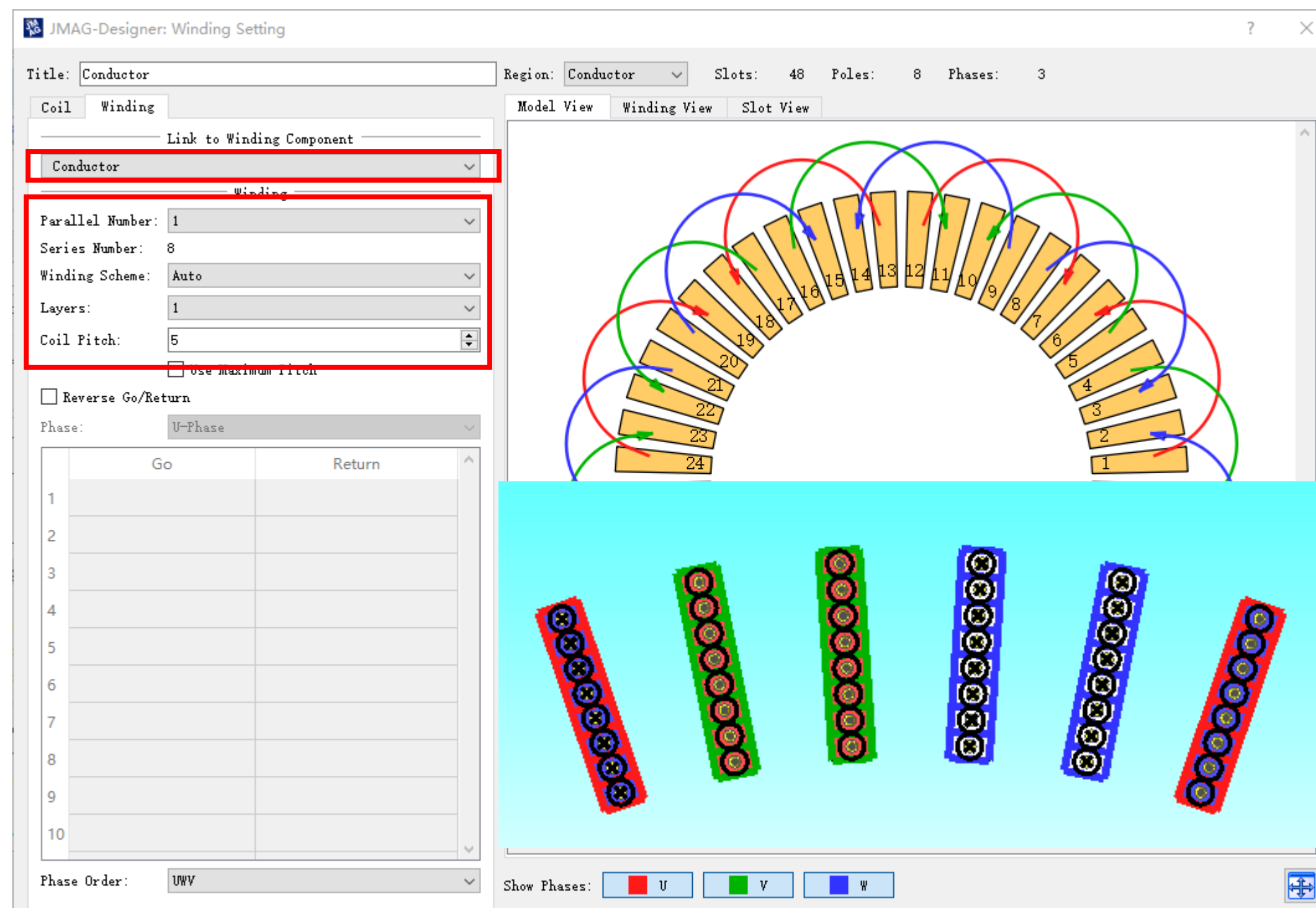
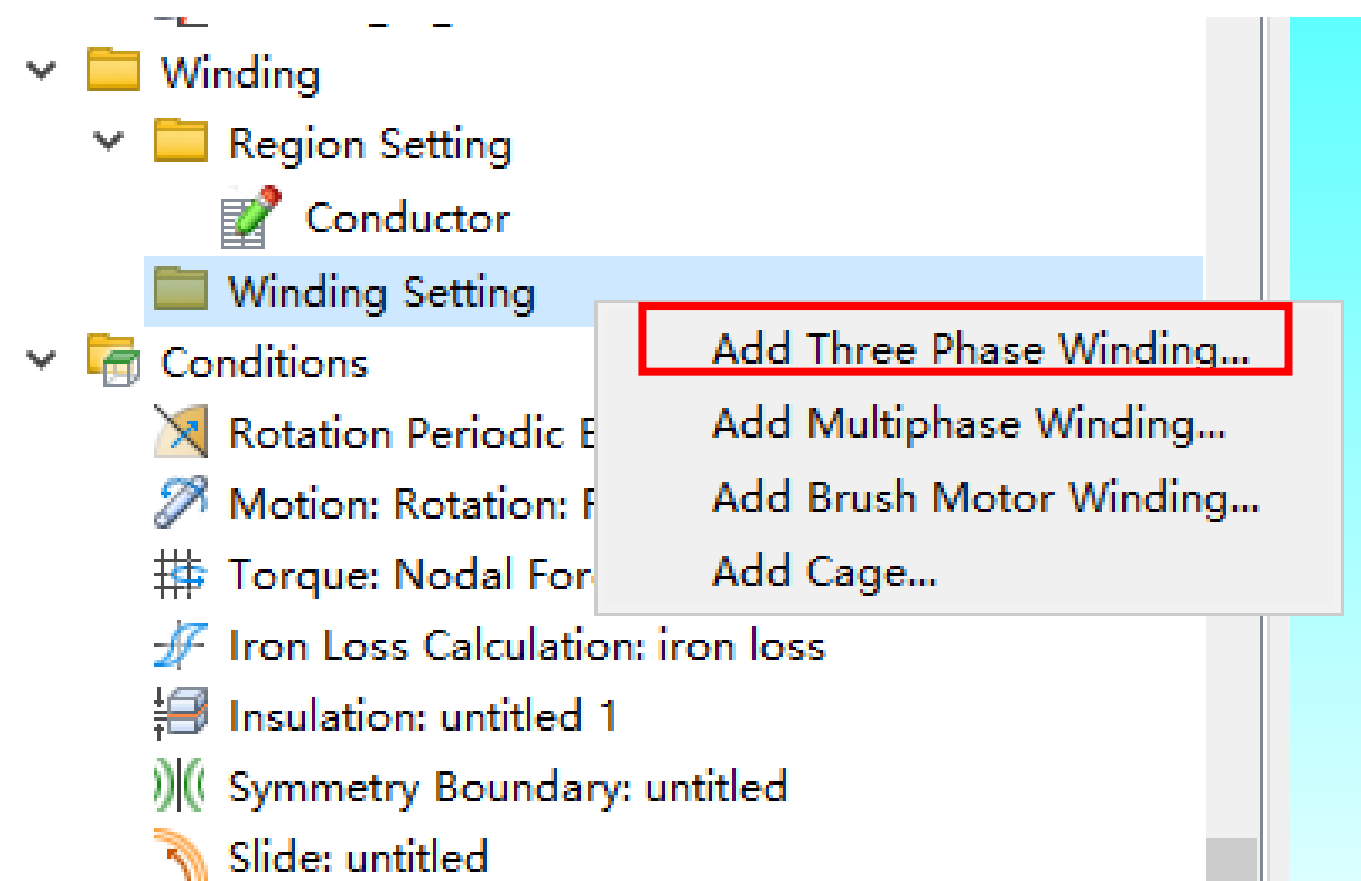


■ 设定绝缘

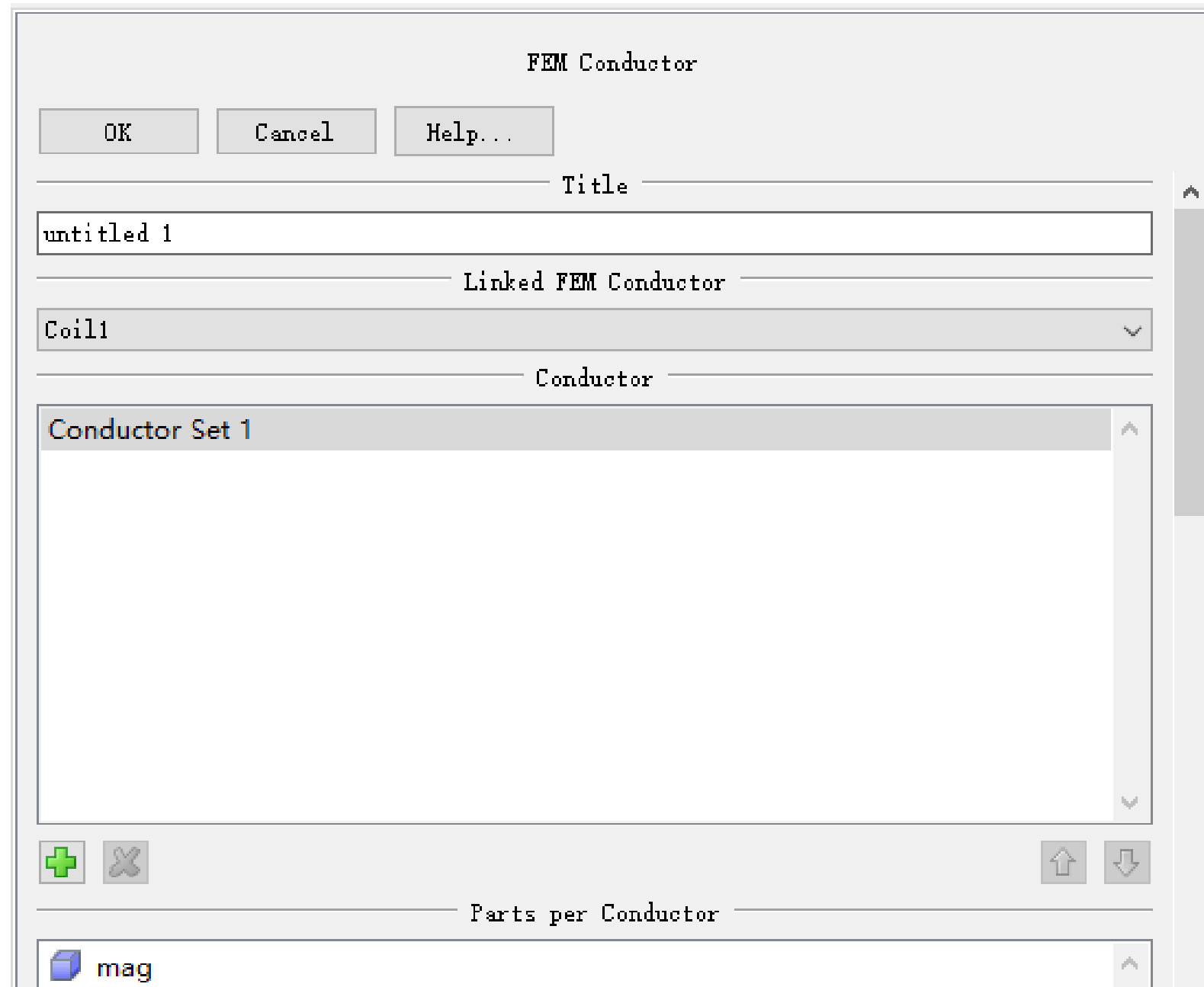
➤ 右侧工具箱选择绝缘条件，并选择导体间线作为绝缘，如下图所示。



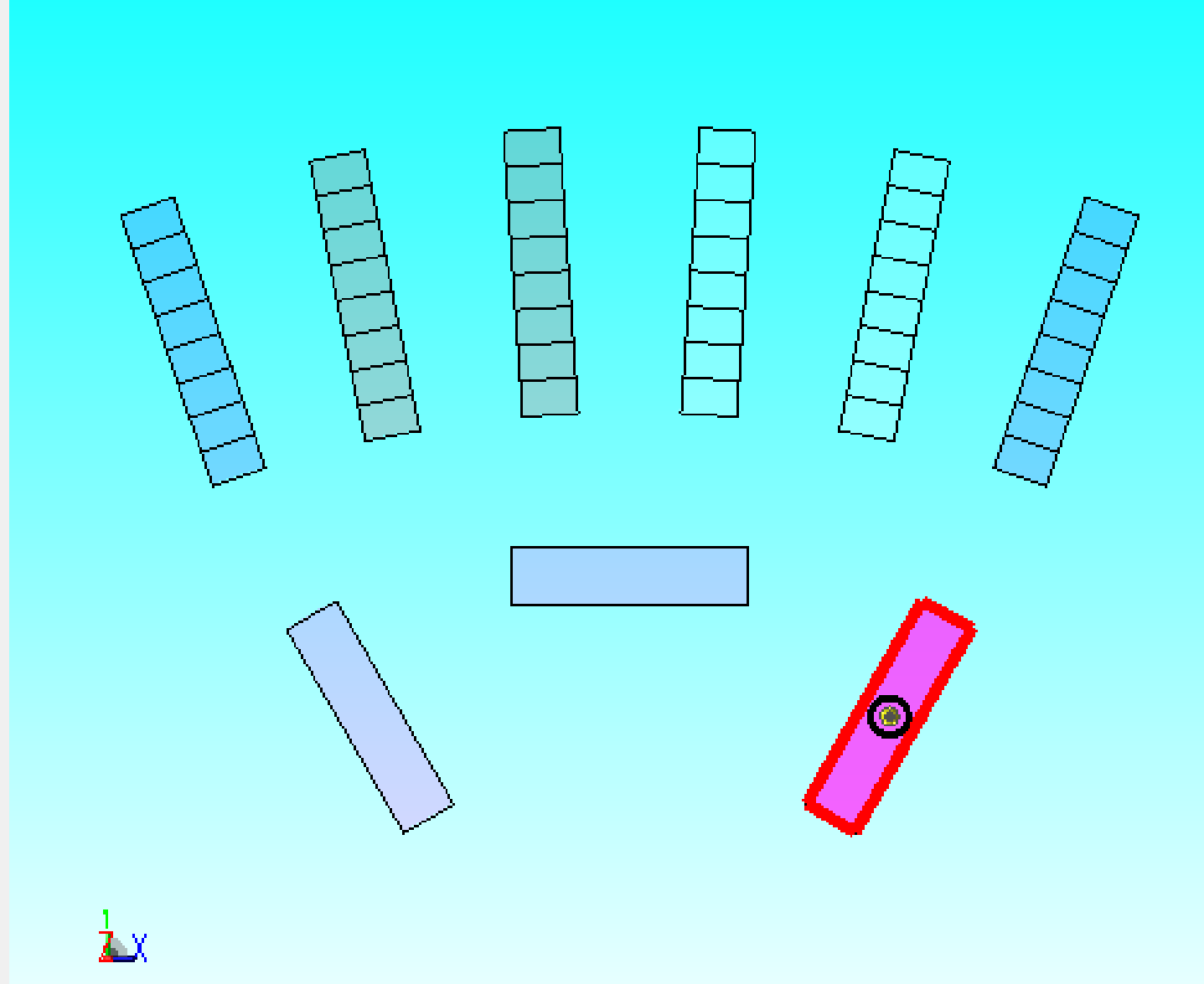
- 设定有限元导体链接
- Winding条件下右键选择Winding Setting, 选择Add Three Phase Winding
- 设置链接导体及节距等。



- 设定永磁体导体
- 将永磁体设置为conductor,
- 将永磁体conductor与外电路链接



efficiency2_accuracy1_PWM_compenent_more_workin
Case: 1



■ 按照工况点生成case

- 进入响应表设置，点击OK下拉箭头[OK (Create Cases)]

JMAG-Designer: Create Response Table

Method of Calculation: Accuracy Priority Torque: Torque Pole: Npoles

Speed Priority Accuracy Priority

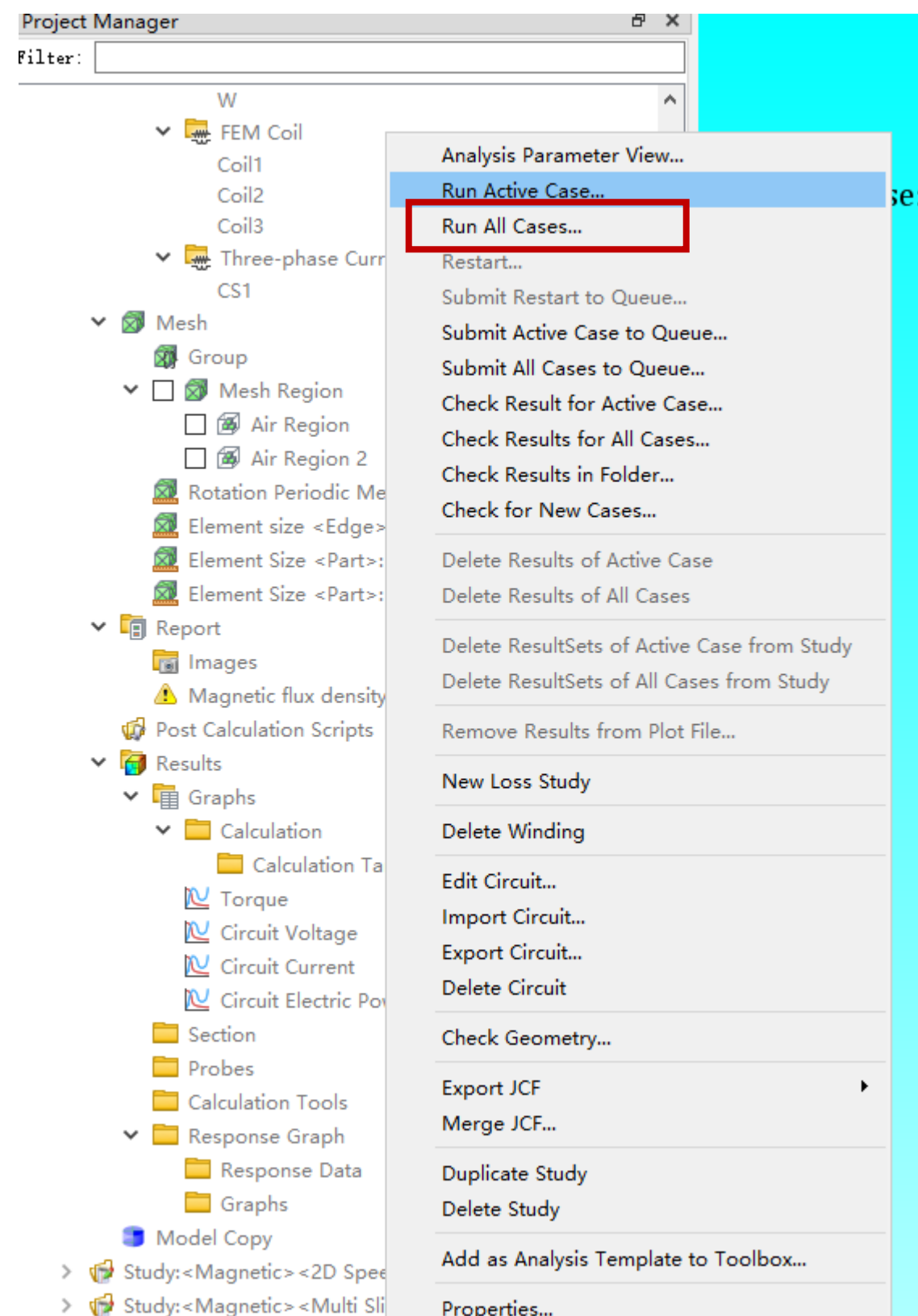
Speed : speed
Parameter1 : Iamp
Parameter2 : beta
Parameter3 : None

	Speed	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
1	1000	24.5575	28.7511	
2	1000	73.0347	35.7125	
3	1000	112.09	37.0519	
4	1000	152.432	39.0209	
5	1000	205.818	44.6322	
6	4200	26.4584	45.7905	
7	4200	74.5639	42.9571	
8	4200	113.151	41.5769	
9	7400	29.1491	55.2404	
10	10600	31.3016	59.9563	

Help... OK Cancel

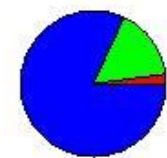
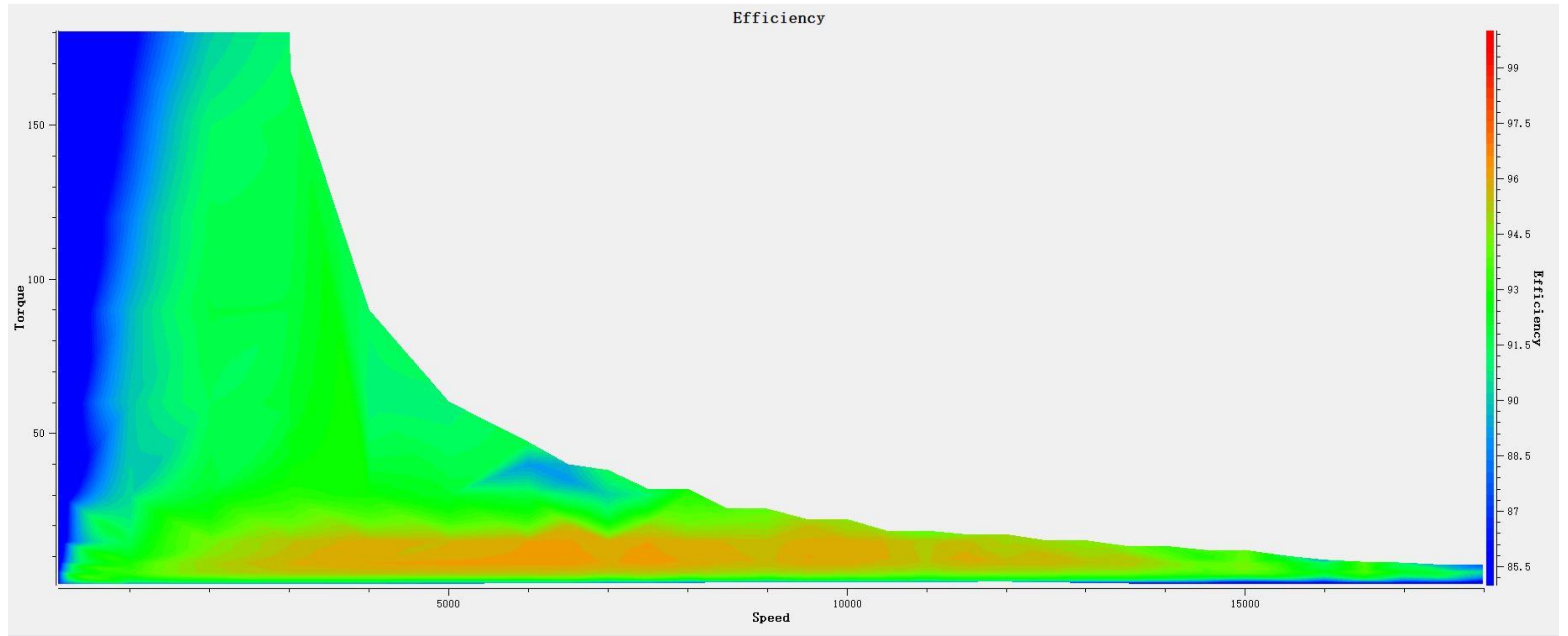
OK
OK(Create Cases)

■ 运行计算

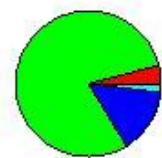


6、分析结果

■ 效率图

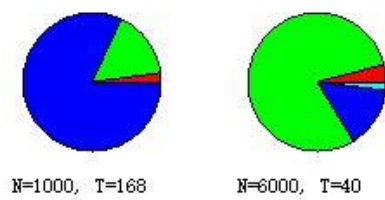
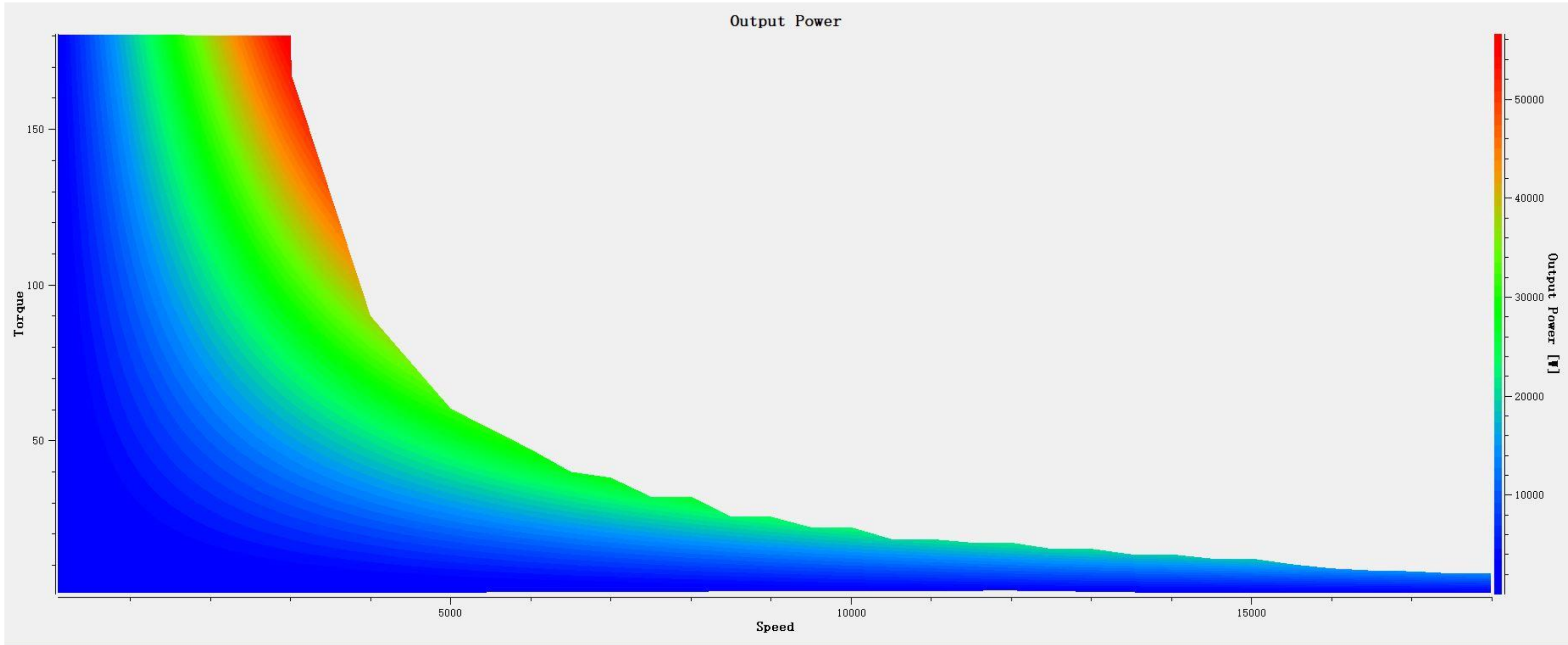


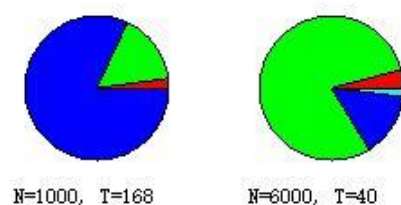
N=1000, T=168



N=6000, T=40

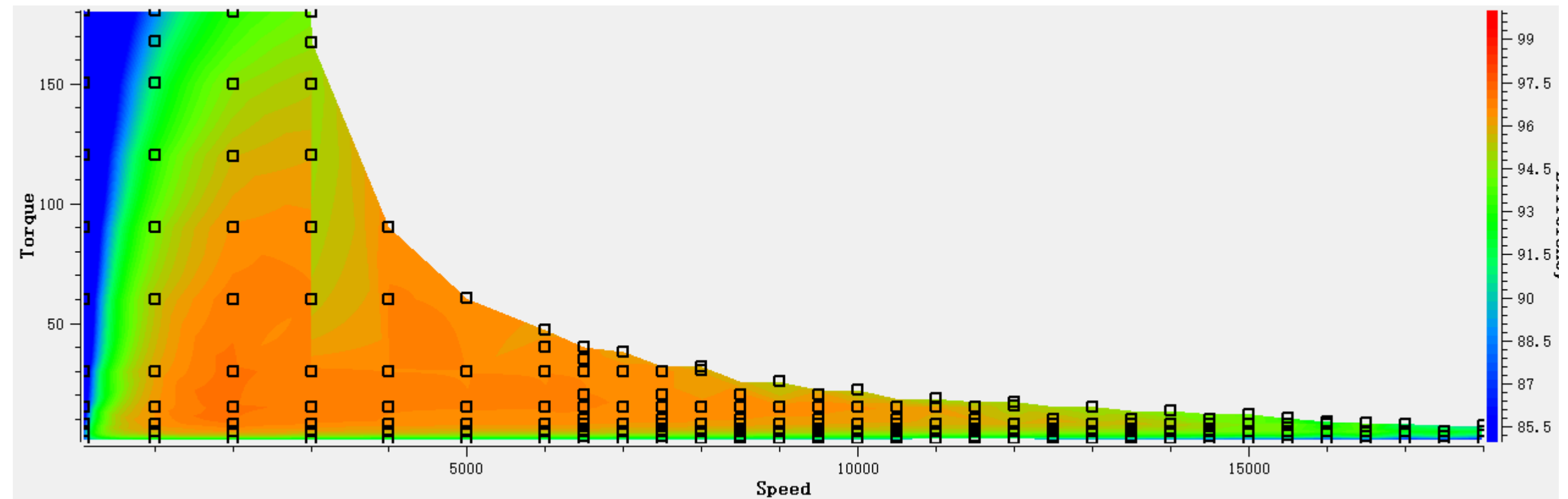
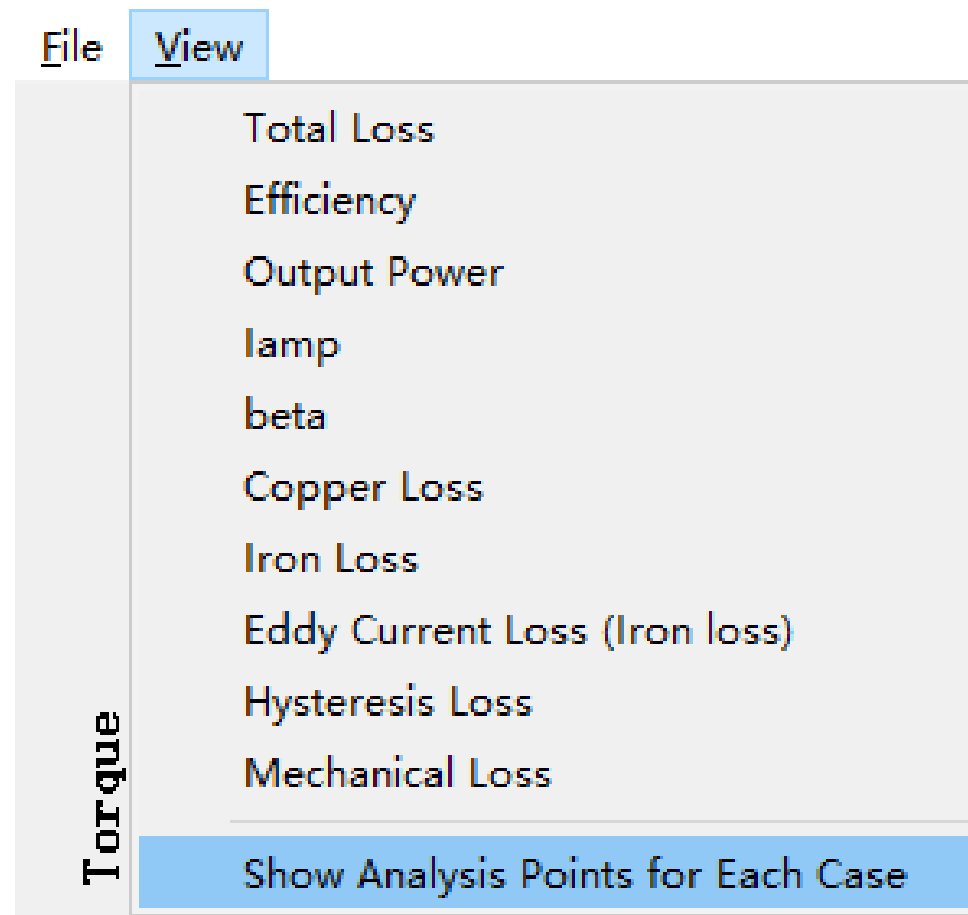
■ 功率图





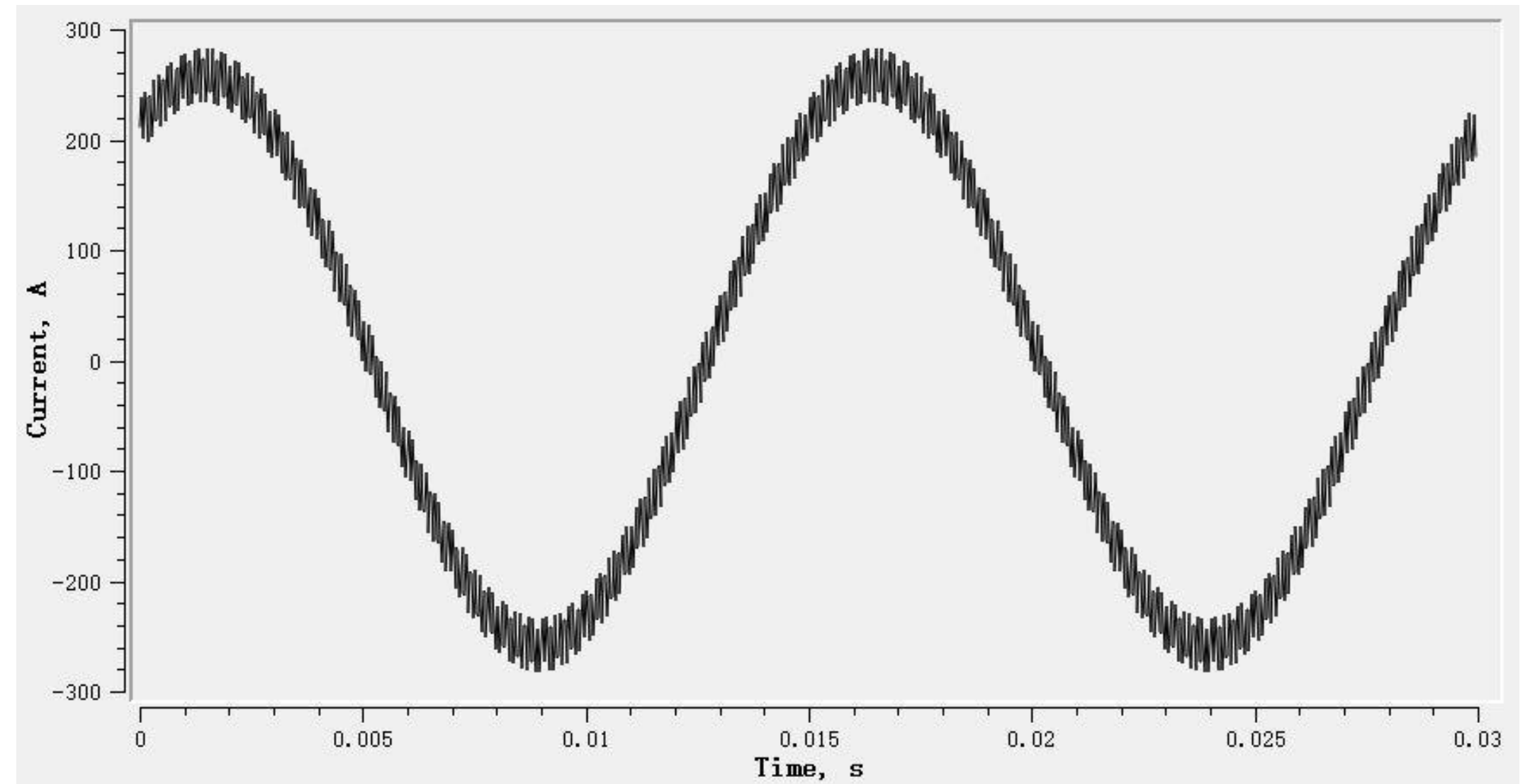
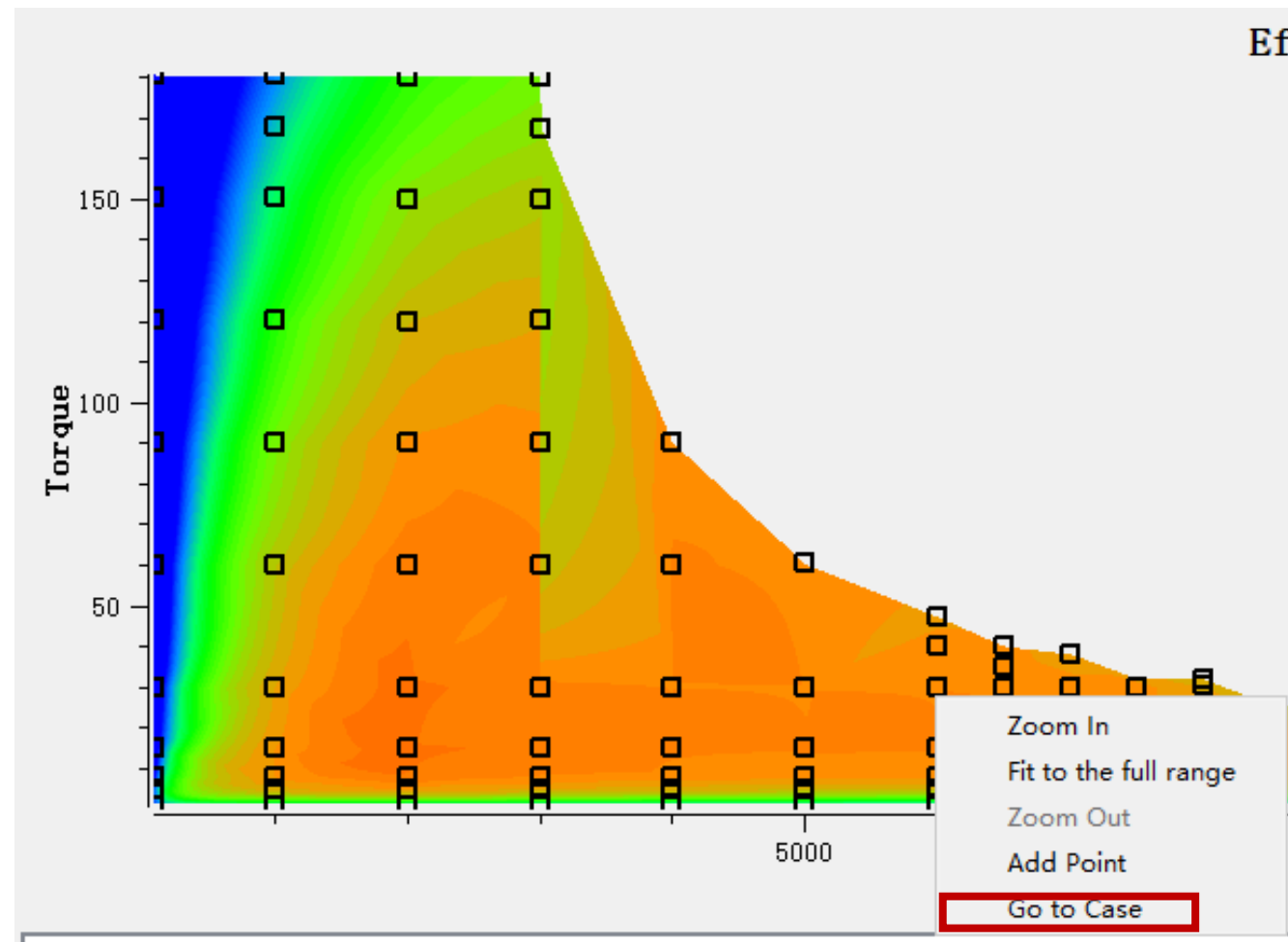
■ 跳转case功能

➤ View-Show Analysis Points for Each Case



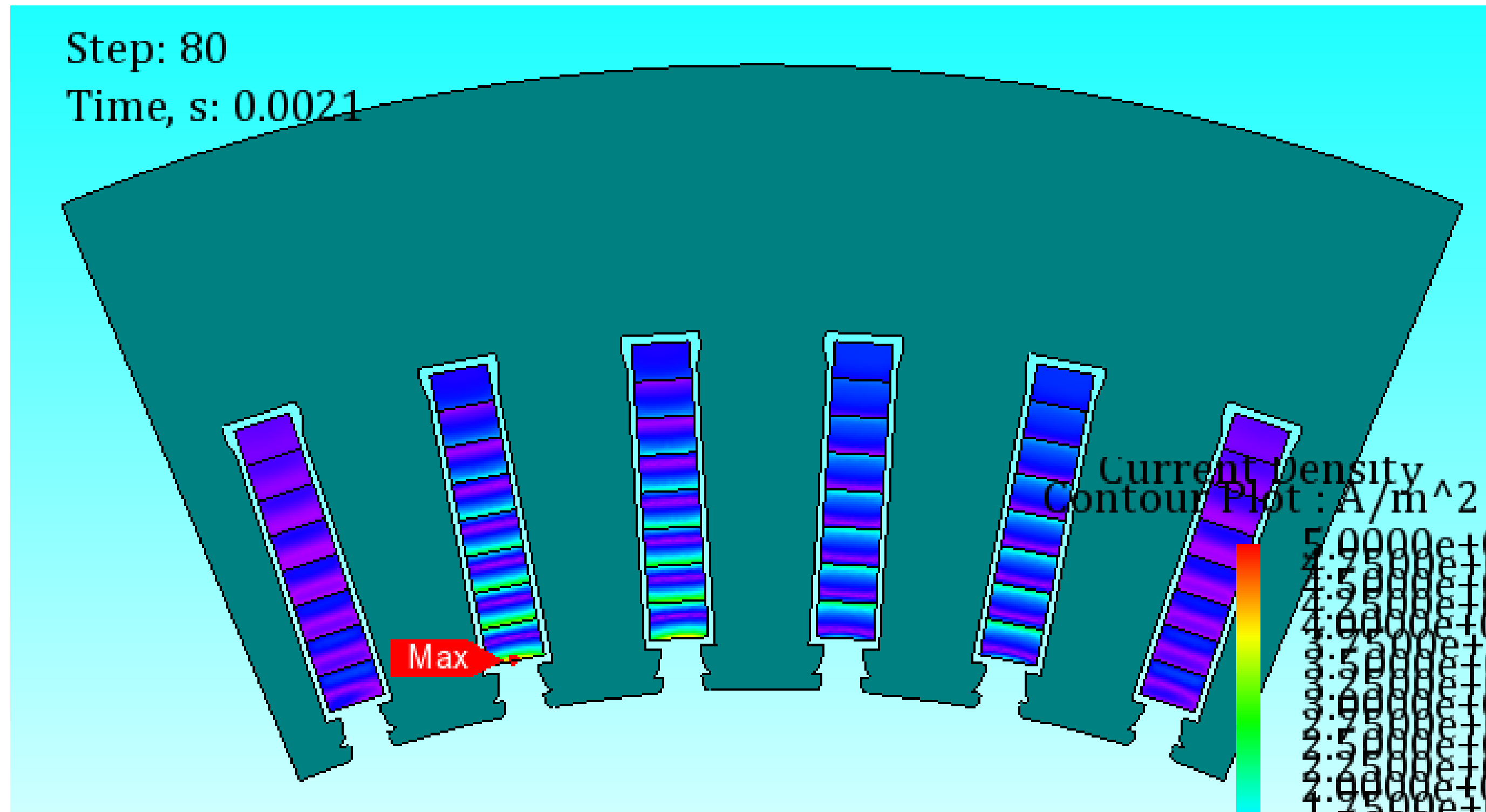
■ 跳转case功能

- 操作点右键-Go to Case, 跳转至相应case, 并可查看响应结果。



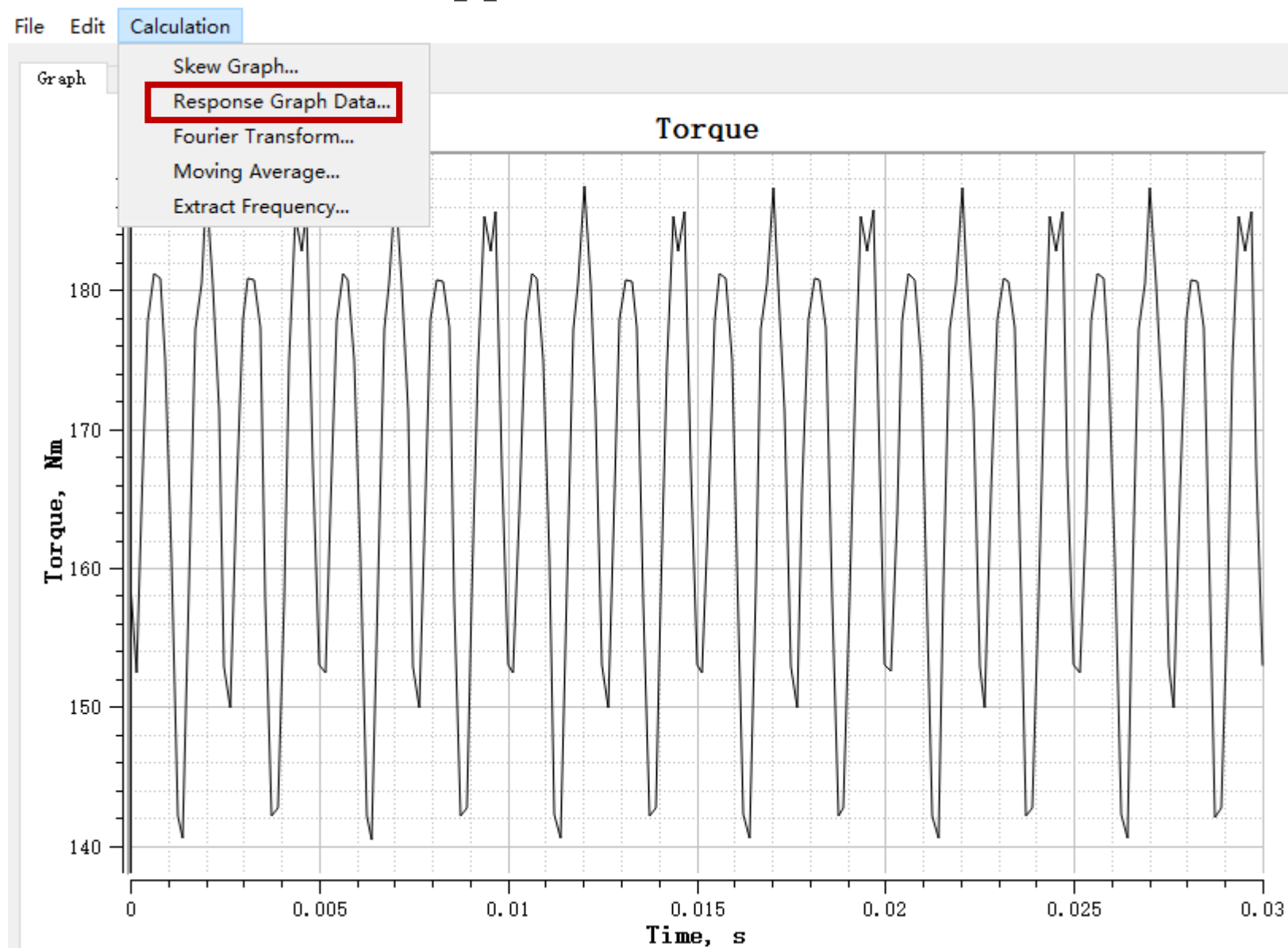
谐波电流

■ 导体涡流损耗



■ 设置转矩脉动

- Graph显示Torque, Calculation-Response Graph Data
- Calculation选择Ripple Rate, 并定义变量名



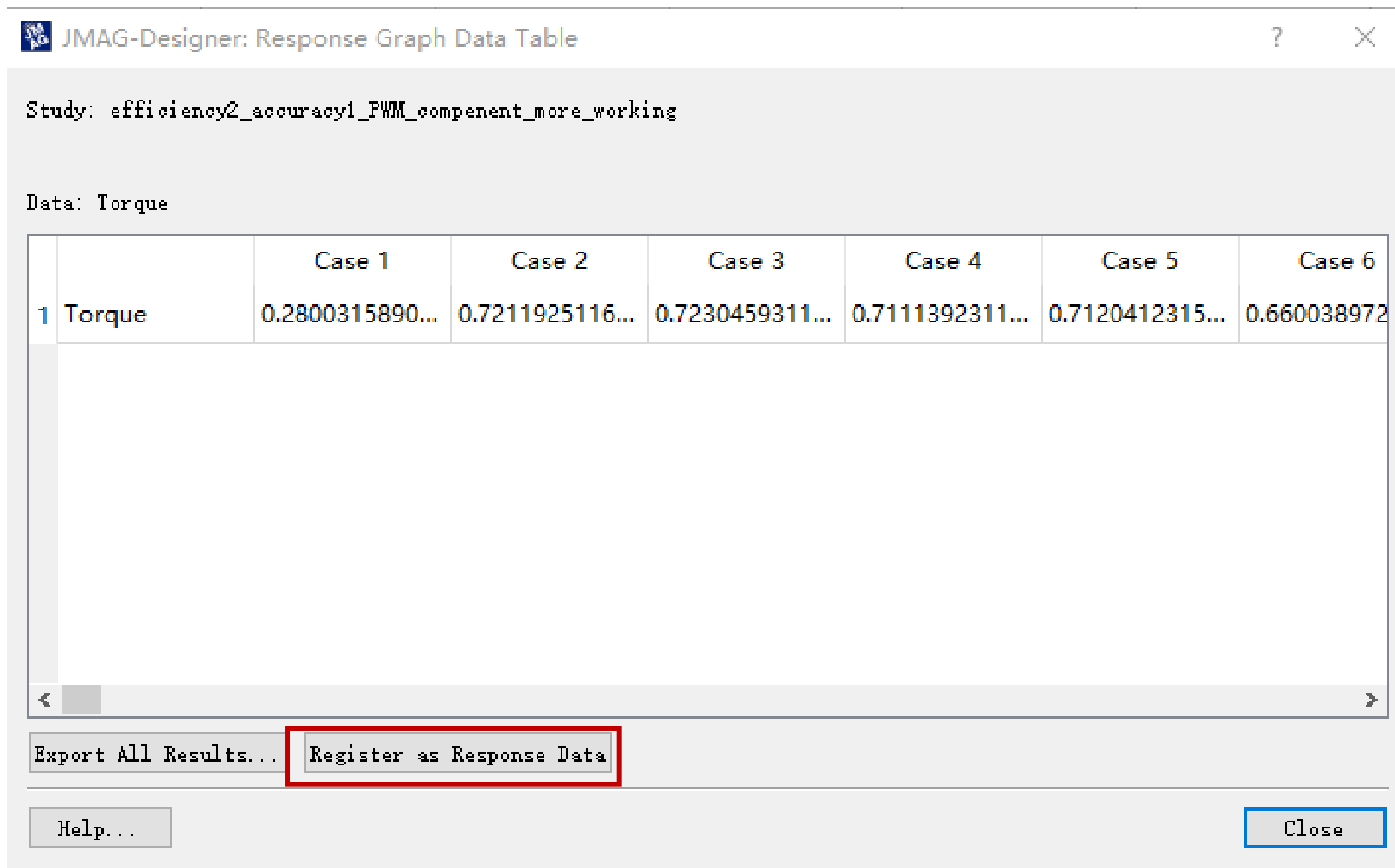
Reference Data: Torque
Title: Torque
Calculation: RippleRate
Threshold:
Periodicity: ☒ None ☐ 1/2
Unit: s
Lines: All
Variable: Trip_
☐ Use All Steps in All Cases
☒ Use Same Value for All Cases
Start: 0
End: 0.3
☐ Use Interval Before Last Step for All Cases
Interval: 0
☐ Specify Values for Each Case
Npoles: 8

Case	Start	End	Parameter
1	0	0.3	8
2	0	0.3	8
3	0	0.3	8
4	0	0.3	8

Buttons: Help..., OK, Cancel

■ 设置转矩脉动

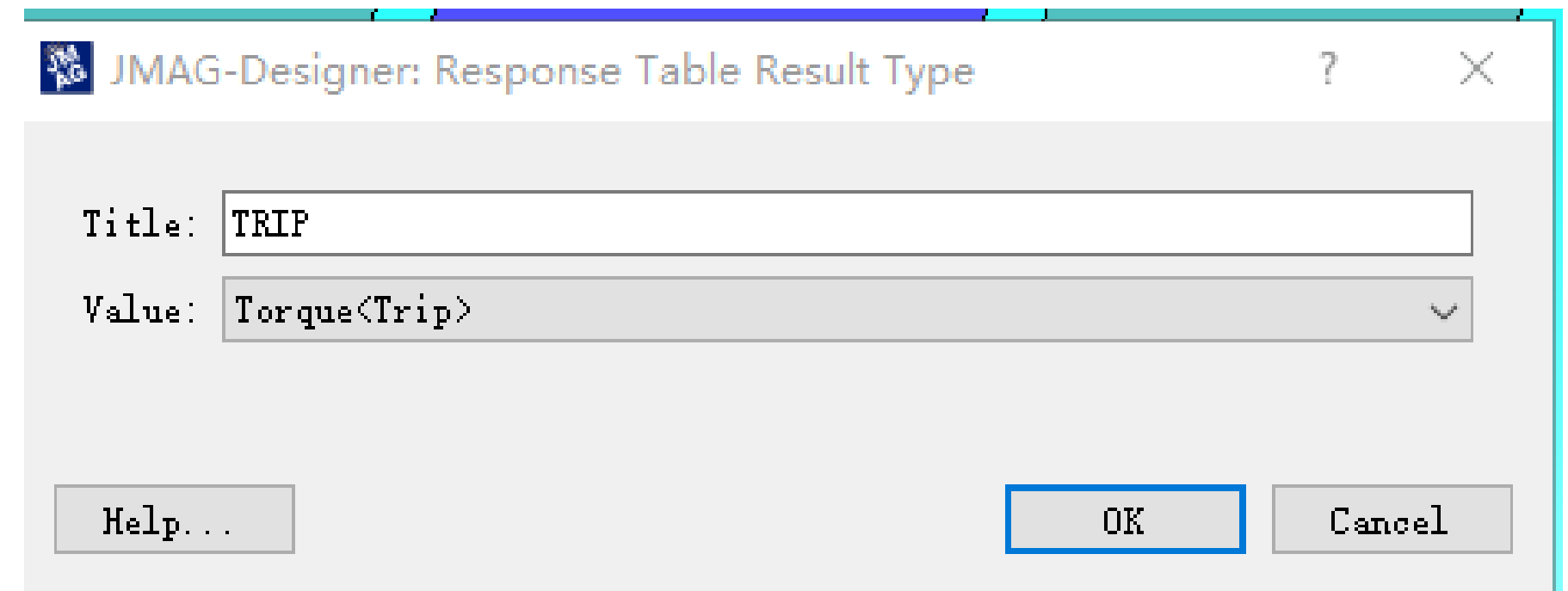
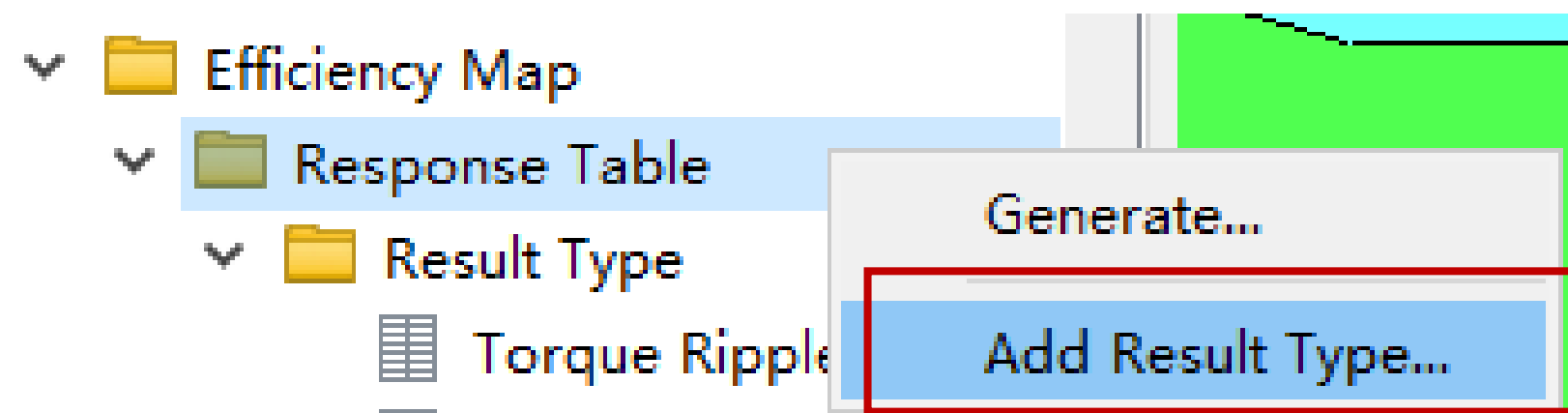
➤ 将计算之后的转矩脉动注册为响应值



The image shows a screenshot of the 'JMAG-Designer: Response Graph Data Table' window. The window title bar includes a question mark and a close button. The main content area displays the study name 'efficiency2_accuracy1_PWM_compenent_more_working' and the data type 'Torque'. Below this is a table with 8 columns: 'Torque', 'Case 1', 'Case 2', 'Case 3', 'Case 4', 'Case 5', and 'Case 6'. The first row of data shows values for each case. At the bottom of the window, there are three buttons: 'Export All Results...', 'Register as Response Data' (which is highlighted with a red rectangle), and 'Close'.

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
1	Torque	0.2800315890...	0.7211925116...	0.7230459311...	0.7111392311...	0.7120412315...	0.660038972

- 设置转矩脉动
- Efficiency Map-Response Table右键选择Add Result Type
- 将响应值命名，并选择注册的响应值



■ 设置转矩脉动

➤ 转矩脉动Map

Total Loss

Efficiency

Output Power

Iamp

beta

Torque Ripple

Torque Average

Gap_B

untitled

Copper Loss

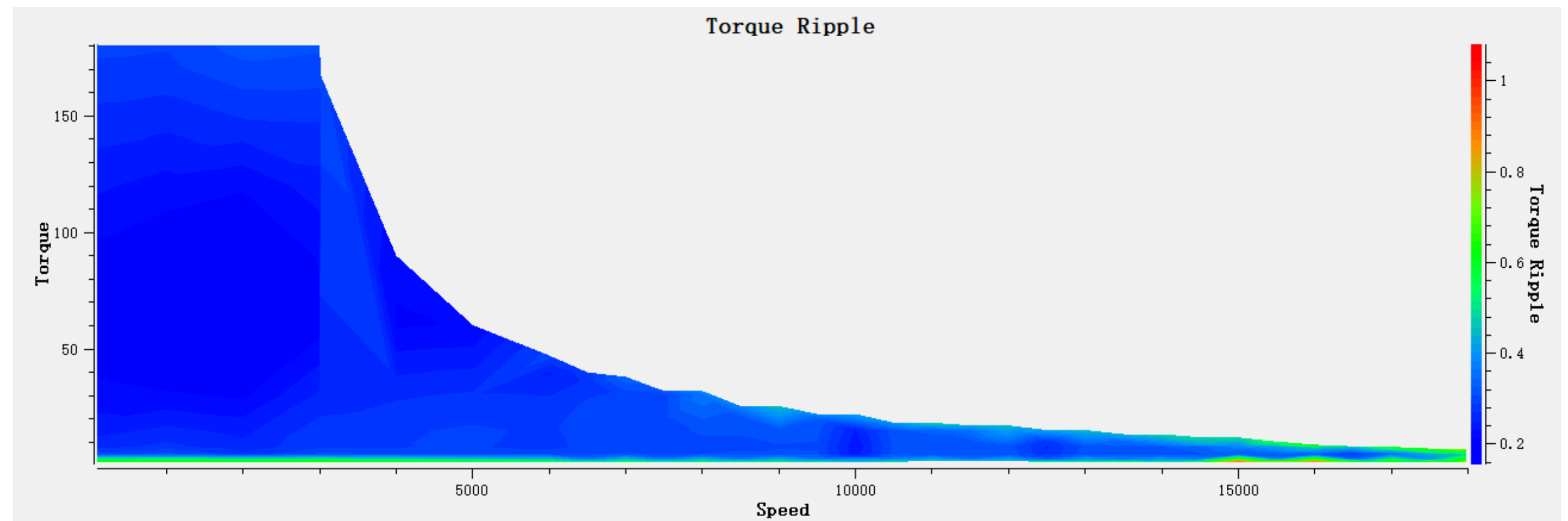
Iron Loss

Eddy Current Loss (Iron loss)

Hysteresis Loss

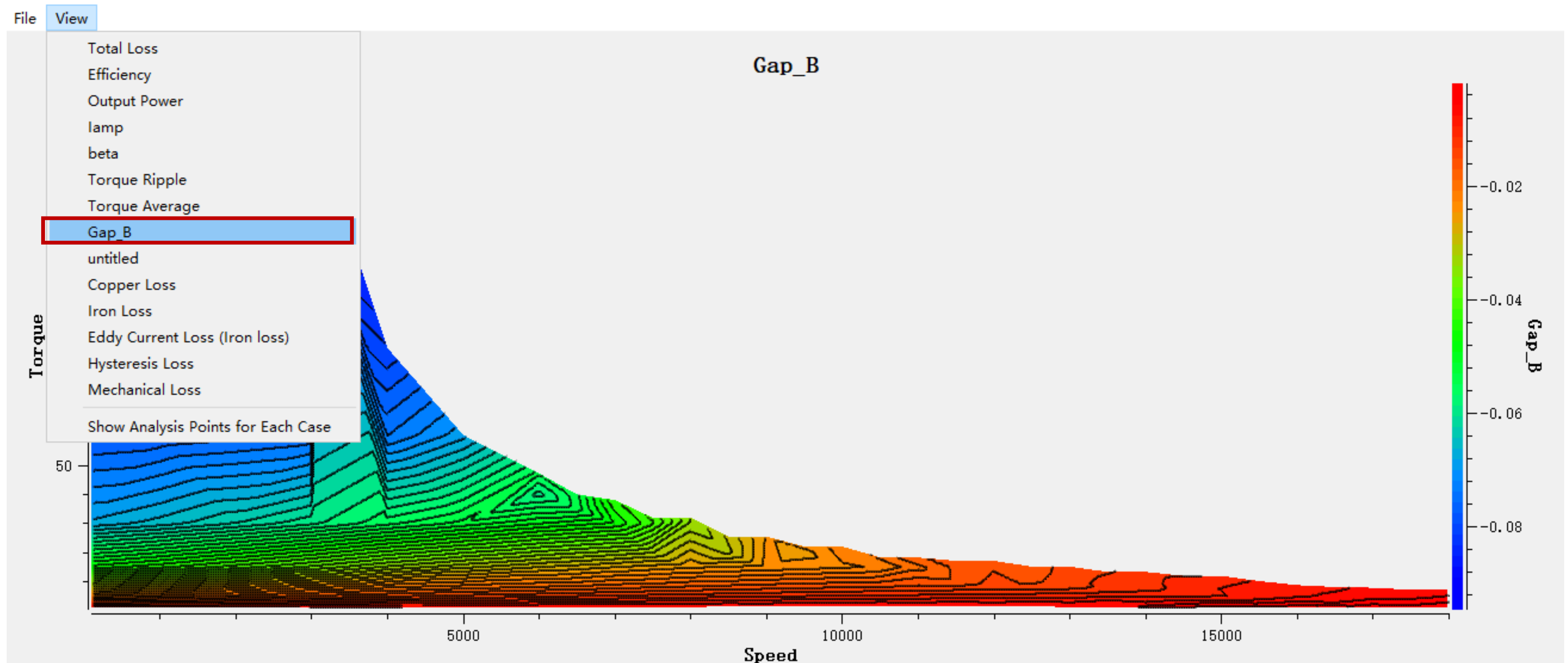
Mechanical Loss

Show Analysis Points for Each Case



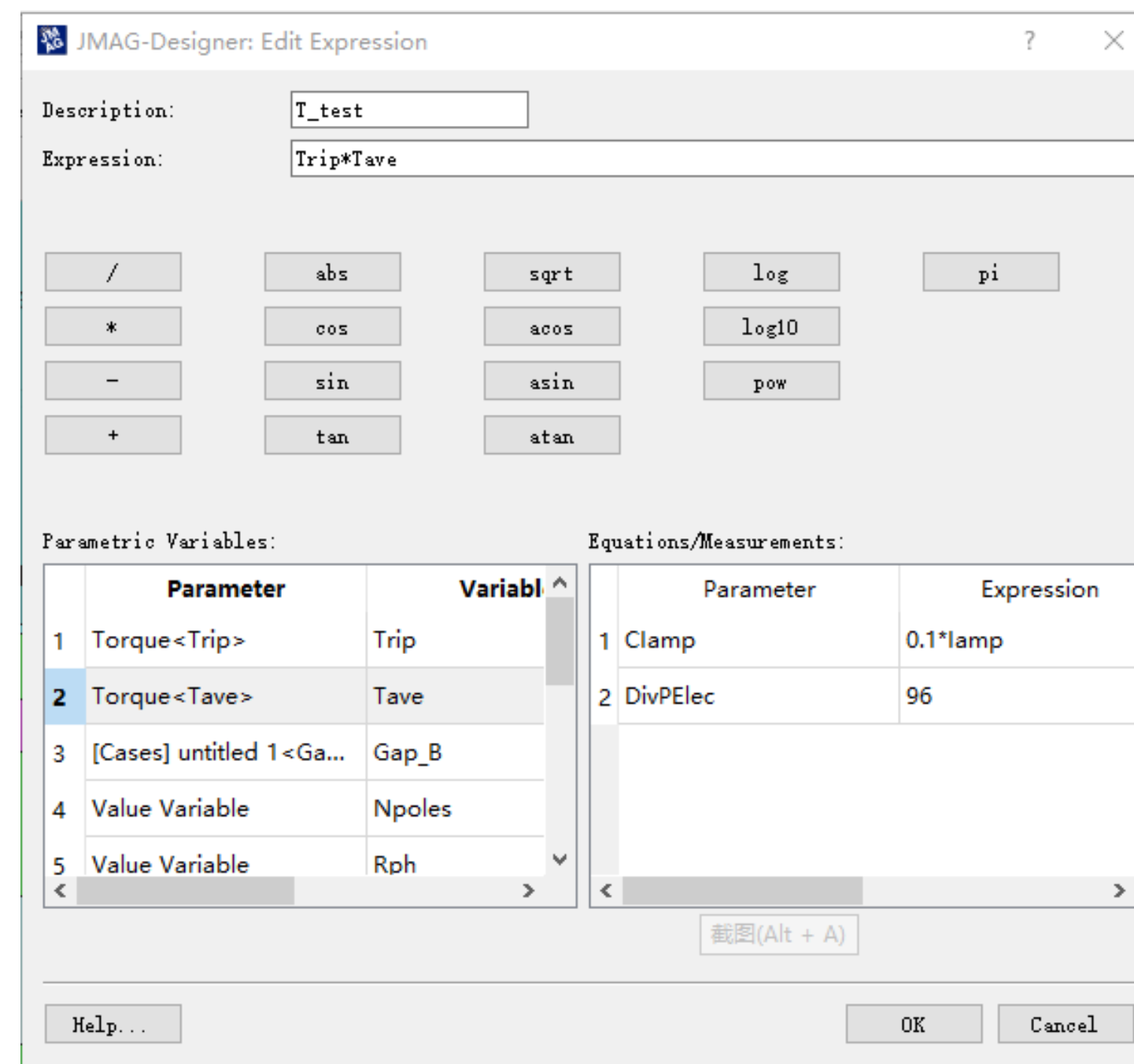
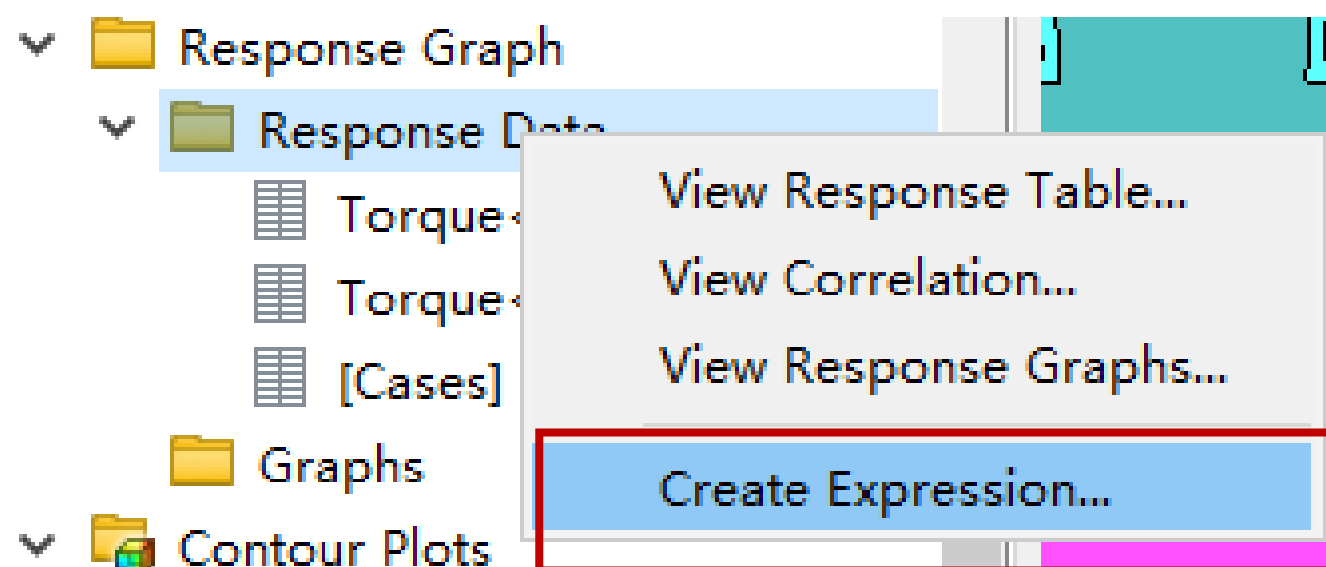
■ 气隙磁密Map

➤ 使用section得到气隙磁密，之后使用与转矩脉动同样设置方法，得到自定义结果类型Gap_B



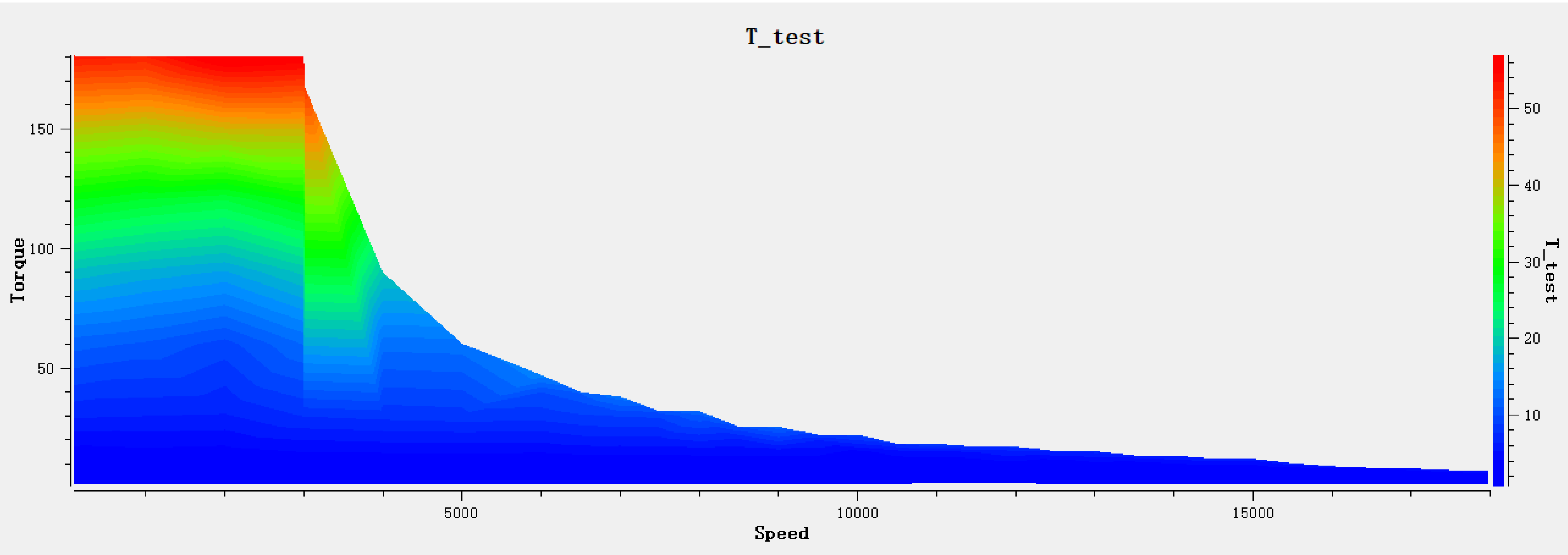
■ 表达式Map

- Response Data右键选择Create Expression
- 可选择参数并创建表达式



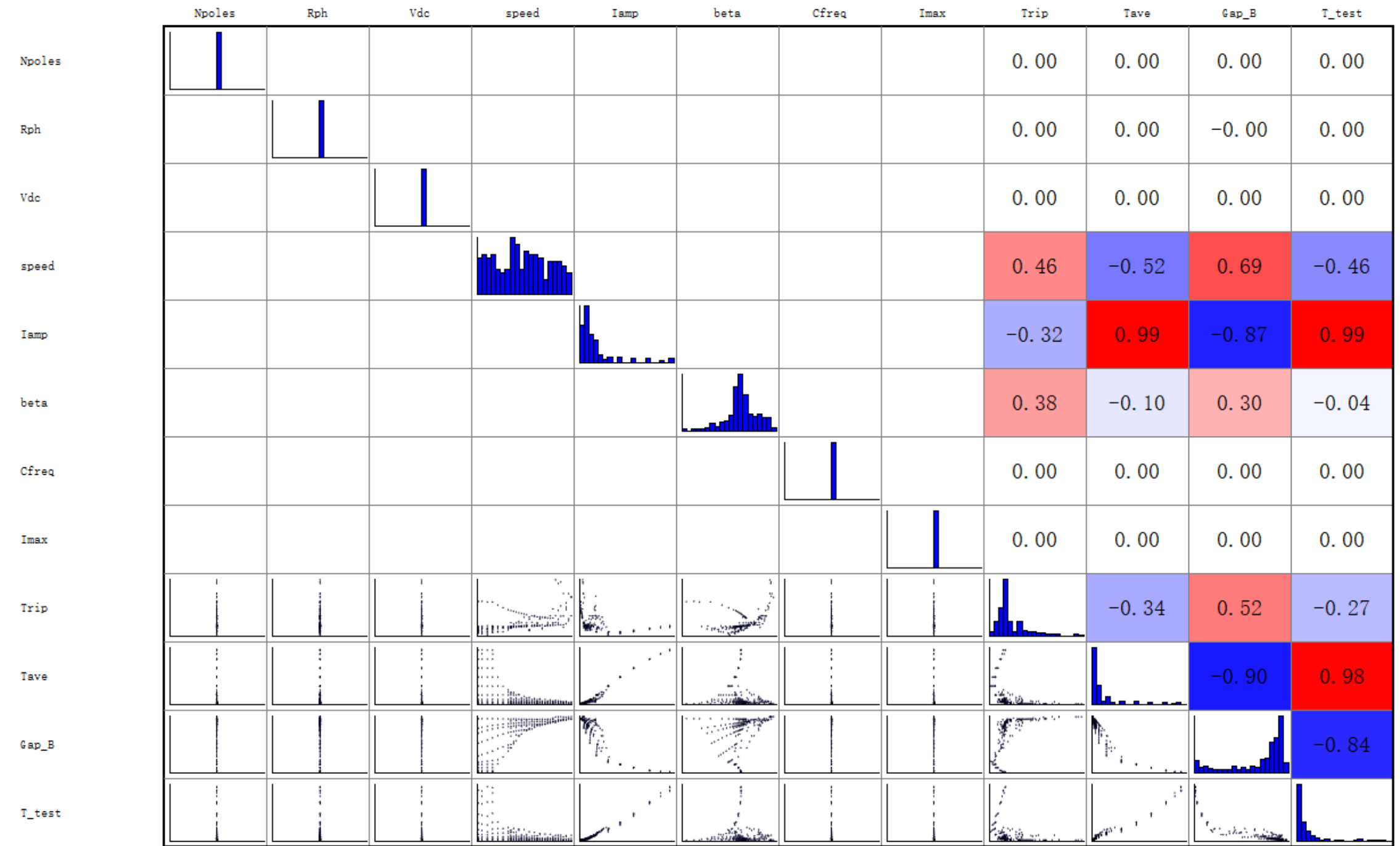
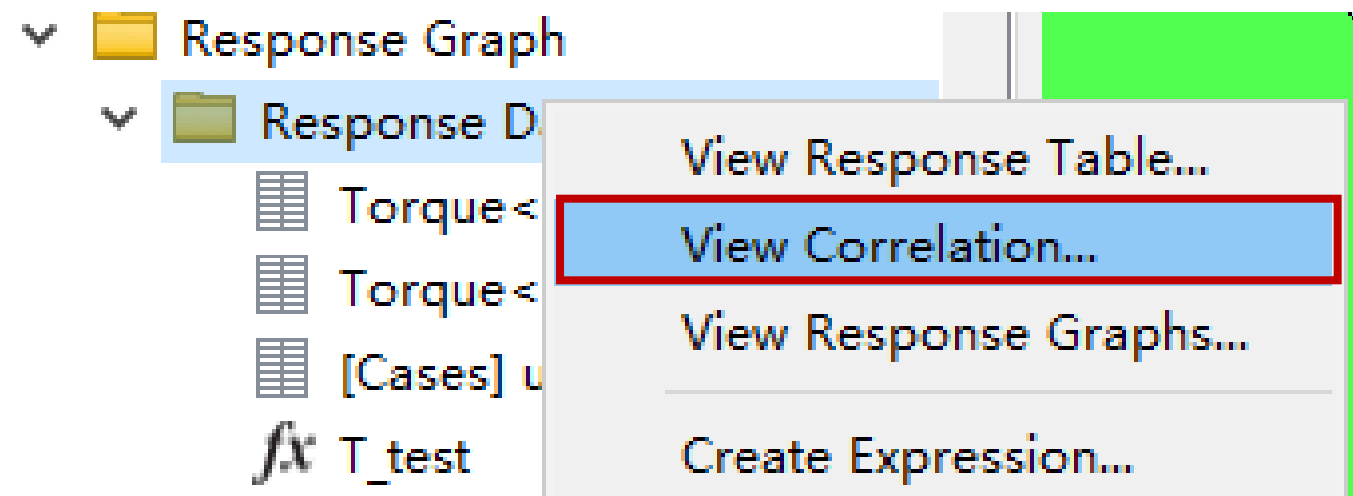
■ 表达式Map

- 将表达式添加结果类型，并在Map中显示。

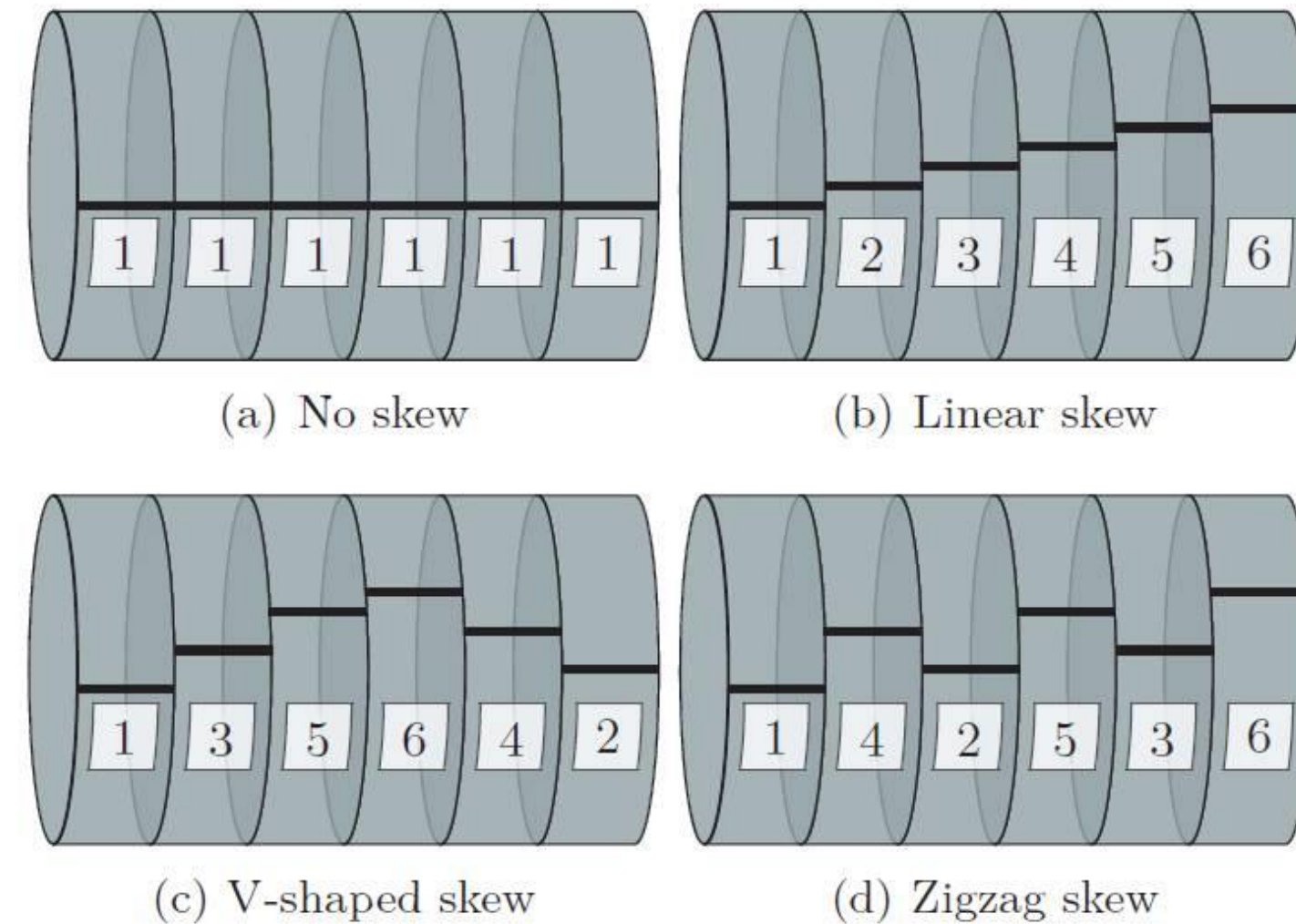


■ 相关性

➤ 将表达式添加结果类型，并在Map中显示。自定义参数的相关性也可表现。



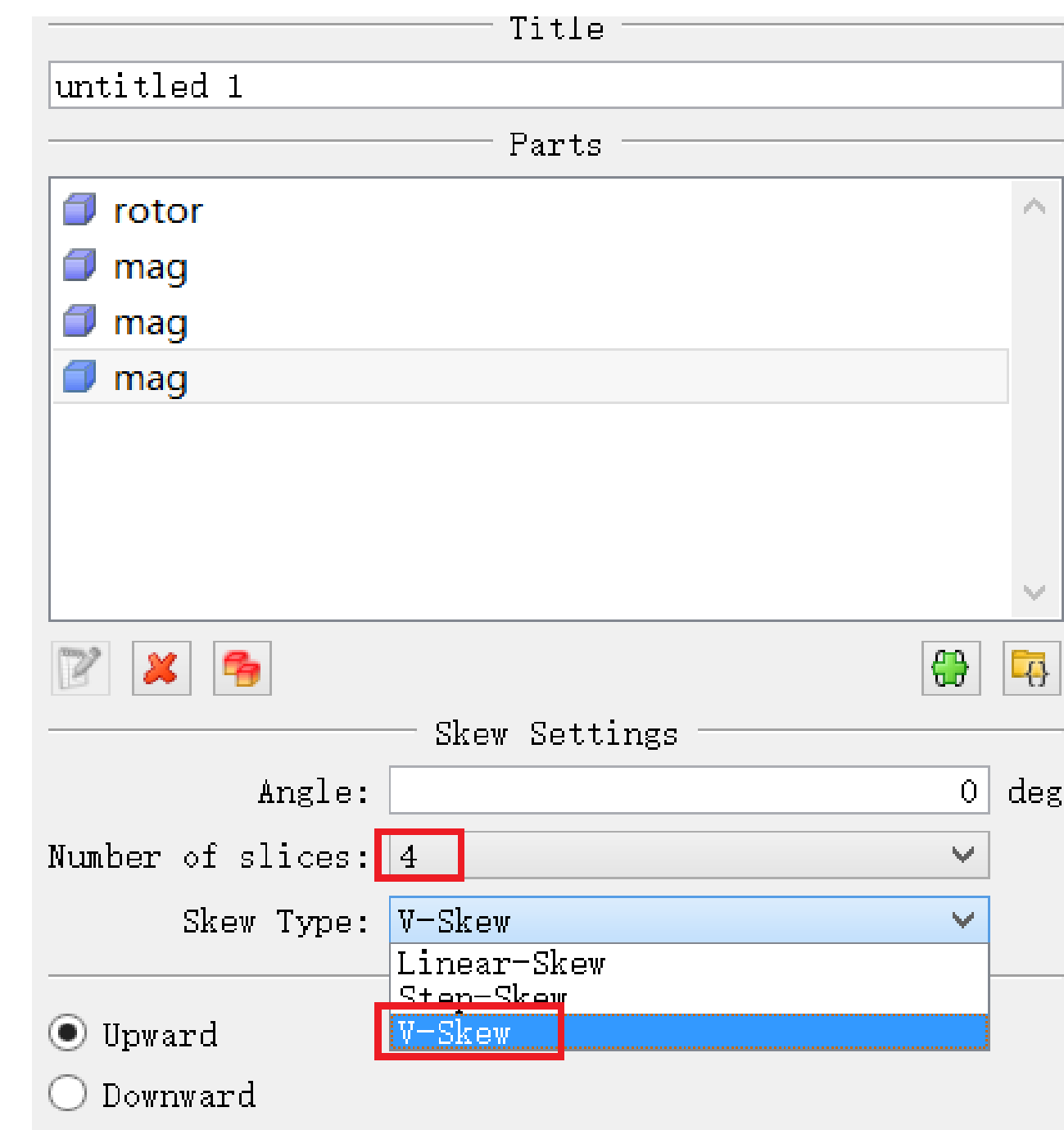
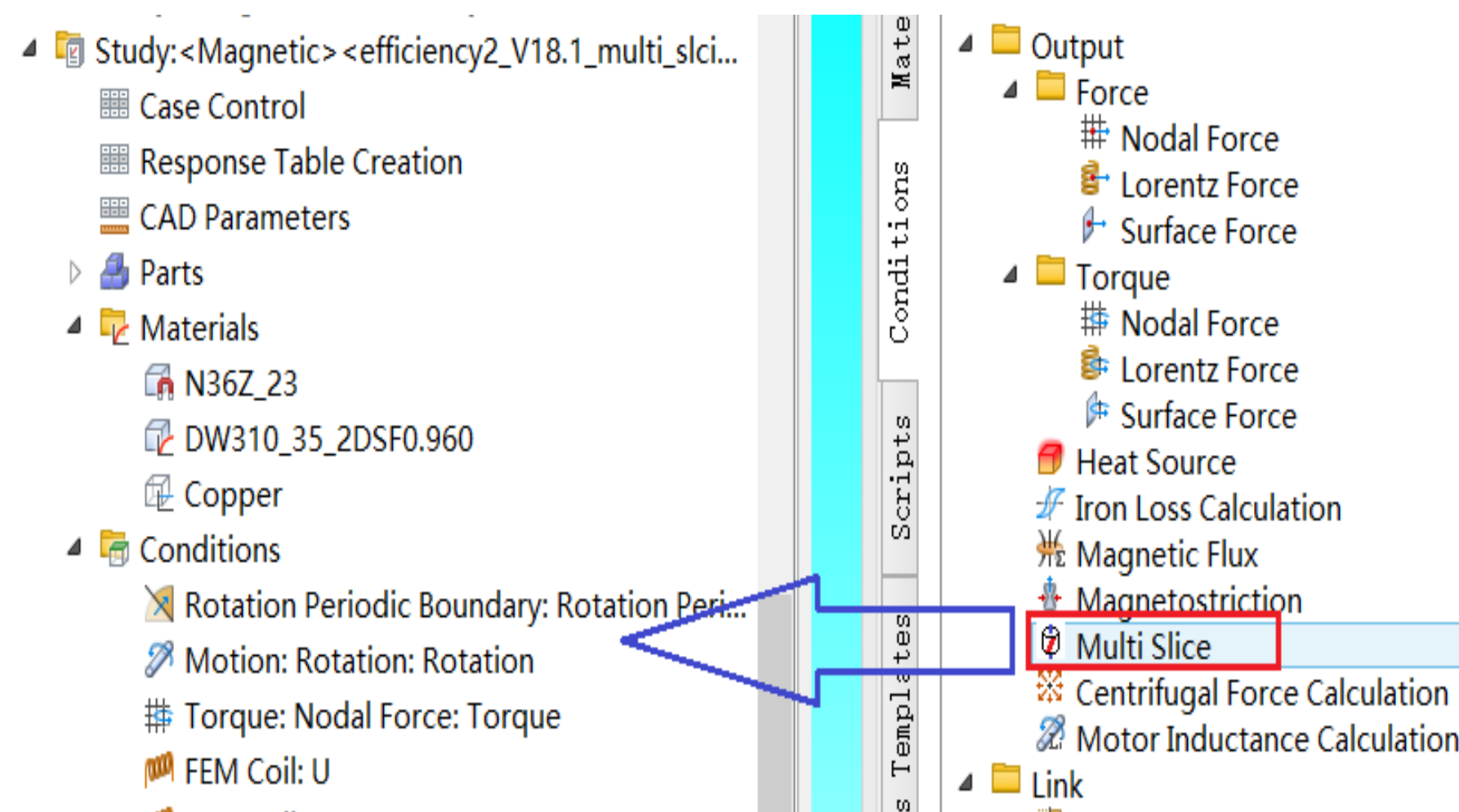
7、V形斜极效率图和转矩脉动图分析



常用的斜极结构

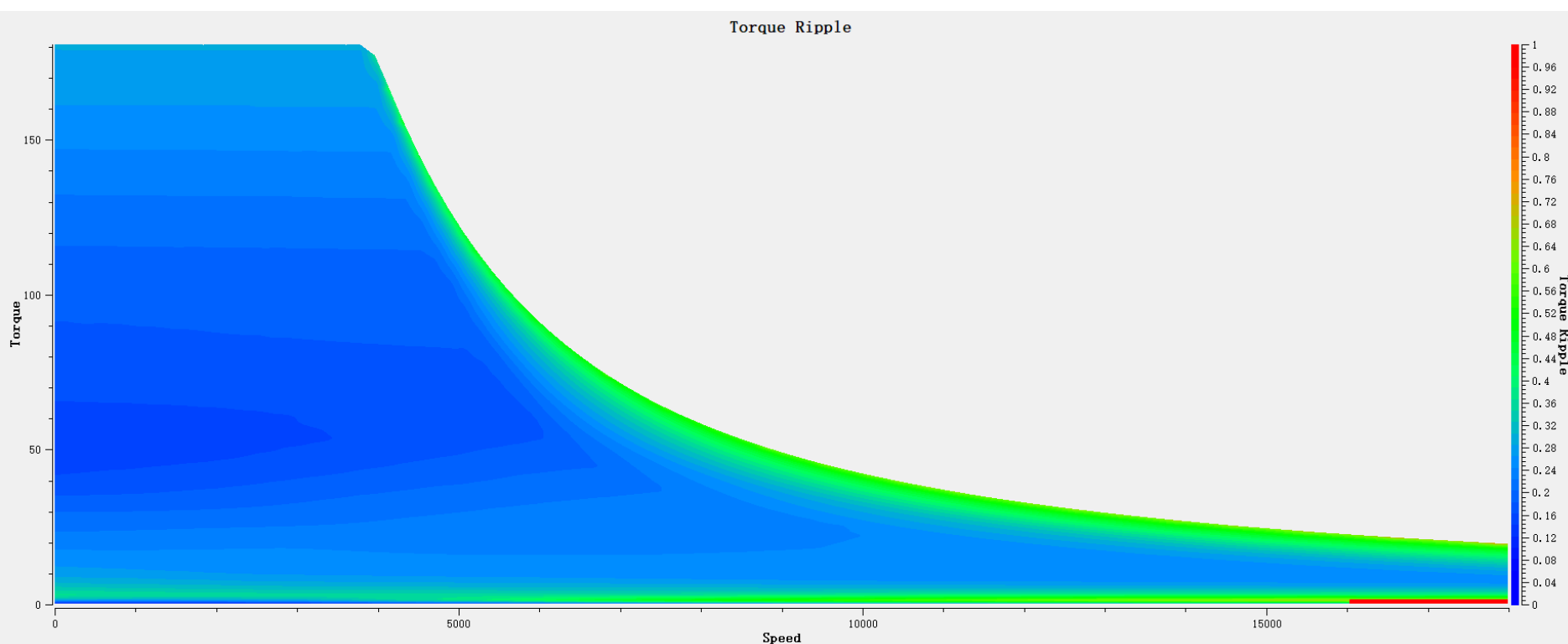
- 斜极有利于减小转矩脉动，从而降低NVH。
- 从公开资料看，丰田普锐斯第四代电机并没有采用斜极。
- 本文假设丰田普锐斯采用了V形斜极，同时通过JMAG V19.0强大的Multi-Slice + 效率MAP图功能，计算2D模型斜极后的效率图和转矩脉动图，并且和上述不斜极的结果进行对比分析。

➤ 斜极的效率图Study创建步骤

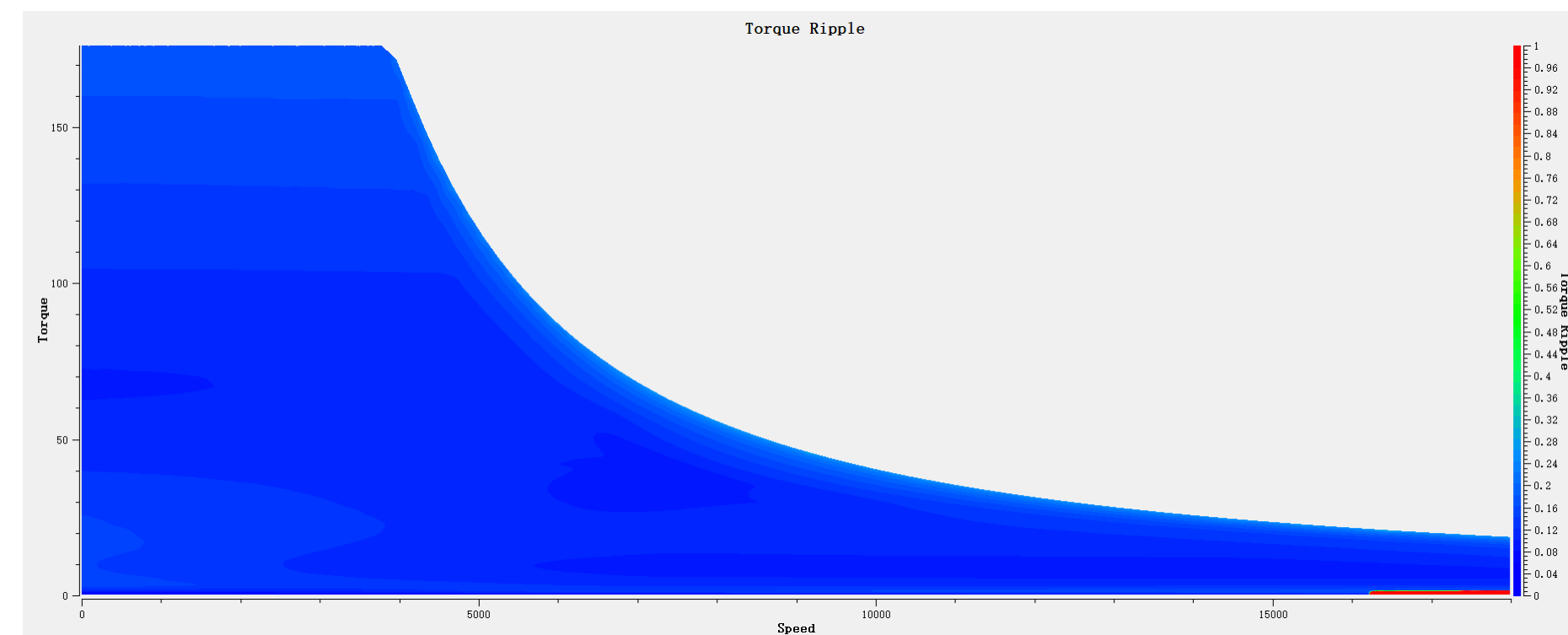


➤ 仅需增加上述操作，就可以设置斜极的分析。

✓ 转矩脉动图



不斜极的转矩脉动MAP



V型斜极的转矩脉动MAP

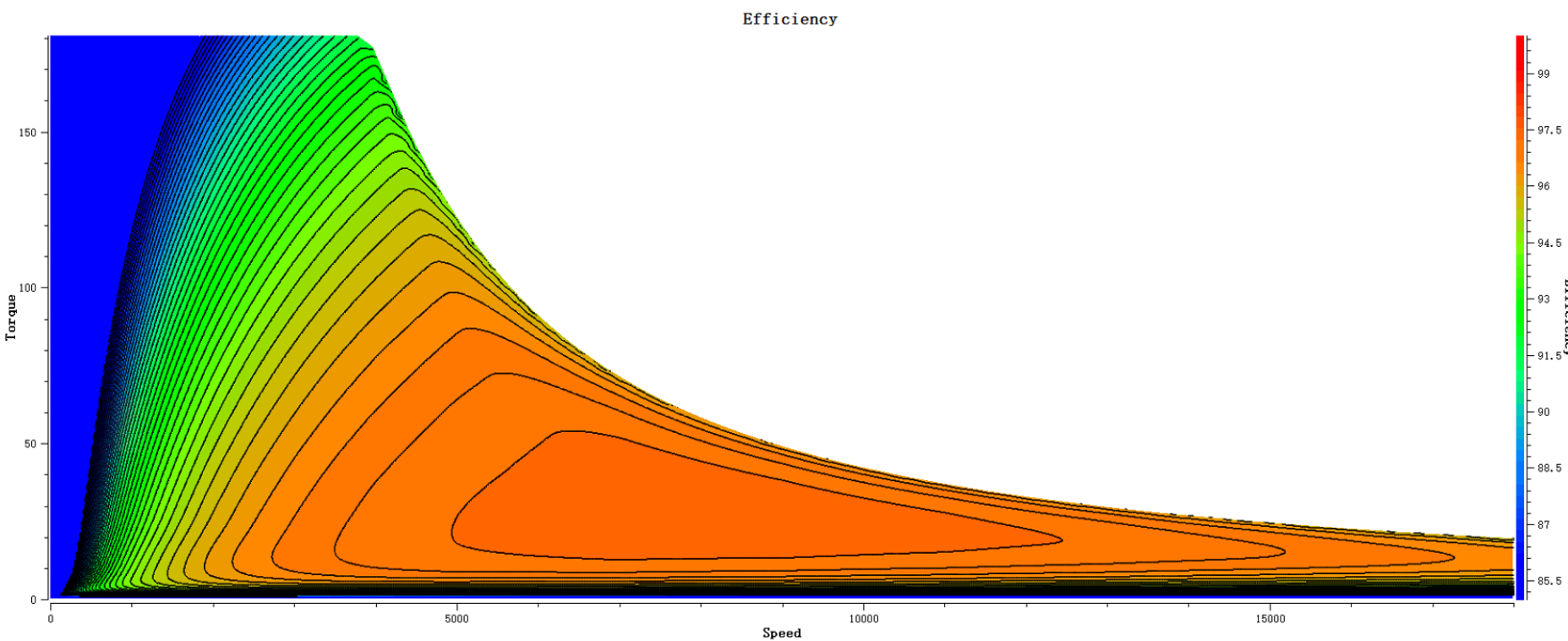
➤ 通过对比，可以看出采用斜极后，转矩脉动值明显降低。

✓ 转矩脉动数据对比

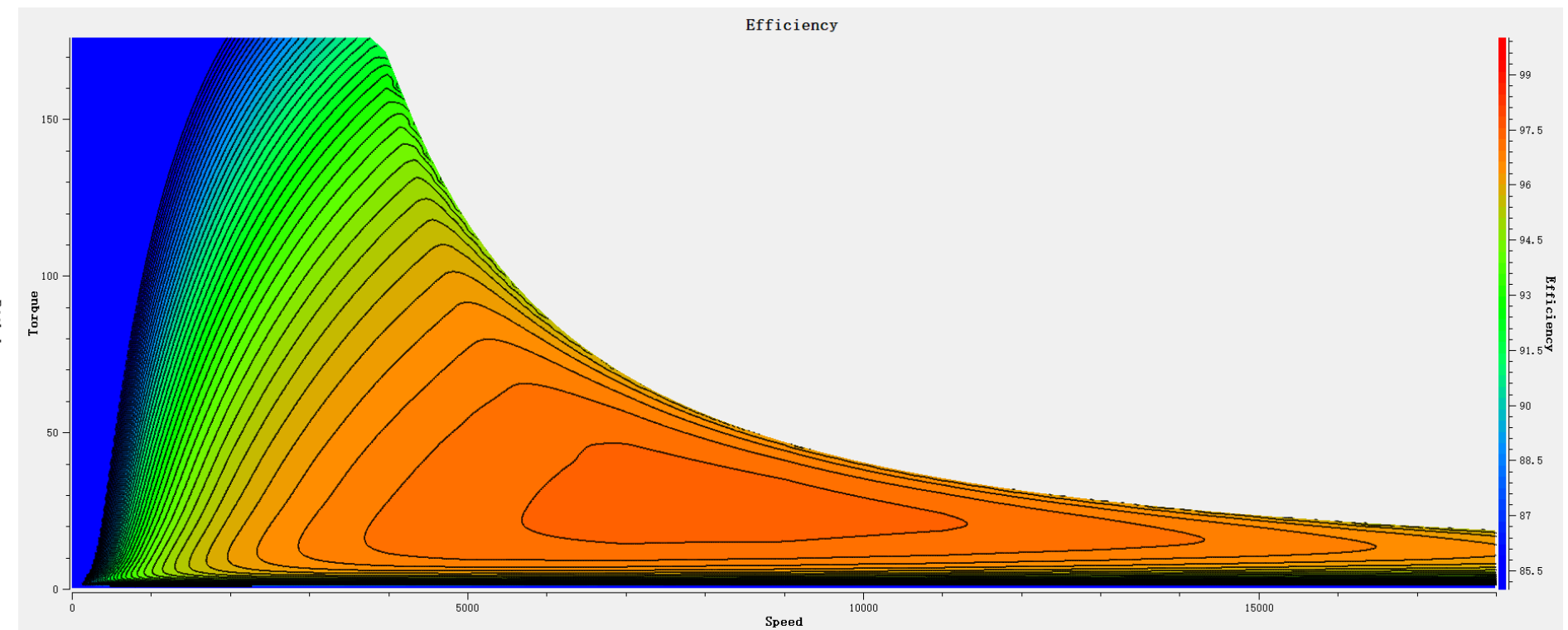
工况	转速	转矩	不斜极转矩脉动	V型斜极转矩脉动	转矩脉动降低率
爬坡点	1000	168	0.270	0.168	↓38%
峰值功率点	3015	168	0.271	0.169	↓38%
高效点	6000	40	0.212	0.103	↓51%
高速点	17000	8	0.473	0.104	↓78%

- 通过分析，可以得到，如果普锐斯第四代采用V型斜极，则在4个重要工况点转矩脉动分别下降38%、38%、51%和78%。

✓ 效率图



不斜极的效率MAP



V型斜极的效率MAP

➤ 通过对比，如果丰田普锐斯采用V形斜极后，对于相同的最大输出电流，最大转矩会降低。

✓ 效率数据对比

工况	转速	转矩	不斜极电流	斜极电流	不斜极电压	斜极电压	不斜极效率	V型斜极效率	效率降低值
爬坡点	1000	168	258.17	270.08	179.74	184.98	78.52%	76.76%	↓ 1.76%
峰值功率点	3015	168	258.17	270.08	549.22	519.29	91.21%	90.49%	↓ 0.72%
高效点	6000	40	69.07	70.34	573.90	564.20	97.30%	97.21%	↓ 0.09%
高速点	17000	8	46.47	31.26	599.21	600	95.3%	96.05%	↑ 0.75%

➤ 通过分析，可以得到，在低转速下，效率分别降低了1.76%、0.72%和0.92，高速点提高了0.75%。

8、总结

8、总结

- 本文主要以Prius2017的模型为基础，分析如何使用JMAG进行速度优先效率MAP分析。
- 本文的Prius2017模型、材料数据不一定真实、可靠，因此分析结果并不真实。
- 通过本文的分析，可以发现JMAG制作速度优先的效率MAP流程简单，用户只需要复制原先的负载Study，同时改变Study类型，即可得到Efficiency MAP的Study，在Efficiency MAP Study中也无需进行参数化设置，只需要对响应表中的电流幅值、相位和转速进行设置即可，软件会自动进行关联。
- 本文通过假设普锐斯2017电机为V型斜极，分析其效率MAP图和转矩脉动MAP，可以得到如果丰田当时采用了V型斜极，转矩脉动会得到降低，在相同工况下效率也会下降，也就是说如果控制器的母线电压和最大输出电流没有得到提高，那么峰值扭矩和峰值功率势必会下降。
- 本文采用的是2D斜极分析方法，软件没有考虑轴向漏磁，如果实际采用斜极，轴向漏磁会加大，效率会降低的更多，因此这是电磁工程师需要引起注意的，必要的情况下建议对重要工况点进行3D电磁性能计算。
- 后续会针对考虑绕组端部的3D模型进行精度优先效率图分析。

感谢倾听
期待与您的进一步合作 😊



扫一扫关注官方微信
获得下载资讯

联系我们

- web: <https://www.idaj.cn/>
- e-mail: support@idaj.cn
- Tel: 021-50588290 ; 010-65881497