

基于 SPEED 和 JMAG 的外转子永磁 同步电机的设计与分析

Design and Analysis of PMSM with External Rotor Based on SPEED and JMAG

张沛

北京百正创源科技有限公司

摘要: 以一台 250 kW、300 rpm 的外转子永磁同步电机为例，应用 SPEED 软件的 PC-BDC 模块和 GoFER 模块进行磁路初步设计，确定了电机的铁心和线圈的主要参数。再将 SPEED GoFER 产生的有限元模型导入 JMAG 软件中 Designer 模块，进一步分析了其空载、额定负载工况下的磁场分布规律，获得了永磁同步电机的齿槽转矩、转矩脉动等主要电磁特性。

关键词: 永磁同步电机；外转子；SPEED；JMAG

Abstract: Taking a 250kW 300rpm PMSM with External Rotor as an example, SPEED PC-BDC and GoFER are used to design magnetic circuit, confirm the main parameters of the core and coils. The FEM model built by SPEED GoFER is imported to JMAG Designer, the magnetic field distribution of no-load and rated-load conditions is analyzed, the cogging torque and torque ripple are obtained.

Key words: PMSM; External Rotor; SPEED; JMAG

1 引言

与传统的异步电机和电励磁同步电机相比，永磁同步电机不需要电励磁、结构简单、效率高、功率密度高、电机形状和尺寸变化多样，近年来得到了广泛的应用。而外转子电机的功率密度一般略高于内转子电机，非常适合在风机、皮带机、挖掘机等应用场合实现直驱传动，是永磁电机设计制造领域的热门方向。

传统的电机设计方法是磁路法，其本质是将电机内磁场等效简化为由若干集总参数元件组成的磁路。磁路法在实际运用时，必须依据电机理论和设计经验预设很多系数，在拥有大量理论研究、型式试验数据积累的前提下具有相当高的精度，而在研发新式电机、缺少历史数据时误差很大，且不能分析永磁电机领域非常重要的磁场谐波问题。

近年来，有限元法在电机研究和设计领域得到广泛运用。其本质是以大规模数值计算来求解物理场问题，虽然精度较好，但计算时间较长，且得到的数据缺乏直观性，不能充分满

足电机设计工作的需要。

因此，最理想的电机设计方法是：初步设计时采用磁路法，但其中的预设系数可以用有限元计算结论或历史经验来修正。确定初步方案后，再采用专业的电磁有限元软件进行核算和进一步分析、优化。

2 外转子电机结构和主要参数

本文研究的电机为外转子结构。转子材质为导磁铸钢，安装了 16 个磁极，每个磁极沿轴向分为 10 段。定子铁心材质为 DW470，表面有 18 个槽，内孔设置了冷却水道。电机的铁心示意图见图 1，主要参数见表 1。

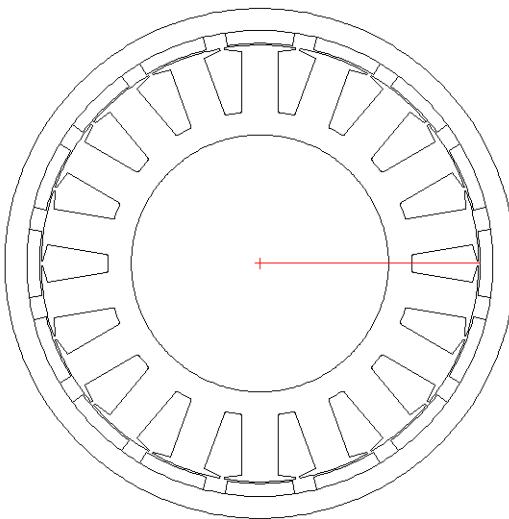


图 1 外转子电机结构示意图

表 1 外转子永磁同步电机参数

功率 kW	250	铁心长 mm	550
电压 V	1140	极数	16
绕组连接	Y	槽数	18
转速 rpm	300	极弧系数	0.75
外径 mm	595	磁钢牌号	40SH
内径 mm	300	并联支路	2

3 利用 SPEED 软件进行初步设计

SPEED 软件创始人 T. J. Miller 是英国苏格兰 Glasgow 大学教授，著名的永磁电机专家。该软件自 1986 年发展至今，已拥有 9 个模块 PC-AXM、PC-BDC、PC-DCM、PC-IMD、PC-LPM、PC-SLD、PC-SRD、PC-WFC 等 9 个主要模块，可以用来设计无刷电机（含永磁、电励磁）、感

应电机、绕线转子电机、直流电机、开关磁阻电机、直线电机、直接启动电机等电机类型，并拥有独创的 Go-FER 功能，可通过高度针对性的有限元计算来修正磁路法中关键参数。

图 2、3 分别为 SPEED 中校正后的气隙磁密、齿磁密波形。红色为磁路法计算结果，浅绿色为软件内置的有限元模块计算结果。

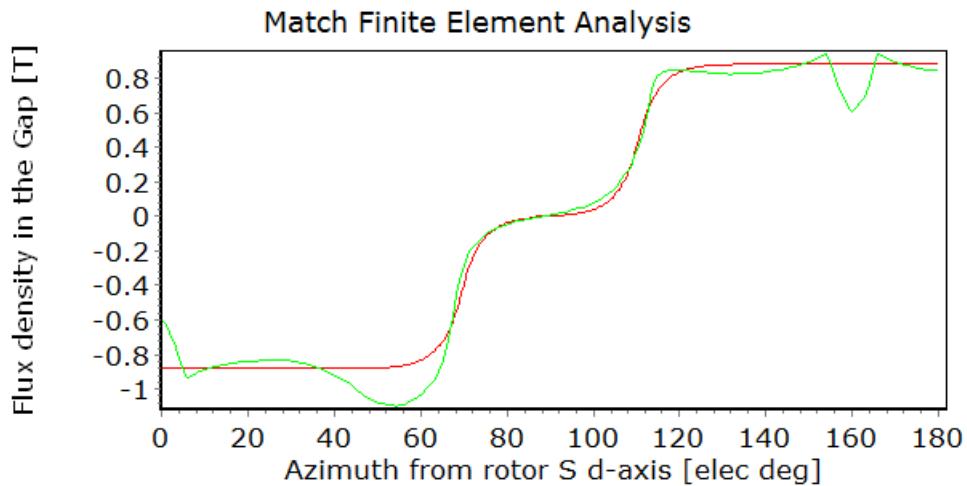


图 2 SPEED 校正后的气隙磁密波形

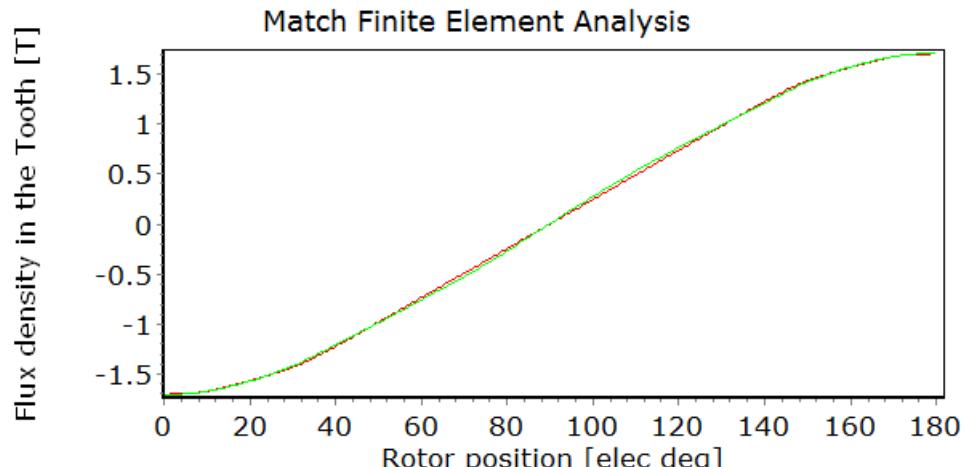


图 3 SPEED 校正后的齿磁密波形

4 利用 JMAG 软件进行有限元分析

JMAG 软件是由日本 JSOL 公司开发的功能齐全，应用广泛的电磁场、热场、结构场分析软件，可以充分满足电机内物理场分析的需要。在各种电磁场分析软件中，JMAG 软件在铁耗计算领域明显领先，不但提出了若干精度较高的数值计算方法，还内置了大量来自实际测量的铁磁材料、永磁材料性能数据。

JMAG 软件具有高度的开放性，其 Designer 模块可以直接读取、导入 SPEED 软件 Go-FER 生成的.gdf 文件，自动识别转子、绕组、材料属性，极大地节约了软件操作时间。

图 4 是 JMAG 导入.gdf 文件后的外转子电机模型。

然后，将 A、B、C 三相电流设置为 SPEED 软件的计算结果 160 A。在简单设置仿真时间、步长后，无需更多操作，就可以执行求解。

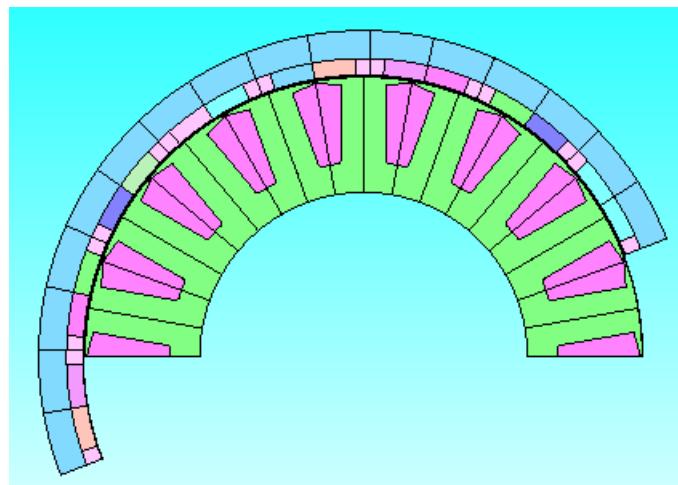


图 4 导入 JMAG 的外转子电机模型

图 5 是该电机在额定负载工况下磁场分布云图。可见该电机齿部磁密一般小于 1.8 T，其磁场饱和程度不是很高。

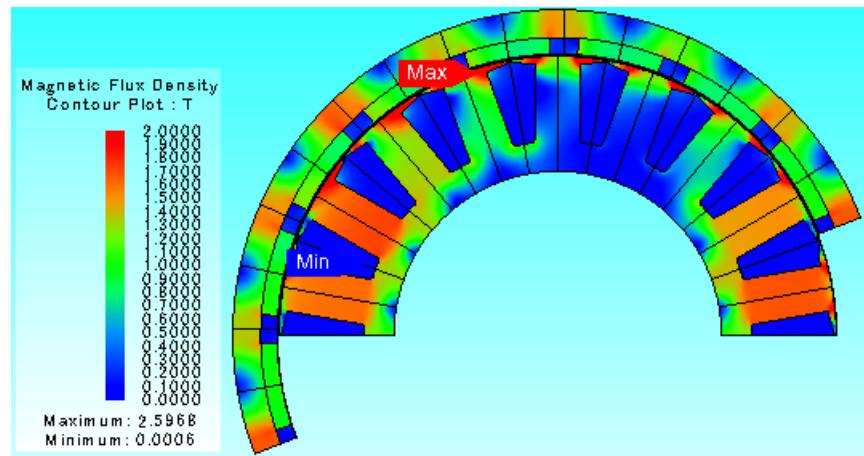


图 5 外转子电机的负载工况磁场分布

图 6 是该电机在额定负载工况下转矩曲线。可知其平均转矩为 7977 Nm，略高于额定转矩 7957.75 Nm。由此可知，SPEED 软件中求解出的额定负载工况电流是足够精确的。SPEED 软件的高精度由此可见一斑。

另可计算出该电机的转矩脉动仅为额定转矩的 3.47 %，充分体现了分数槽永磁同步电机相对于常规电机的性能优势。

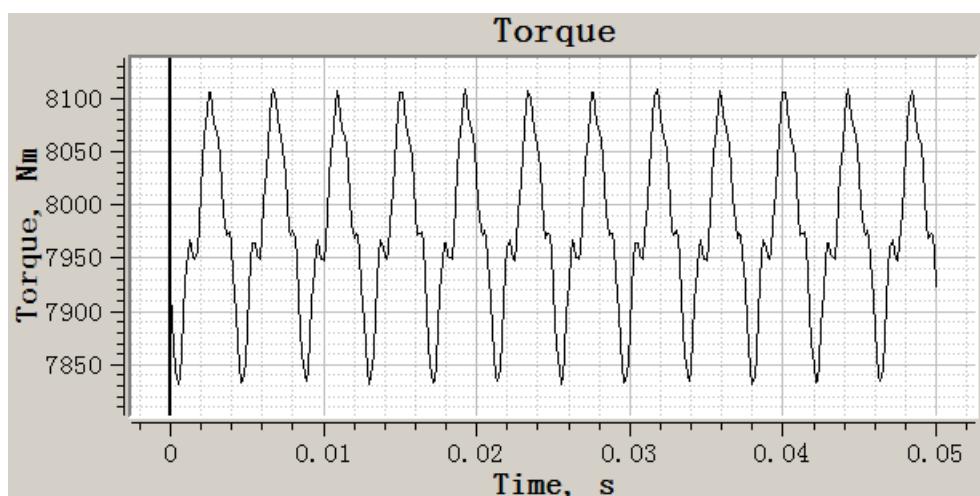


图 6 外转子电机的额定负载工况转矩曲线

执行完额定负载工况求解后，将三相电流都设置为 0，即可求解空载工况。

图 7 为该电机的空载工况磁密分布云图。

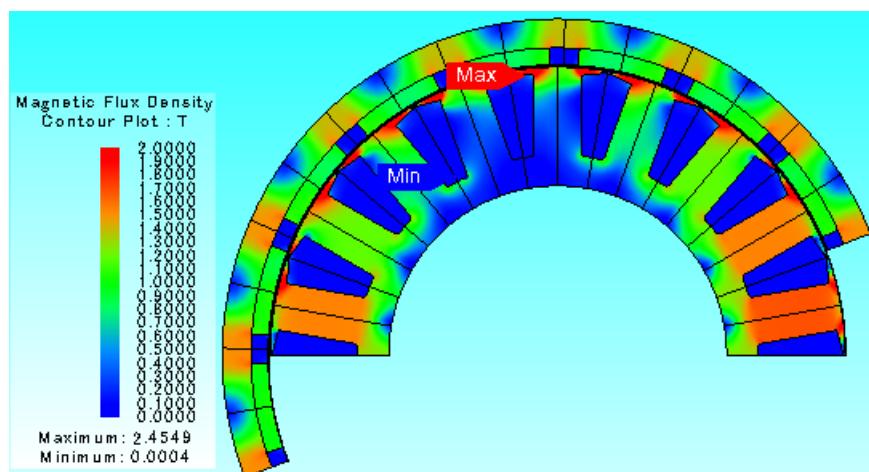


图 7 外转子电机的空载工况磁密分布

图 8 为该电机的空载工况转矩波形。可见齿槽转矩仅有 60.37 Nm。

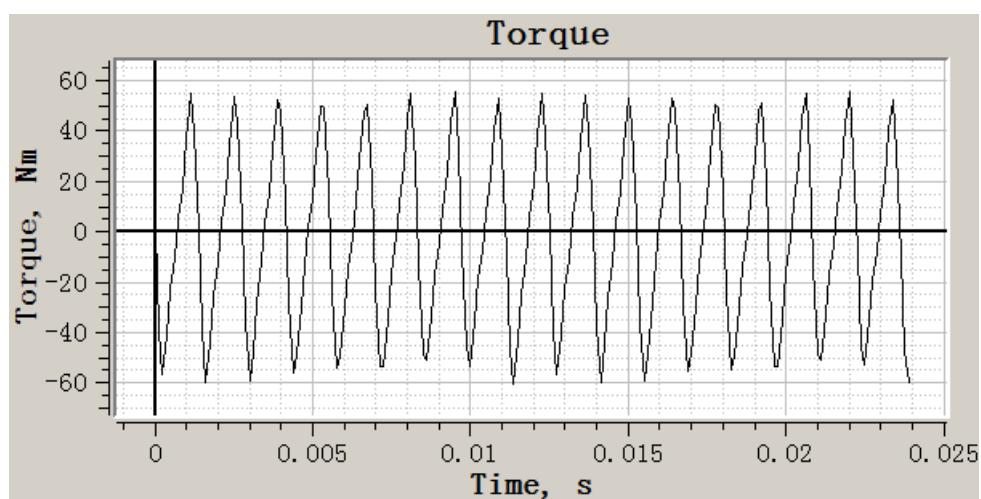


图 8 外转子电机的空载工况转矩

五、结论

本文设计分析了一台 250 kW 外转子永磁同步电机，利用 SPEED 软件进行电磁初步设计，并使用 JMAG 软件进行后续的有限元核算、分析。从该电机的额定负载工况、空载工况的各项性能数据可以看出分数槽永磁同步电机相对于传统交流电机的性能优势。SPEED-JMAG 联合使用的便捷和准确性也在设计过程中得到了充分体现。