

针对 Prius2010 电动机的 JMAG 和 Maxwell 仿真对比

Simulation Comparison of Prius2010 Motor Based on JMAG and Maxwell

张邦富 李伟
东南大学电气工程学院

摘要：本文主要是利用 JMAG 和 Maxwell 有限元软件，针对丰田公司生产的 Prius2010 中使用的永磁同步电动机进行基本电磁仿真。文中对比了两款软件的仿真结果，发现了 JMAG 软件在进行电磁仿真时，无论在精度和仿真速度上都有很大的优势。

关键词：Pirus2010 电动机；仿真对比；JMAG；Maxwell

Abstract: This paper presents simulation comparison of permanent magnet synchronous motor(PMSM) based on JMAG and Maxwell.The PMSM is used in the Prius2010 produced by Toyota. The results from the two softwares are compared with each other.The result reveals that JMAG has more advantages than Maxwell on the aspect of precision and simulation speed.

Key words: Prius2010 motor; simulation comparison; JMAG; Maxwell

1、 引言

传统化石能源的紧缺及其带来的环境问题使得人们越来越偏向于采用新能源。虽然使用不可再生化石能源的汽车占市场主导地位，但电动汽车的普及越来越广。纯电动汽车的功率、行程都还不够好，为此众多汽车厂家研发了混合动力电动汽车。其中，日本丰田公司生产的 Prius 系列混合动力电动汽车性能优良、市场占有量高。Prius2010 采用的内嵌式永磁同步电动机(IPMSM)是汽车动力的重要来源。本文主要是利用 JMAG 和 Maxwell 软件对 Prius2010 的 IPMSM 进行基本电磁仿真，并对两种软件的仿真结果进行对比。

2、 几何建模

JMAG 软件具有很好的绘图功能，方便快速建立仿真模型。为了节省仿真时间，只建立 Prius2010 IPMSM 的 1/4 模型，如图 1 所示。可以看出 Prius2010 的 IPMSM 是采用 V 型永磁体，相比永磁体平直放置方式具有更强的出力。限于篇幅，基于 Maxwell 软件的几何模型就不再重复。

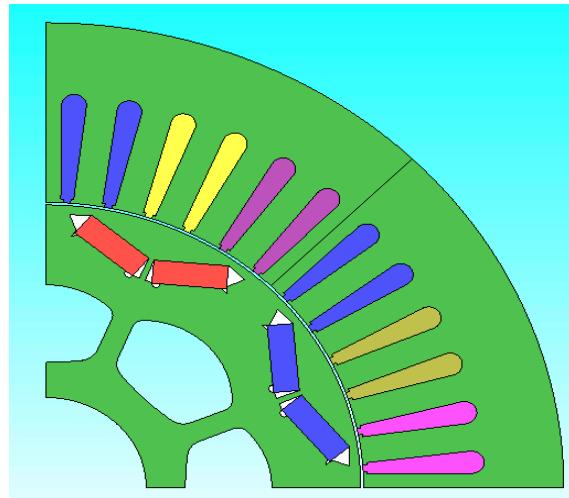


图 1

3、赋属性和网格剖分

根据美国橡树岭国家实验室发布的 Prius 混合电动汽车的实验研究报告，又结合 JMAG 丰富的材料库，本文选择与真实材料接近的材料赋给 IPMSM。值得一提的是 Prius2010 的 IPMSM 每槽导体数是 11 匝，导体截面积大、电阻小适合大电流运行。JMAG 网格剖分简单易行，特别是其气隙可以自动多层划分，沿圆周方向的剖分更是方便。图 2 是 1/4 电机模型的网格剖分图。图 3 是针对气隙剖分的放大示意图。可以看出气隙的剖分比较细，这对准确分析 IPMSM 的定位力至关重要。

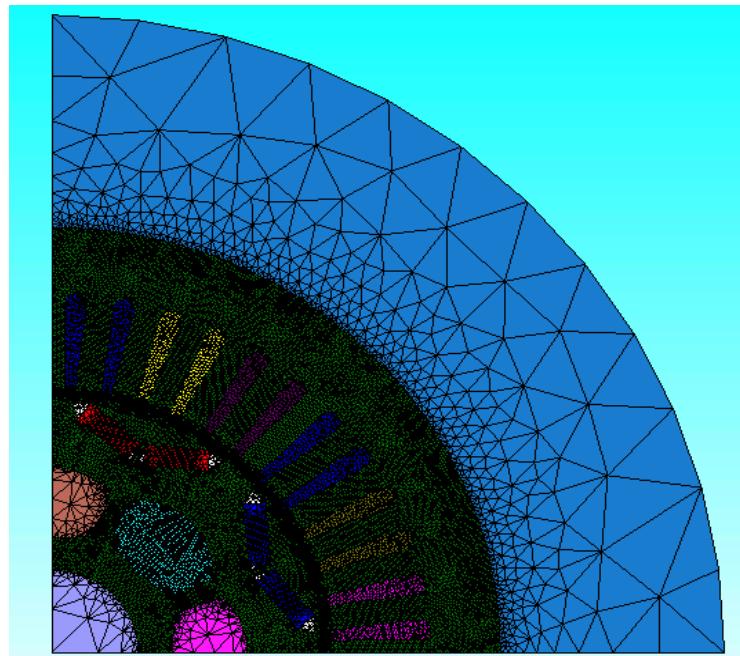


图 2

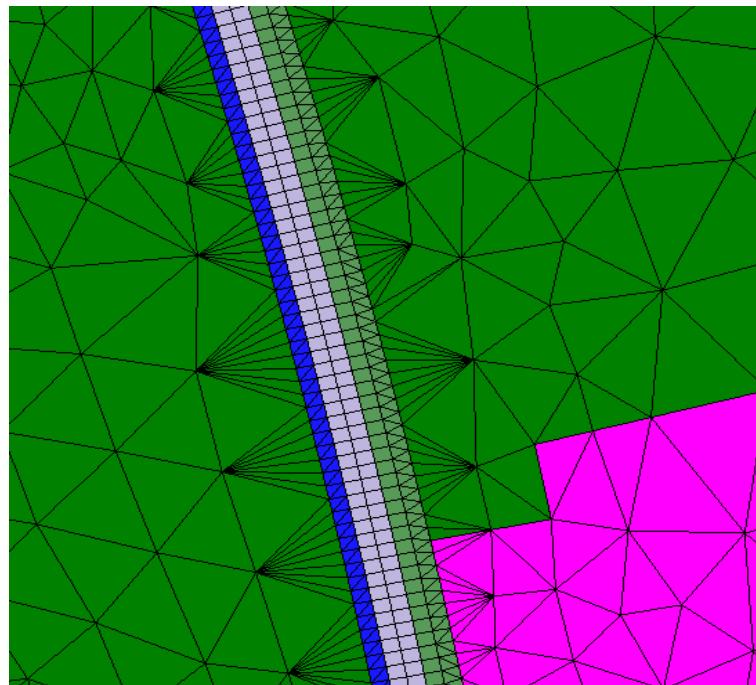


图 3

4、空载仿真

4.1、永磁磁链波形

永磁电机空载磁链波形的正弦度影响电机的出力和转矩波动。从图 4 所示的永磁磁链波形可以看出 Prius2010 的 IPMSM 磁链正弦度不是很好，这将在下面的空载反电势得到进一步验证。

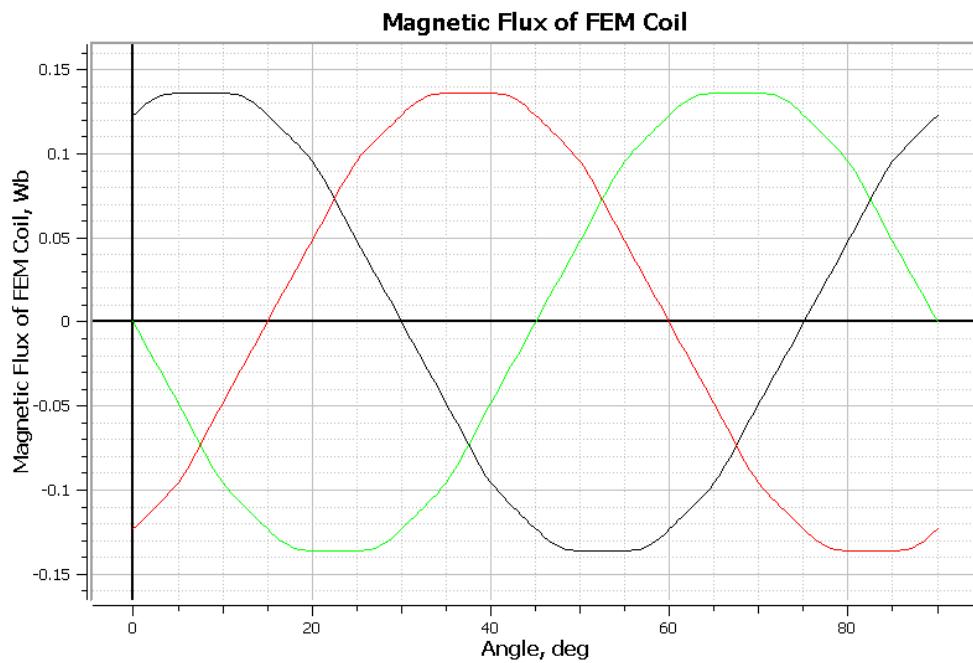


图 4

4.2 2795r/min 下的空载反电势波形

IPMSM 在转速 2795r/min 下的空载反电势波形如图 5 所示。明显看出其反电势波形不正弦，谐波含量大。这里对比一下 JMAG 仿真结果和 Maxwell 的仿真结果。Maxwell 下的输出结果如图 6 所示。对比发现两者的幅值和波形都很相似，可以相互验证两款软件的计算精度。

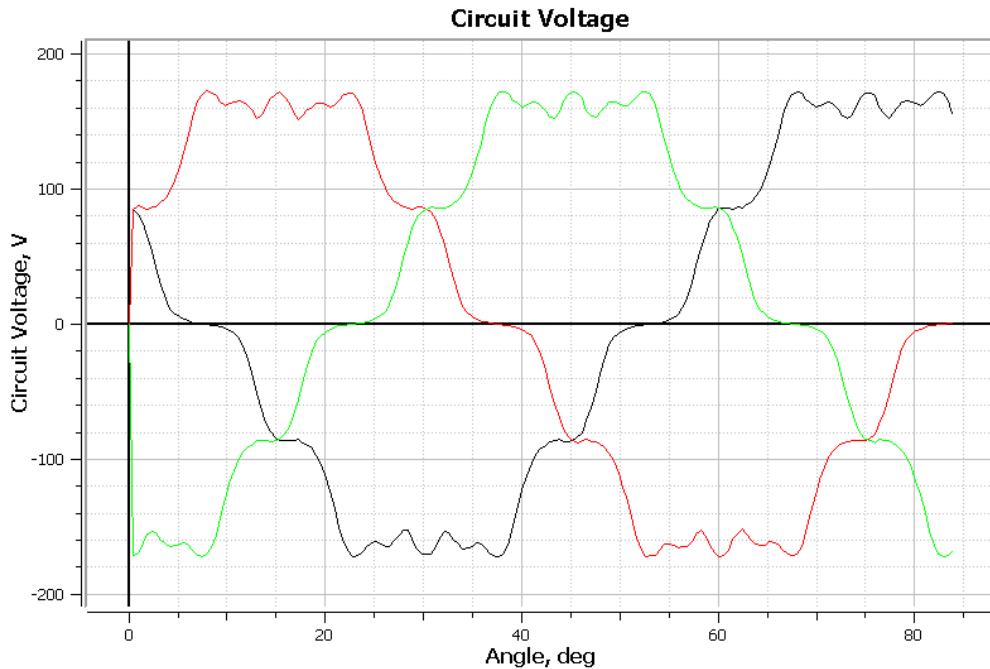


图 5

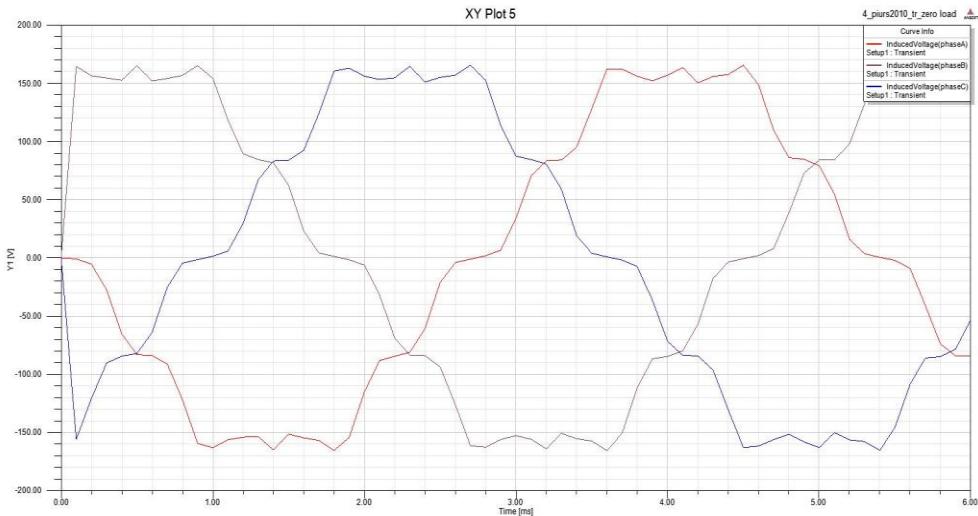


图 6

4.3 定位力波形

定位力是永磁电机的固有现象，只能削弱无法避免。定位力太大，影响电机的性能。Prius2010 的 IPMSM 是 48 槽 8 极电机，槽数与极数的最小公倍数是 48，故电机定位力周期是 $360^\circ / 48 = 7.5^\circ$ 。图 7 是 JMAG 软件下的定位力波形，其周期是 7.5° 。理论分析和实际仿真结果一样。图 8 是 Maxwell 下的定位力波形，

与 JMAG 结果很相近。但值得一提的是，Maxwell 要仿真定位力，需要细剖分和小步长，这需要很长的仿真时间。JMAG 的优势在这里很好的展现出来——算的准、算的快！

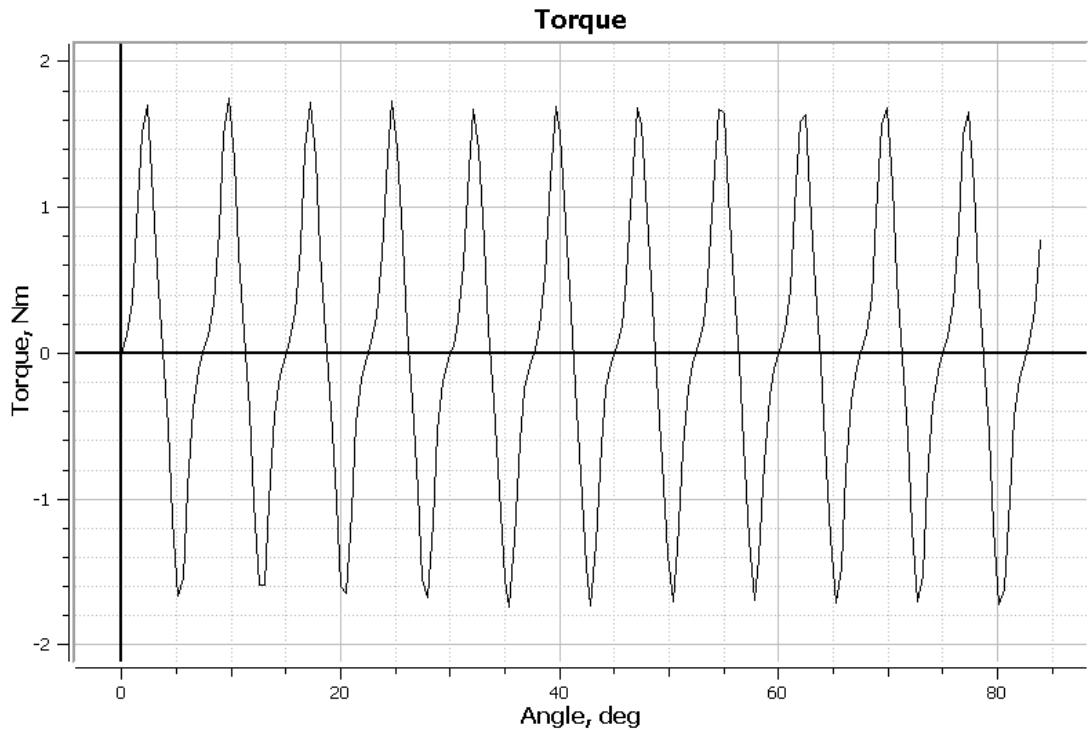


图 7

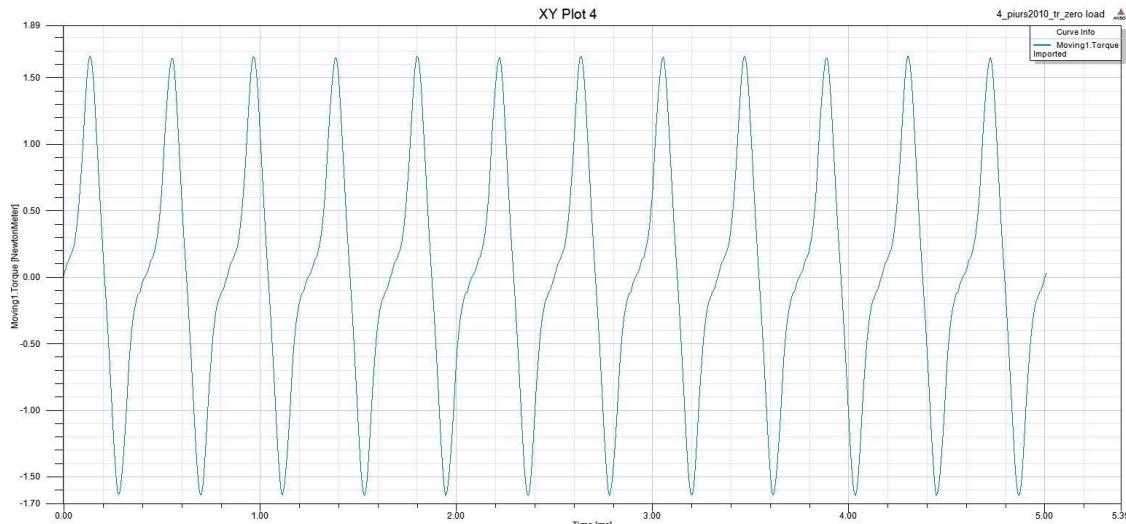


图 8

5、加载仿真

Prius2010 的电机是凸极式永磁同步电机，若采用 $Id=0$ 控制，则无法发挥凸极电机的优势。加载仿真是给电机加三相对称的电流源，并勾选其相位角为变量，对其进行参数化扫描，找出使 IPMSM 出力最大的电流源相位角。所加电流源峰值是 100A，电流源相位角由 150° 变到 195° ，步长是 5° 。电机转速是 3000r/min。图 9 是电机平均转矩随电流相位角变化的

曲线。从图中可以看出最大转矩不在 $Id=0$ 处,且最大转矩要比 $Id=0$ 控制算法下的转矩大 40% 左右。这也说明了 Prius2010 的 IPMSM 凸极系数高。图 10 是加载后的电机磁密云图。图中可看出电机在加载运行时饱和还是比较明显。但是电动汽车工作点经常变动, 电机不是一直工作在重载工况下, 故这些短时重载下的饱和可以允许。

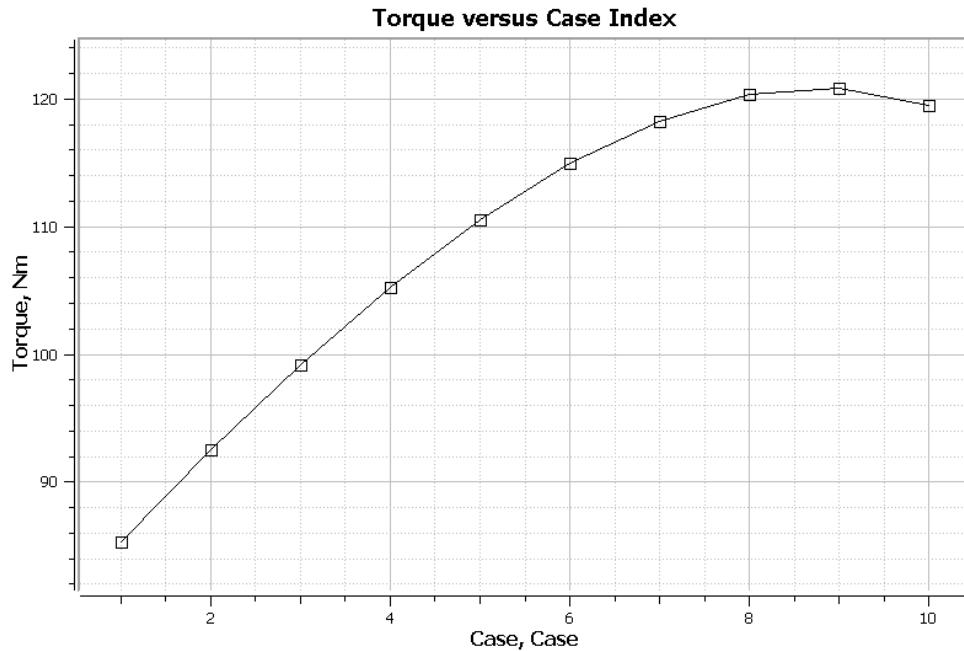


图 9

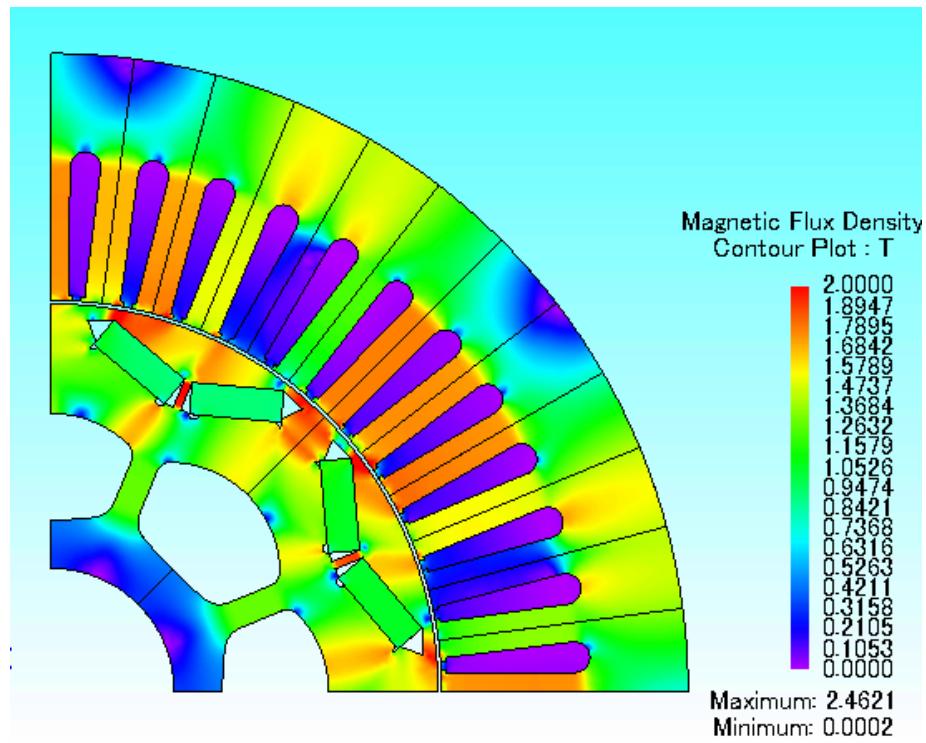


图 10

6、 结论

永磁电机在电动汽车中具有很好的应用前景。利用有限元软件设计适合电动汽车用的高功率密度电机是一项很重要的工作。本文应用 JMAG 软件对 Prius2010 的电动机进行基本的电磁仿真并与 Maxwell 软件仿真结果对比。从中发现 JMAG 在建模，网格剖分和运行速度上都有很好的优势。JMAG 软件可以使设计人员节省大量的仿真时间，是一款很不错的软件。

7、 参考文献

- [1]、唐任远.《现代永磁电机设计与理论》.机械工业出版社, 2012.
- [2]、Burress T A, Campbell S L, Coomer C, et al. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system[R]. Oak Ridge National Laboratory (ORNL); Power Electronics and Electric Machinery Research Facility, 2011.