

# 基于 JMAG 的自启动永磁同步电动机电磁分析

## Electromagnetic Analysis of Line-start Permanent Magnet Synchronous Motor Based on JMAG

冯鑫径 杨凯

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 本文介绍了一种两极自启动永磁同步电动机, 以功率等级为 100hp 的样机为例进行了磁路设计和电磁分析。论文首先介绍了自启动永磁同步电动机的基本运行原理和两极电机的结构设计特点。电机采用径向磁路结构, 每个磁极由四块永磁体拼接而成。利用 JMAG 软件, 对电机进行了全模型建模, 并采用场路结合的时步有限元方法对电机进行了电磁场分析。通过对空载及负载稳态运行时的反电势、电磁转矩等关键波形的分析, 验证了电机参数设计的合理性。

**关键词:** 自启动永磁同步电动机; 电磁场; 有限元分析; JMAG

**Abstract:** This paper introduces a two-pole line-start permanent magnet synchronous motor (PMSM), and provides the magnetic circuit design and electromagnetic analysis of a 100hp line-start PMSM. First of all, the operating principle and structural features of the line-start PMSM are described briefly. The overall design scheme of the motor is introduced, and an interior rotor structure is presented, which adopts radial-set permanent magnets with multi-section for each pole. Then, a motor model is established, with the aid of the finite-element analysis software JMAG-Studio. The transient electromagnetic field is calculated and analyzed using the time-stepping finite-element method (FEM) coupled with field and circuits. The starting process and steady-state performance are simulated, and the results verify the model and the rationality of the motor parameter design.

**Key words:** line-start PMSM, electromagnetic field, finite-element analysis, JMAG

## 1 引言

自启动永磁同步电动机, 也可称为异步启动永磁同步电动机, 是一种较为新型的永磁电机。其定子结构与励磁同步电动机相同, 只是转子上以永磁体替代了励磁绕组, 并取消了电刷、滑环等零件, 结构上与感应电动机相似, 因此容易从感应电动机派生。

自启动永磁同步电动机的转子上设置了起动鼠笼, 依靠转子绕组产生的异步转矩即可实现起动。起动完成后, 转子绕组不再起作用, 由转子永磁磁极和定子绕组共同作用产生恒定的驱动转矩, 电动机以同步转速正常运行。自启动永磁同步电动机效率高、功率因数高, 具有明显的节能效果, 同

时结构简单、体积小、重量轻，转速恒定、噪声低，经济运行范围宽，特别适用于：(1) 对节能要求高的场合；(2) 多台电动机同步运行的场合。

本文提出了一台 100hp 的两极自启动永磁同步电动机的设计方案，并利用 JMAG 软件对电机电磁场进行了有限元分析，对关键参数进行了核算。通过空载及负载稳态运行仿真分析，验证了电机参数设计的合理性。

## 2 两极自启动永磁同步电动机的结构特点

自启动永磁同步电动机一般采用内置式磁路结构，即永磁体位于转子铁心内部。电机要获得较高的稳态性能指标就要增加永磁体用量，而要获得较好的起动性能又要求转子槽不能太浅。因此，永磁体与转子槽在转子空间上相互竞争，在两极电机中这一问题尤为突出。针对此问题，一些学者提出了如图 1 所示的转子结构。这种结构通过省去几个转子槽，为永磁体提供了更大的安放空间。但是这种不对称的转子槽分布可能对电机起动性能造成不利的影响，而且永磁体的安装也比较困难，所以并非理想的结构方式。

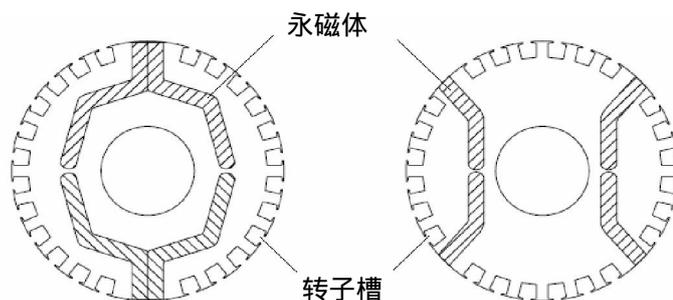


图 1 两种内置式两极永磁电机转子结构

理想的永磁体安放方式是圆弧式，如图 2 所示，既保证了转子槽的均匀分布，又可提供较大的永磁体安放空间。但圆弧式永磁体的加工成本较高，永磁体用量较多。出于电机性能和经济成本的综合考虑，本文采用多段组合式的径向磁路结构，如图 3 所示，每个磁极由四块相同的条形永磁体构成，呈类似圆弧式安放，其效果与图 2 所示结构相当，且永磁体用量可减少，加工成本低。为了更好的散热，转子铁心开有通风孔。

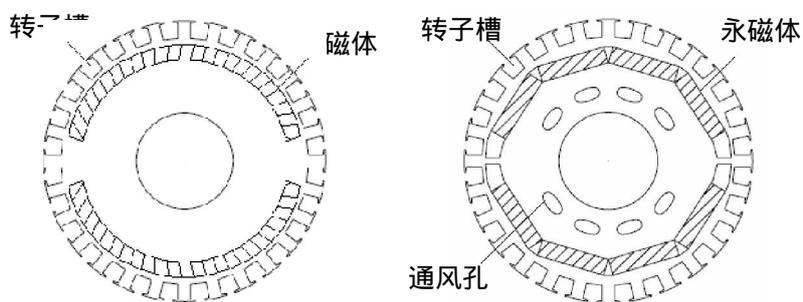
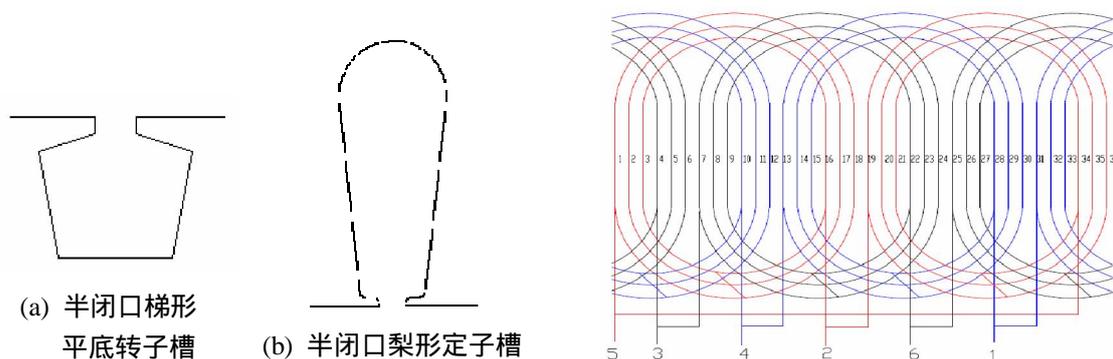


图 2 圆弧式永磁体安放形式

图 3 多段组合式永磁体安放形式

自启动永磁同步电动机的转子槽通常采用平底槽，以利于有效隔磁；为提供足够的空间安放永磁体，槽高度较小，集肤效应远不如感应电机明显，而异形槽形状复杂、冲模制造困难，故多采用梯形槽。出于提高起动转矩和减小起动电流的考虑，本文采用半闭口梯形平底槽，槽形如图 4(a)所示。

自启动永磁同步电动机的定子结构与感应电动机相同,本文采用常用的半闭口梨形槽,如图 4(b)所示。为减小杂散损耗,定子三相绕组通常为星形联结,本文在两极电机中采用单层同心式绕组,其优点是下线方便,端部不重叠,散热好,安装方便。绕组联结方式如图 5 所示。



(a) 半闭口梯形  
平底转子槽

(b) 半闭口梨形定子槽

图 4 定、转子槽形

图 5 三相星形同心式绕组

自启动永磁同步电动机定子的槽数选择原则与感应电动机相同,而定、转子槽配合则稍有不同。对于内置径向式转子磁路的永磁电机,为了提高制造工艺和便于电动机极弧系数的控制,转子槽数通常在定转子槽配合选用原则容许范围内,选取为电机极数的整数倍。本文中采用 36/28 的槽配合。

### 3 有限元分析模型建立

进行永磁电机设计时,为了提高计算的准确度,需要直接进行电磁场数值计算和分析。自启动永磁同步电动机的一些特殊电磁过程以及磁极结构形状与尺寸优化、局部失磁、起动过程等,也需要运用电磁场数值分析。本文采用场路结合有限元法。对设计的 100hp 两极自启动永磁同步电动机进行了二维稳态和动态电磁场求解。

样机基本数据如表 1 所示:

表 1 电机基本数据

参数	取值
额定功率	100 hp
额定电压	400 V
极数	2
额定频率	60 Hz
定子槽数	36
转子槽数	28
绕组结构	单层同心式 Y 接
永磁体材料	NdFeB-33EH
硅钢片材料	B50A1300

参照表 1，对样机进行建模，具体过程如下：

1、根据样机给定的参数，在 AutoCAD 中绘制物理模型，并导入 JMAG 软件。由于是两极电机，为便于观察分析结果，建立全模型如图 6 所示。

2、划分区块，并设置材料属性和运动条件。其中，永磁体和硅钢片在 JMAG 软件材料库中不存在，因此根据已知材料的基本参数和特性曲线，采用自定义方式添加。图 7 所示为 B50A1300 硅钢片的磁化曲线。

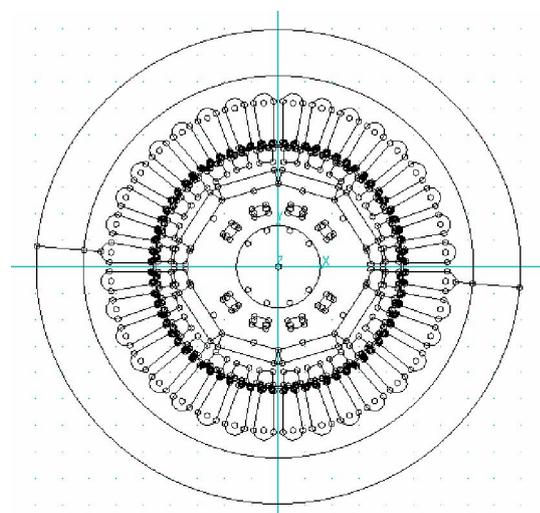


图 6 两极自启动永磁同步电动机模型

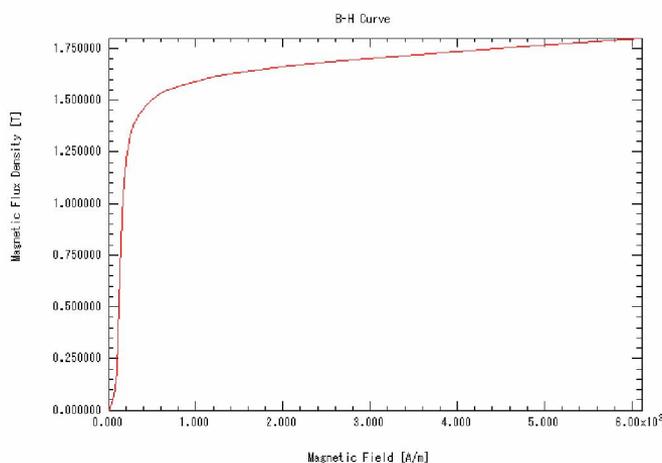
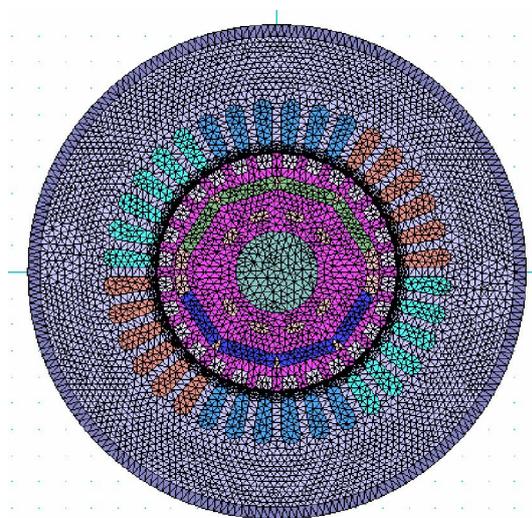
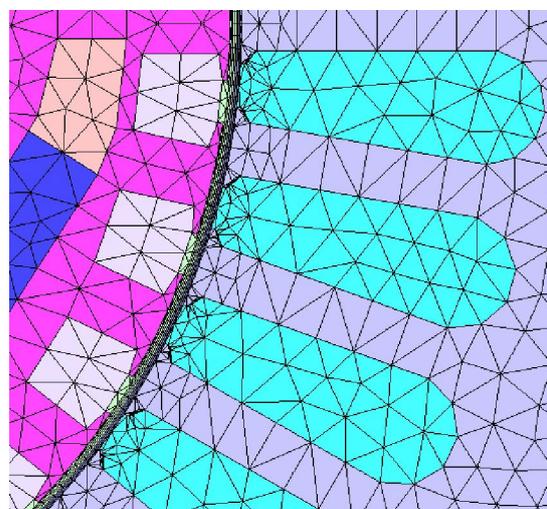


图 7 B50A1300 硅钢片磁化曲线

3、网格剖分。由于 100hp 样机的尺寸较大，若采用自适应网格剖分，对进一步的仿真分析耗时较长。因此，本文对电机实体部分手动剖分，设置为 4mm 均分的网格，气隙处则根据按圆周进行 360 段均分。细分后模型如图 8 所示。



(a) 全模型剖分图



(b) 局部放大图

图 8 网格剖分

### 4 空载稳态分析

进行二维空载电磁场稳态分析时，电动机作为发电机空载运行，转速为同步速。电路设置如图 9 所示。

磁通分布分别如图 10 所示，气隙磁密和空载反电势波形分别如图 11、12 所示。

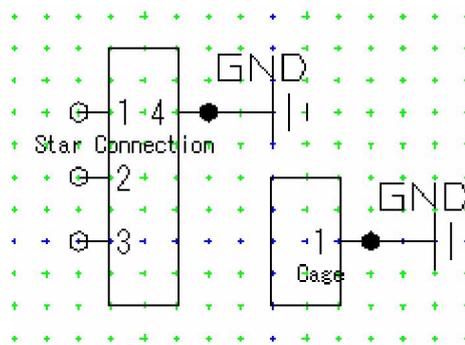
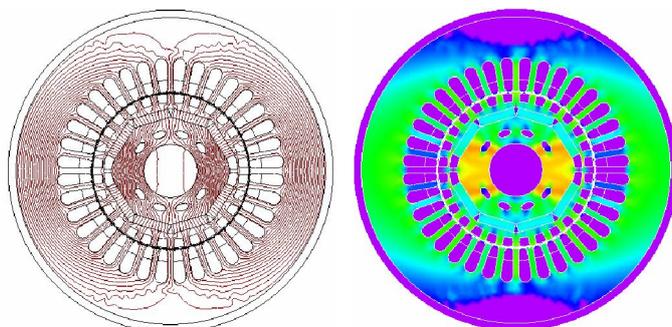


图 9 空载稳态分析电路设置



(a) 磁力线 (b) 磁密云图

图 10 空载磁通分布

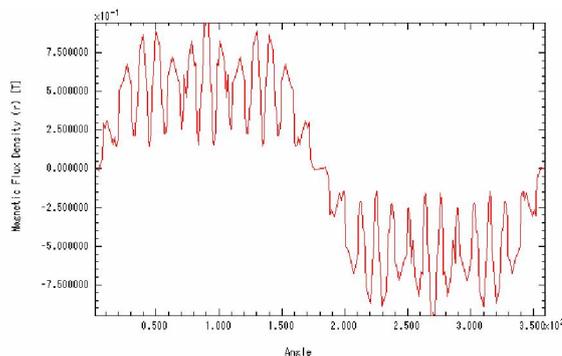


图 11 气隙磁密波形

对图 12 波形进行傅里叶分解，可计算得到空载反电势有效值  $E_0=191V$ ，与磁路法设计值 205V 相差 6.8%。由于磁路法设计时，对电机极弧系数、漏磁系数等参数的选取存在经验误差，反电势的计算存在一定误差，因此认为借助 JMAG 软件进行数值计算的结果更为准确。在优化设计时，可将有限元电磁场计算的结果代入设计程序重新进行核算。

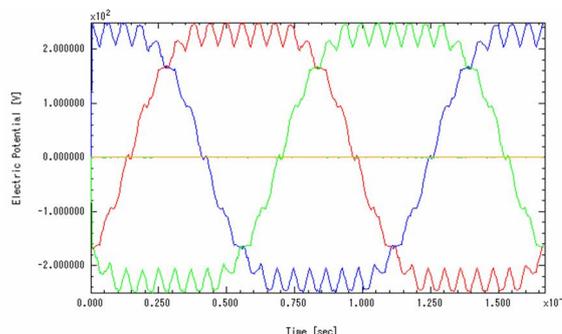


图 12 空载反电势波形

### 5 负载稳态分析

二维负载电磁场稳态分析与空载时的步骤相同，只是在电路设置时添加三相对称电流源，如图 13 所示，电流有效值根据额定设计参数设置为  $I_1=131A$ 。

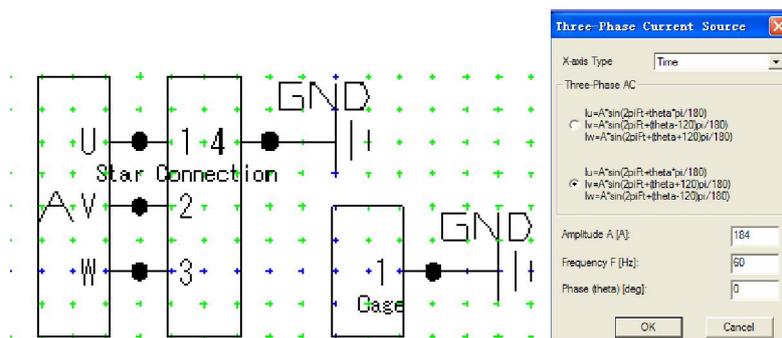


图 13 负载稳态分析电路设置

负载稳态运行时电磁转矩波形如图 14 所示，平均值大约为 180Nm。需要指出的是，此时分析得到的电磁转矩并非电动机的额定转矩，而是电动机运行在某一稳定工作点时的稳态转矩，此时的功角并不一定满足额定运行条件。

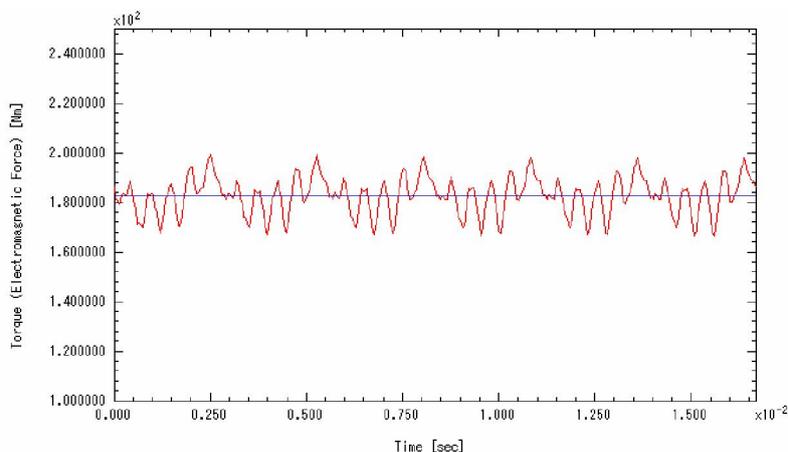


图 14 负载稳态电磁转矩

## 6 起动过程分析

采用场路耦合法对样机模型进行瞬态电磁场求解，改用三相交流电压源，根据额定设计参数，相电压有效值设置为  $U_N=230V$ 。电路设置如图 15 所示。

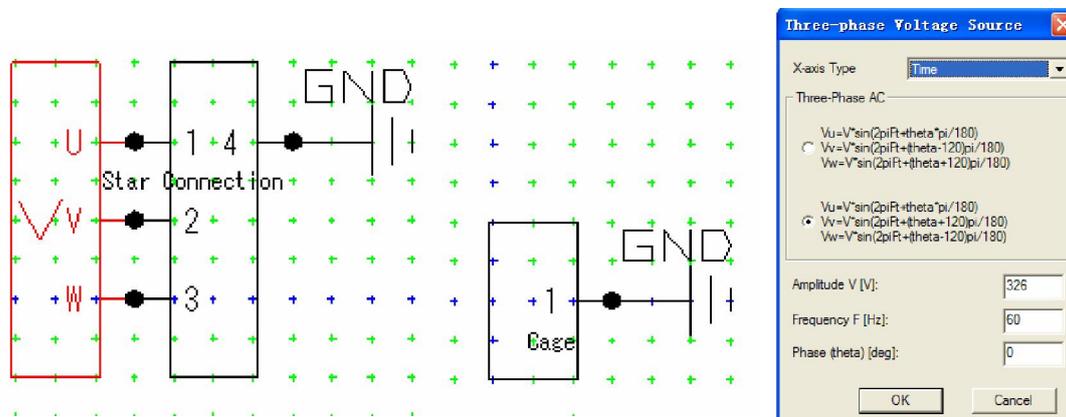


图 15 起动过程仿真电路设置

### 6.1 空载起动过程仿真分析

在 motion 设置中将 Definition 项选为 Equation of Motion，在 setting 中设置负载转矩为 0，进行空载起动仿真分析。图 16 为空载起动电流仿真曲线，图 17 和 18 分别为空载起动转速和转矩的仿真曲线。

从空载起动过程可以看出，自起动永磁同步电动机的空载电流很小，牵入同步时转速曲线较陡，能够顺利牵入同步，起动完成后达到同步转速，电磁转矩几乎为 0，与空载起动相印证。

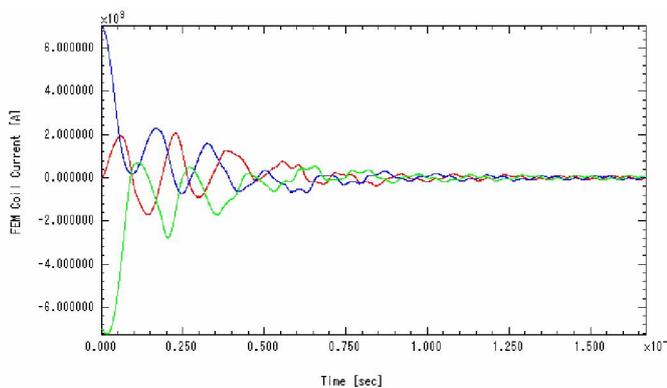
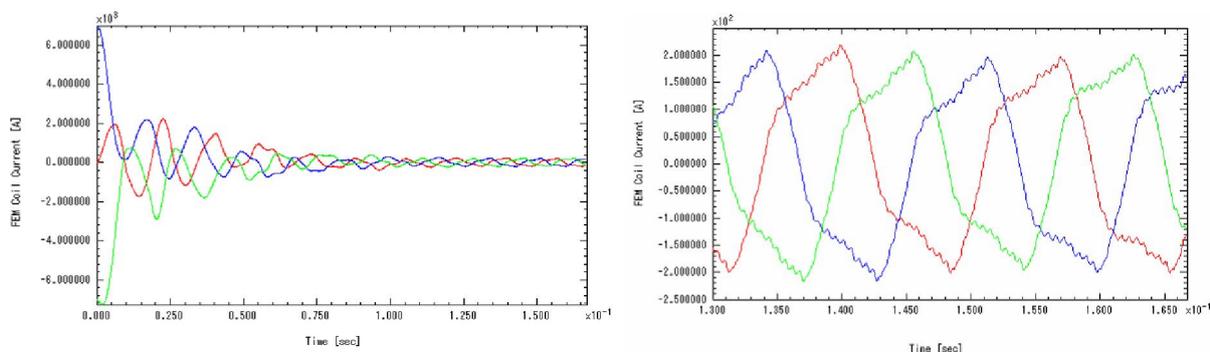
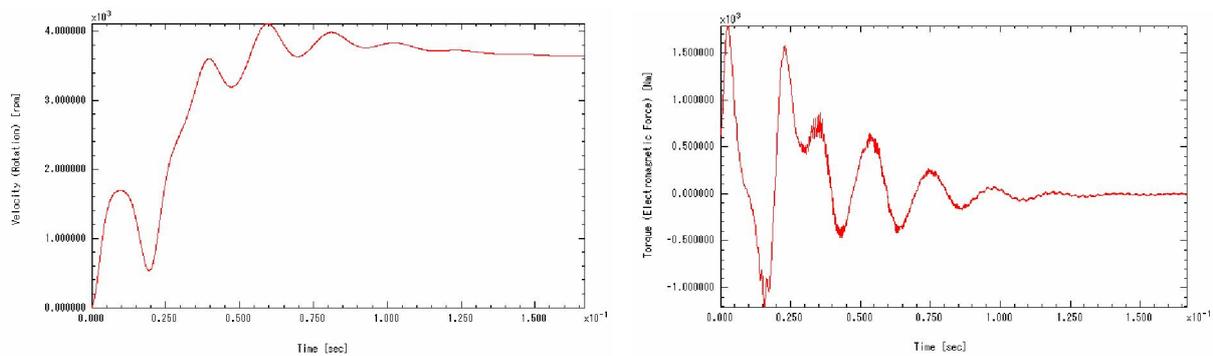


图 16 空载起动定子电流



(a) 起动过程中的电流变化

(b) 稳定后电流波形

图 19 负载起动定子电流

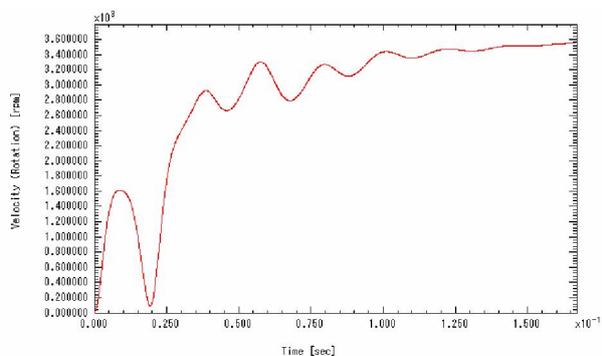


图 20 负载起动转速

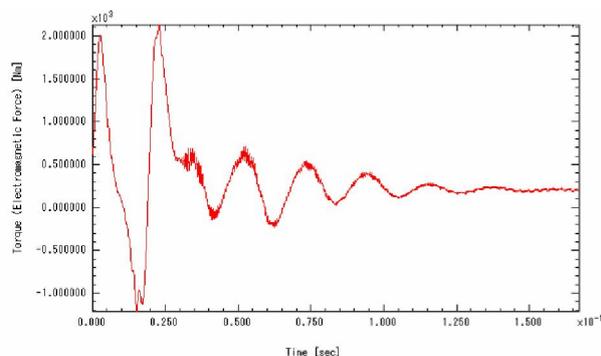


图 21 负载起动转矩

对图 19(b)稳定后的电流波形进行傅里叶分解，可计算出定子相电流有效值为  $I_1=132.9$  A。

从负载起动过程可以看出,自起动永磁同步电动机带额定负载可牵入同步,转速曲线陡度较好,起动完成后达到同步转速,电磁转矩约为 200Nm,稳定时定子相电流 132.9A,与设计值的 131A 偏差小于 1.5%,说明额定电流值的设计比较合理。由上述分析结果,可以计算出稳定运行时该电动机输出功率为 102.6hp (忽略杂散损耗和摩擦损耗),说明设计的样机能够达到稳态功率指标。

## 7 结论

本文对设计的一台 100hp 两极自起动永磁同步电动机样机进行了二维电磁场有限元分析,基于 JMAG 软件的建模和数值分析功能,获得了不同工况下样机的性能参数和曲线。通过有限元仿真分析,验证了电机设计方案的合理性,有利于进一步优化工作的开展。

## 7 参考文献

- [1] 王秀和, 杨玉波, 朱常青等. 《异步起动永磁同步电动机—理论、设计与测试》. 北京: 机械工业出版社, 2009
- [2] 唐任远. 《现代永磁电机》. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [3] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp. 68-73.
- [4] C. A. da Silva, J. R. Cardoso, R. Carlson, "Analysis of a Three-Phase LSPMM by Numerical Method," IEEE Trans. on Magn., vol.45, no.3, pp. 1792-1795, 2009.
- [5] T. T. Ding, N. Takorabet, F. M. Sargos, and X. H. Wang, "Design and Analysis of Different Line-Start PM Synchronous Motors for Oil-Pump Applications," IEEE Trans. on Magn., vol.45, no.3, pp. 1816-1819, 2009.
- [6] Q. F. Lu and Y. Y. Ye, "Design and Analysis of Large Capacity Line-Start Permanent-Magnet Motor," IEEE Trans. on Magn., vol.44, no.11, pp. 4417-4420, 2008.
- [7] C. K. Lee and B. I. Kwon, "Design of post-assembly magnetization system of line start permanent-magnet motors using FEM," IEEE Trans. on Magn., vol.41, no.5, pp. 1928-1931, 2005.
- [8] A. M. Knight and C. I. McClay, "The design of high-efficiency line-start motors," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol.36, no.6, pp. 1555-1562, 2000.