

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.013

转子槽参数对开槽实芯转子永磁电机的影响研究

上官璇峰, 李正修, 蒋思远

(河南理工大学 电气学院, 河南 焦作 454000)

摘要:针对小功率感应电动机效率较低、功率因数不高等问题,对已有的三相感应电动机改造为一种新型同步电机—开槽实心转子自启动永磁同步电动机进行了研究。对Y90L-4, 1.5 kW型感应电动机进行了分析,利用其定子,重新设计—新型转子。所设计的转子采用实芯结构,沿转子铁芯外圆周开槽,且铁芯内置永磁极。利用有限元计算并分析了转子槽参数对电机自启动能力和稳态运行性能的影响,归纳出了其中的规律性。最后对比了感应电动机和基于改进的开槽实心转子自启动永磁同步电动机的启动和稳态运行性能。研究结果表明:开槽实心转子自启动永磁同步电动机的启动转矩倍数更大,不同负载转矩下的功率因数更高。

关键词:开槽实芯转子;永磁同步电动机;自启动;稳态运行性能

中图分类号:TH39;TM351

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1293-06

Influence of rotor slots parameters on permanent-magnet motor with slotted solid rotor

SHANG-GUAN Xuan-feng, LI Zheng-xiu, JIANG Si-yuan

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency and power factor of the low power induction motor, a new motor-line-start permanent magnet synchronous motor with slotted solid rotor was studied. which was transformed by existing three-phase induction motor, The motor developed by utilizing the stator of the Y90L-4, 1.5 kW induction motor and redesigning the rotor was presented after the analysis for the induction motor. With a solid structure, the rotor was grooved along the outer circumference of its core, which contained built-in permanent magnet poles. Through the finite element calculation, the influence of rotor grooves parameters on the line-start ability and steady-state performance of the motor were analyzed, then the regularity was summarized. Finally, the starting and steady-state performance were compared between the induction motor and based on the improved LSPMSM with slotted solid rotor. The results indicate that the LSPMSM with slotted solid rotor has bigger starting torque ratio and higher power factor under different load torque than that of the induction motor.

Key words: slotted solid rotor; permanent magnet synchronous motor (LSPMSM); line-start; steady-state performance

0 引言

感应电动机在各行各业得到了广泛应用^[1]。但是,小功率感应电动机的效率较低,功率因数不高,因此对其进行节能改造很重要^[2]。带鼠笼绕组的自启动永磁同步电动机不仅克服了感应电动机效率和功率

因数低的缺点,而且保留了感应电动机能够直接启动的优点。然而,这类电机仅仅应用于对启动性能要求不高的场合。

近几年来,在开槽实芯转子异步电动机的基础上衍生出了一种新型同步电机—开槽实芯转子自启动永磁同步电动机。文献[3-6]中介绍了开槽实芯

收稿日期:2017-02-23

作者简介:上官璇峰(1965-),男,河南浚县人,博士,教授,硕士生导师,主要从事轴向磁通永磁电机、直线电机及其控制性能分析、优化设计方面的研究。Email:sgxf@hpu.edu.cn

转子自启动永磁同步电动机的良好性能。这种类型的自启动永磁同步电动机在重载和大转动惯量的工况下具有更好的同步能力^[7]。大启动转矩是实芯转子所固有的优势,而且在实芯转子表面开槽可增大其牵入同步能力^[8]。和带鼠笼绕组的自启动永磁同步电动机相比较,该开槽实芯转子自启动永磁同步电动机结构和制造工艺更简单、更坚固、成本更低,尤其适合于高速电机。因此对其进行研究与制造显得十分有意义。

本研究计算分析转子槽参数和永磁体磁化高度对开槽实芯转子自启动永磁同步电动机启动和运行性能的影响。

1 电机原理与样机参数

1.1 电机结构与原理

开槽实芯转子自启动永磁同步电动机的基本结构如图 1 所示。

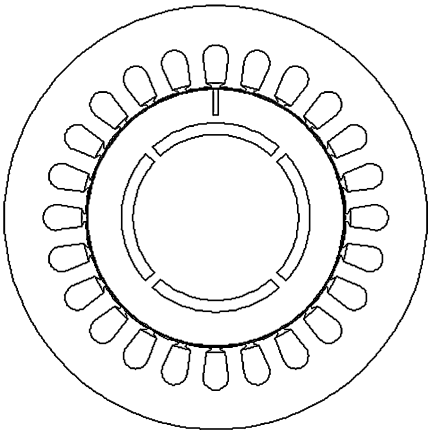


图 1 开槽实芯转子自启动永磁同步电动机

利用实芯转子表面的凹槽迫使定子旋转磁场浸入实芯转子铁芯的更深层,增大能量转换的媒介,从而使电机产生更高的电磁转矩。

瞬态分析采用场路耦合的方法,将外电路方程和有限元方程联立起来,把电机的端电压作为已知量^[9-10]。本研究考虑到有限元求解过程中非线性问题的存在,采用牛顿迭代法进行求解。瞬态分析的主要问题在于求出转矩之前,需要先计算出每一步对应于转子实体中的感应电流。

1.2 电机样机参数

本研究以一台 4 极,1.5 kW 的三相开槽实芯转子自启动永磁同步电动机作为研究对象,其设计参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

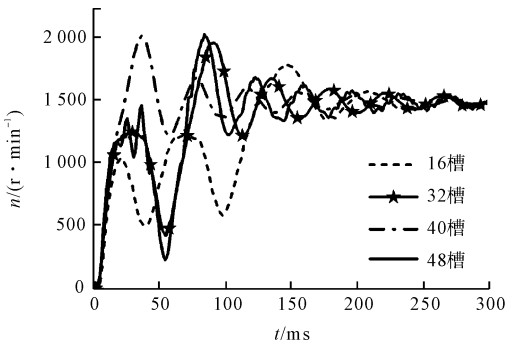
部件	参数/单位	值
定子	定子铁芯	用 Y90L-4 的铁芯
	相间接法	星形连接
	绕线方式	单层链式
	每槽匝数	63
	漆包线径/mm	0.80
	外径/mm	78.6
转子	永磁体磁化高度/mm	3.58
	永磁体极弧系数	0.933
	永磁体矫顽力/(kA·m ⁻¹)	900
	永磁体牌号	N35SH
	转子材料	A3 钢

2 转子槽参数对启动和运行性能的影响

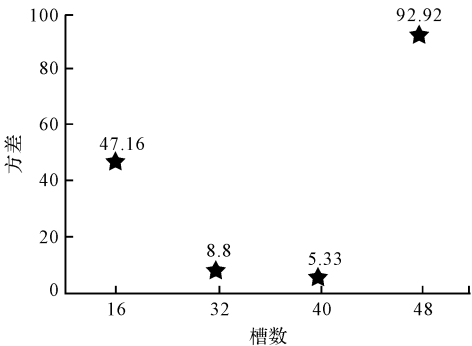
2.1 槽数对启动和运行性能的影响

2.1.1 槽数对启动性能的影响

在电机带额定负载的工况下,槽深 10.7 mm,槽宽 0.8 mm,调整槽数进行讨论转子铁芯槽数对启动性能和转速波动的影响如图 2 所示。



(a) 转子铁芯槽数对启动性能影响



(b) 转子铁芯槽数下转速方差对比

图 2 转子铁芯槽数对启动性能和转速波动的影响

由图 2(a)可见,槽数 40 个,电机具有较好的启动性能。随着槽数的增加,启动性能总体趋势为先优后差,存在一个最优值。由图 2(b)可得,槽数 40 个,电机稳态运行转速波动最小。综合而言,槽数 40 个,电

机不仅起动性能良好,而且稳态运行最平稳。需要说明的是,本研究采用方差描述电机稳态运行时转速波动大小,计算转速方差采用的公式为:

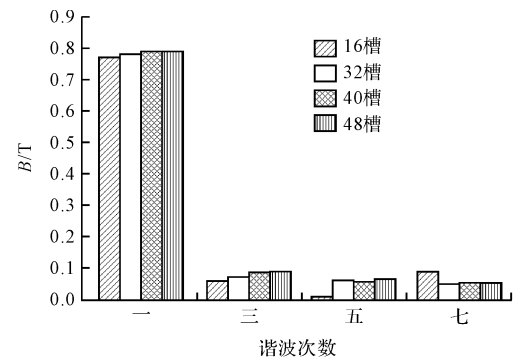
$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

(1)

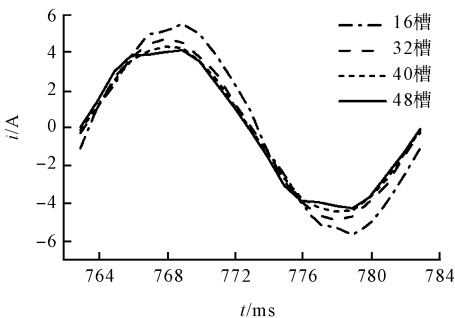
式中: X_i — 随机变量; $\bar{X}$ — 样本均值; n — 样本数目; S^2 — 方差。

2.1.2 槽数对运行性能的影响

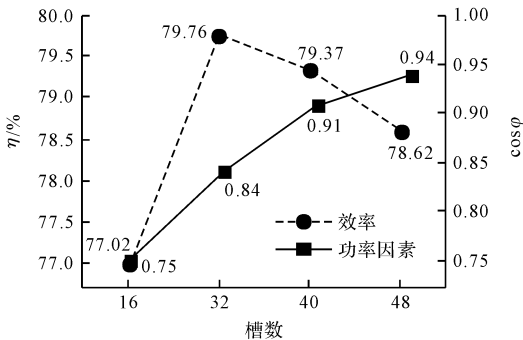
不同槽数对运行性能的影响如图 3 所示。



(a) 合成磁场径向气隙磁密傅里叶分解柱状图



(b) 定子电流随槽数变化



(c) 效率、功率因数随槽数变化

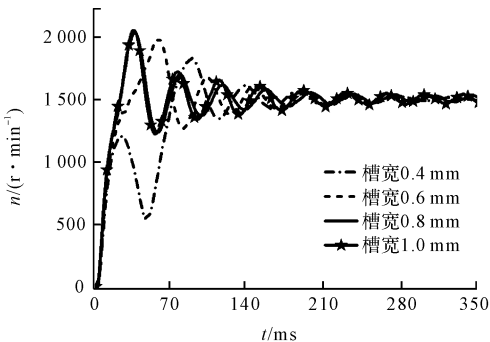
图 3 不同槽数对运行性能的影响

由图 3(a)可得,槽数越多,气隙磁密基波幅值越大。从图 3(b)看出,槽数越多,定子电流越小。由图 3(c)可得,随着槽数的增加,电机的效率变化于 77%~80% 之间,槽数 32 个,电机的效率最高。此外,槽数越多,功率因数越大。

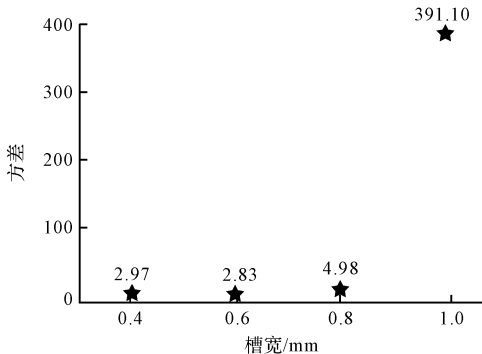
2.2 槽宽对起动和运行性能的影响

2.2.1 槽宽对起动性能的影响

转子铁芯槽宽对起动性能和转速波动的影响如图 4 所示。



(a) 转子铁芯槽宽对起动性能影响



(b) 转子铁芯槽宽下转速方差对比

图 4 转子铁芯槽宽对起动性能和转速波动的影响

在电机带额定负载的工况下,槽数 40 个,槽深 10.7 mm,调整槽宽进行讨论。从图 4(a)看出,槽宽 0.4 mm,电机的起动性能较差,其他情况下,电机的起动性能均较好。从图 4(b)看出,槽宽在 0.4 mm~0.8 mm 之间,电机稳态运行转速波动较小,槽宽大于 0.8 mm,电机稳态运行转速波动非常大。综合而言,槽宽 0.6 mm,电机不仅起动性能良好,而且稳态运行最平稳。

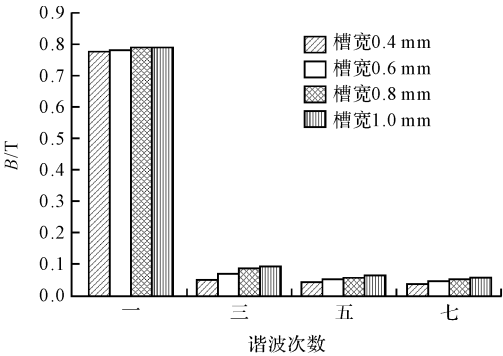
2.2.2 槽宽对运行性能的影响

不同槽宽对运行性能的影响如图 5 所示。由图 5(a)可得,槽宽越宽,气隙磁密基波幅值越大。从图 5(b)看出,槽宽越宽,定子电流越小。由图 5(c)可得,槽宽越宽,效率和功率因数越大。值得一提的是,槽宽由 0.6 mm 增加到 0.8 mm,功率因数增加了 0.08。

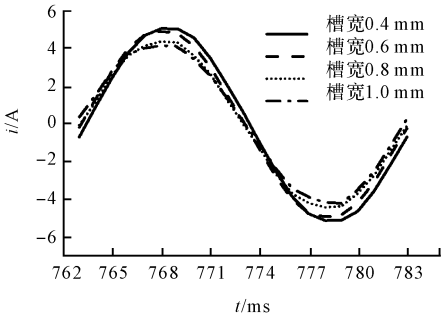
2.3 槽深对起动和运行性能的影响

2.3.1 槽深对起动性能的影响

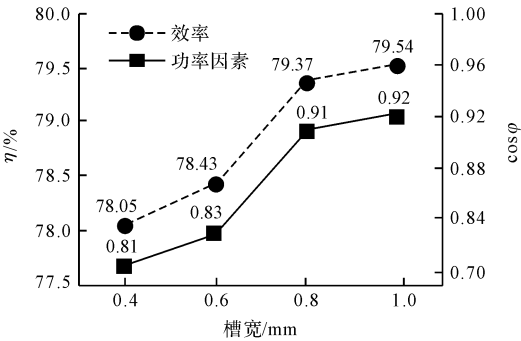
槽深对起动和运行性能的影响,在电机带额定负



(a) 合成磁场径向气隙磁密傅里叶分解柱状图



(b) 定子电流随槽宽变化



(c) 效率、功率因数随槽宽变化

图 5 不同槽宽对运行性能的影响

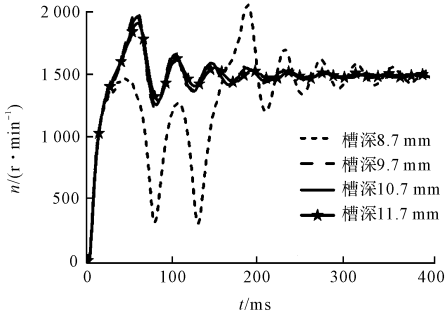
载的工况下,槽数 40 个,槽宽 0.6 mm,永磁体磁化高度 3.58 mm,永磁体极弧系数 0.933,隔磁桥径向高度 0.566 mm,调整槽深进行讨论转子铁芯槽深对起动性能和转速波动的影响如图 6 所示。

从图 6(a)看出,槽深 8.7 mm,电机的起动性能较差,其他情况下,电机均具有较好的起动性能。从图 6(b)看出,槽深 10.7 mm,电机稳态运行转速波动最小。综合而言,槽深 10.7 mm,电机不仅起动性能良好,而且稳态运行最平稳。

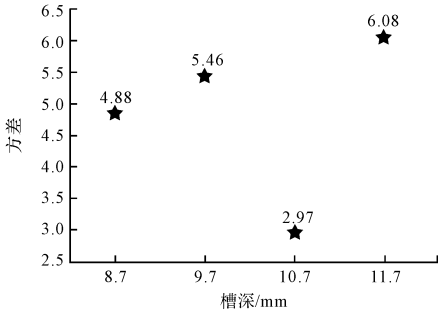
2.3.2 槽深对运行性能的影响

不同槽深对运行性能的影响如图 7 所示。

由图 7(a)可得,槽深越深,气隙磁密基波幅值越小。从图 7(b)看出,槽深越深,定子电流越大。由图 7(c)可得,槽深越深,效率和功率因数越小。

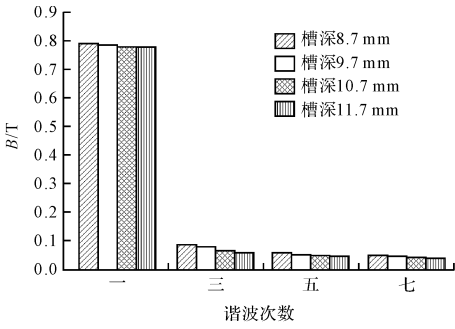


(a) 转子铁芯槽深对起动性能影响

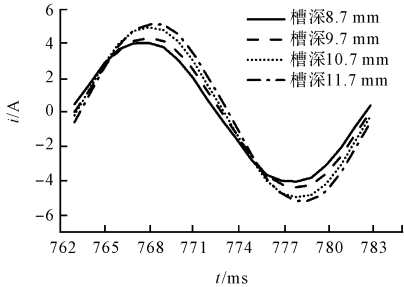


(b) 转子铁芯槽深下转速方差对比

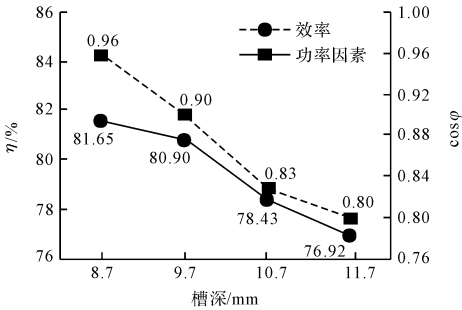
图 6 转子铁芯槽深对起动性能和转速波动的影响



(a) 合成磁场径向气隙磁密傅里叶分解柱状图



(b) 定子电流随槽深变化



(c) 效率、功率因数随槽深变化

图 7 不同槽深对运行性能的影响

3 永磁体磁化高度对起动和运行性能的影响

3.1 永磁体磁化高度对起动性能的影响

永磁体磁化高度对起动和运行性能的影响,在电机带额定负载的工况下,槽数 40 个,槽宽 0.6 mm,槽深 9.7 mm,永磁体极弧系数 0.933,隔磁桥径向高度 0.566 mm,调整永磁体磁化高度进行讨论。永磁体磁化高度对起动性能和转速波动的影响如图 8 所示。

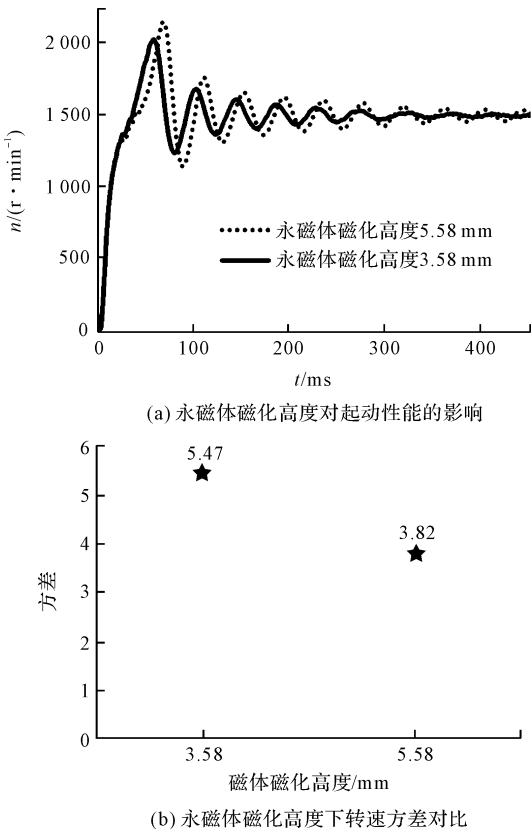


图 8 永磁体磁化高度对起动性能和转速波动的影响

从图 8(a)看出,永磁体磁化高度增加,电机的同步能力变差。由图 8(b)可得,永磁体磁化高度增加,电机稳态运行转速波动变小。综合而言,永磁体磁化高度增加对电机的影响有利有弊。

3.2 永磁体磁化高度对运行性能的影响

不同永磁体磁化高度对运行性能的影响如图 9 所示。

由图 9(a)可得,永磁体磁化高度增加,气隙磁密基波幅值略微增大。从图 9(b)看出,永磁体磁化高度增加,定子电流略微减小,这是由于 A3 钢的磁导率低且转子上漏磁多的缘故。由图 9(c)可得,永磁体磁化高度增加,效率和功率因数略微增大。

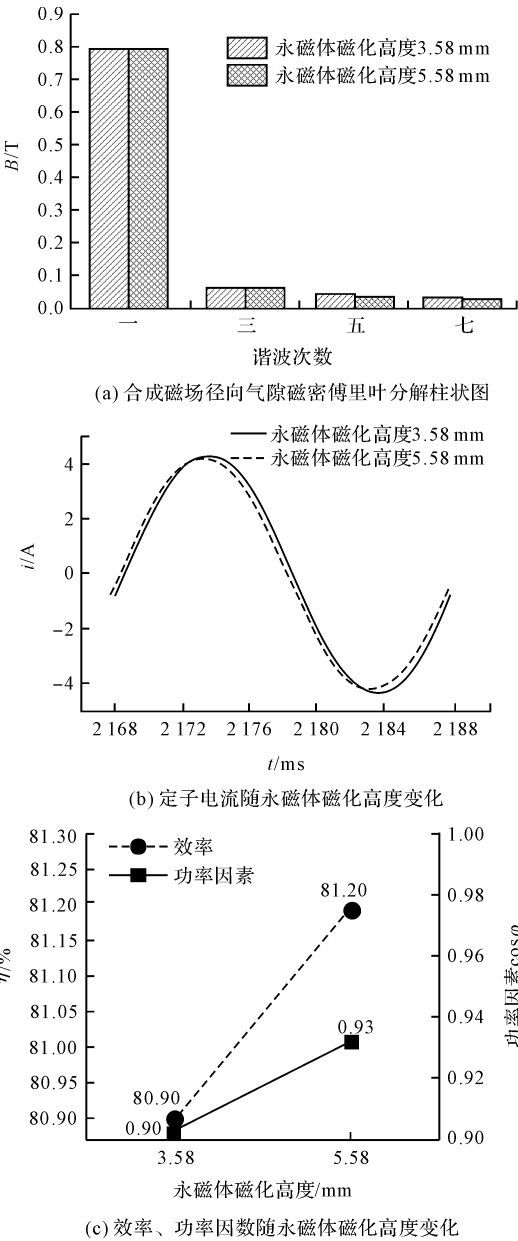


图 9 不同永磁体磁化高度对运行性能的影响

4 电机性能比较

槽数 40 个,槽宽 0.8 mm,槽深 6.23 mm,永磁体极弧系数 0.827,永磁体磁化高度 3.58 mm,隔磁桥径向高度 0.566 mm,对比电机的起动和运行性能。不同负载转矩下运行性能比较如图 10 所示。

由图 10(a)可得,开槽实心转子电机的起动转矩倍数更大。由图 10(b)可得,负载转矩越大,两电机效率之间的差值越小。感应电机额定负载时,两电机效率几乎相等。由图 10(c)可得,轻载时,开槽实心转子电机的功率因数平均高出感应电机 0.1,负载超过 20% 额定负载后,功率因数平均高出将近 0.21。

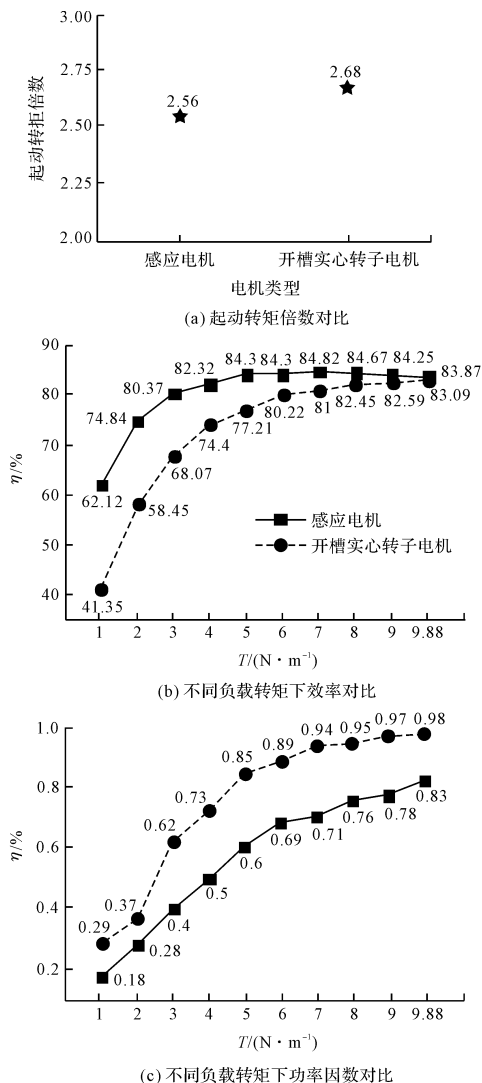


图 10 不同负载转矩下运行性能比较

5 结束语

本研究采用有限元法计算分析了转子槽参数以及永磁体磁化高度对电机启动和运行性能的影响,得出以下结论:

(1)就电机启动性能最优且稳态运行时转速波动最小而言,槽数 40 个、槽宽 0.6 mm、槽深 10.7 mm;

(2)槽数越多或槽宽越宽,合成磁场径向气隙磁密基波幅值越大。相反,槽深越深,合成磁场径向气隙磁密基波幅值越小;

(3)就电机启动性能而言,永磁体磁化高度增加,电机的同步能力变差,稳态运行时转速波动变小。同

样,就电机稳态运行性能而言,永磁体磁化高度增加,定子电流减小,效率和功率因数增大,但永磁体磁化高度增加到一定值以后,由于 A3 钢的磁导率低且转子上漏磁多的缘故,定子电流略微减小,效率和功率因数略微增大;

(4)若希望电机获得较高的效率和功率因数,又兼顾良好的起动性能,槽数 40 个、槽宽 0.8 mm、槽深 9.7 mm,是一个理想的选择。

参考文献 (References):

- [1] LIU Ming-ji, WANG Jing, WANG Xiang-peng. Related design theory and key technology about super-efficient permanent magnet synchronous motors[C]. Proceedings of the 7th China Motor Development Forum in 2008, Shanghai:[s. n.],2008.
- [2] 阮天虎,夏永明,潘海鹏. 基于感应电动机的自起动永磁同步电动机设计[J]. 微特电机,2011,39(11):11-13.
- [3] NIAZAZARI M, MIRSALIM M. Analytical framework for analysis and demagnetization study of a slotted solid-rotor line-start permanent-magnet synchronous motor [C]. Proceedings of 5th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, Iran: IEEE,2014.
- [4] NIAZAZARI M, MIRSALIM M. Effect of rotor slots parameters on synchronization capability of slotted solid rotor line start permanent magnet motor[C]// Proceedings of 4th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. Iran: IEEE,2013.
- [5] M NIAZAZARI, M MIRSALIM. Analytic modeling of a line-start permanent-magnet motor with slotted solid rotor[J]. **Journal of IET Electric Power Applications**,2014,8(7):278-285.
- [6] NIAZAZARI M, MIRSALIM M. Performance analysis of a line-start permanent-magnet motor with slots on solid rotor using finite element method[J]. **Journal of Electric Power Components and Systems**,2013,41(12):1159-1172.
- [7] NIAZAZARI M, MIRSALIM M. PAHNEKOLAEI S M A, et al. Optimum design of a line-start permanent-magnet motor with slotted solid rotor using neural network and imperialist competitive algorithm[J]. **Journal of Electric Power Components and Systems**,2017,11(1):1-8.
- [8] NIAZAZARI M, MIRSALIM M. Line-start permanent-magnet motor synchronization capability improvement using slotted solid rotor[J]. **Journal of IET Electric Power Applications**,2013,7(6):462-469.
- [9] 张耀中. 基于改进型滑模观测器的变频洗衣机用 PMSM 无位置传感器控制[J]. 轻工机械,2015,33(3):44-47.
- [10] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

上官璇峰,李正修,蒋思远. 转子槽参数对开槽实心转子永磁电机的影响[J]. 机电工程,2017,34(11):1293-1298.

SHANG-GUAN Xuan-feng, LI Zheng-xiu, JIANG Si-yuan. Influence of rotor slots parameters on permanent-magnet motor with slotted solid rotor[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(11):1293-1298.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>