

一种大转矩外转子永磁轮毂电机驱动特性分析

史黎明¹, 陈江岸³, 王培龙^{1,2}, 张志华¹, 李耀华¹

(1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室 中国科学院电工研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 威海广泰空港设备股份有限公司, 山东 威海 264200)

摘要: 提出一种大转矩外转子永磁轮毂电机, 可用于纯电动机场摆渡车、机场大巴车、公交大巴车等。合理设计电机外转子的永磁磁极倾斜角, 使电机相反电动势为只含有 3 次谐波的梯形波, 线反电动势为正弦波, 同时不降低电机的输出转矩。分析比较了采用不同矫顽力的磁钢对相反电动势的影响, 兼顾转矩输出能力和电机调速范围后, 选择了拥有合理矫顽力的永久磁钢。同时, 搭建了基于 Simplorer-Maxwell 软件的场路联合仿真平台, 比较、分析了基于正弦波磁场定向控制策略和基于方波控制策略的电机驱动特性。虽然两种方法都能实现转矩控制, 但磁场定向控制策略的转矩波动更小。

关键词: 外转子轮毂电机; 谐波; 驱动特性; 场路联合仿真; 场定向矢量控制; 方波

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)11-0039-06

Analysis on Drive Characteristics of a High Torque Outer Rotor Permanent Magnet In-Wheel Motor

SHI Liming¹, CHEN Jiang'an³, WANG Peilong^{1,2}, ZHANG Zhihua¹, LI Yaohua¹

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Weihai Guangtai Airport Equipment Co., Ltd., Weihai 264200, China)

Abstract: A new large power and high torque outer rotor in-wheel motor was presented, which was used for electric airport shuttle bus, airport bus, bus, etc. By optimizing the pole arc coefficient and pole skew of the permanent magnet, the phase back electromotive force (EMF) was trapezoidal wave that contained mainly 3rd harmonics, line back EMF was sinusoidal wave, and the output torque of the motor was improved. The effects of permanent magnet with different coercivity on the electromotive force were compared and analyzed. Considering the torque output and adjustment range of motor speed, reasonable coercivity was applied. Besides, the field-circuit coupling simulation platform was built based on Simplorer-Maxwell software, and drive characteristics of motor controlled by field oriented vector control and square wave control were compared. Although both control strategies were applicable for this type of motor, the field oriented vector control showed better performance with less torque ripple.

Key words: outer rotor in-wheel motor; harmonics; drive characteristics; field-circuit coupling simulation; field oriented vector control; square wave

作者简介: 史黎明(1964—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为特种电机分析和控制、无线电能传输。

陈江岸(1972—), 男, 研究员, 研究方向为飞机场地面供电技术和特种电机驱动系统。

王培龙(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为特种电机设计分析与控制。

0 引言

轮毂电机又称车轮内装电机,将电机的动力直接传递至车轮,没有变速箱和传动轴及车桥减速装置等,驱动系统和整车结构简单紧凑,传动效率高,续航里程长,车轮的动态响应快。同时,轮毂电机具有灵活、精确的控制特性,容易实现车轮的电气制动和能量回馈制动,还可实现多种复杂的驱动方式,提高汽车行驶性能等^[1-5],是当前电驱动系统中一个重要的研究方向。

轮毂电机由于增加了轮子质量和体积,从而增大了簧下质量和轮毂的转动惯量,对车辆的操控有一定的影响,更适用于机场摆渡车或是城市公交车等较大型车辆及后轮驱动的车辆。

目前轮毂电机的研究主要集中在电机本体的新型结构和高性能控制策略。文献[6-7]提出一种新型双凸极轮式内转子永磁轮毂电机并给出了电机的电磁设计方案,对电励磁双凸极轮毂电机空载性能进行有限元分析,研究了不同励磁电流下电机的气隙磁密特性、磁链特性以及反电动势波形,为电机负载时选择励磁电流和换相角度提供了依据。文献[8]研究外转子直驱式永磁电机,介绍了绕组设计、槽极数组组合选择和磁钢设计,提出了降低齿槽转矩和不平衡磁拉力的措施等。

针对轮毂电机本体和控制上带来的转矩脉动问题,有学者对极对数不同的整数槽绕组电机模型和分数槽绕组电机模型的绕组和定位转矩进行了研究,采用分数槽绕组减小电机定位转矩与转矩脉动。文献[8-9]给出了转子磁极结构、电枢绕组形式以及极槽配合的选用原则,采用分数槽集中绕组结构削弱谐波电动势的影响,降低齿槽转矩。同时,文献[9]还利用霍尔传感器获得的低精度位置信息对转子位置进行估算,并利用估算的精确位置信息通过正弦调制的方式控制轮毂电机,获得大转矩输出。针对转矩波动问题,文献[10-11]从控制角度提出了一些解决方案。文献[12]提出了减小无刷直流电机换相转矩波动和换相时间的协调控制方法。Bertoluzzo 等^[13]深入对比分析了正弦波和方波条件下的永磁无刷直流驱动问题。

本文提出一种额定转矩 2 500 N·m 的大转矩永磁外转子轮毂电机,应用于车辆自重较大、转速

不高的机场摆渡车等车辆的驱动。通过对永磁体磁极倾斜的方法,分析比较相反电动势的特征,使相反电动势只含有 3 次谐波的梯形波、线反电动势为正弦波,同时不降低电机的输出转矩。此外,搭建了基于 Simplorer-Maxwell 软件的场路联合仿真平台,在正弦波磁场定向控制和方波控制策略下对该电机的两种驱动特性进行了分析比较。

1 电机结构和主要特性

1.1 电机结构特点和参数

图 1 为所设计的外转子形式的轮毂电机结构图,采用面装式永磁体。



图 1 设计的外转子轮毂电机结构图

在外转子上,设计的永磁体磁极较薄(5 mm)、极弧系数较大(0.87)、磁极下间隙均匀。在轴向上,将永磁磁钢平均分成两段,以提高外转子的机械强度。内定子铁心采用燕尾槽口的开口槽形,采用分数槽集中绕组,以减小定位转矩和转矩脉动,最大程度缩短电枢绕组的端部长度、节省铜材,增加电机功率密度。每台电机内定子内部中空,可用于固定安装驱动控制器,使电机驱动系统空间紧凑,可靠性更高。系统技术指标如表 1 所示。

利用有限元数值计算可以得到永磁体磁极、气隙和转子铁心各区域的磁矢量位分布,取出定转子表面切向和径向磁矢量位 A_s 、 A_r 。其傅里叶表达式为

表 1 系统技术指标

参数名称	参数值
额定功率/kW	60
额定转矩/(N·m)	2 500
额定转速/(r·min ⁻¹)	230
最高转速/(r·min ⁻¹)	400
额定电流/A	300
最大电流/A	600
控制器直流母线电压/V	540

$$A_s(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(np\theta) + b_n \sin(np\theta)] \quad (1)$$

$$A_r(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \cos(np\theta) + d_n \sin(np\theta)] \quad (2)$$

式中： A ——磁矢量位；
 a_n 、 b_n 、 c_n 、 d_n ——待定系数；
 p ——极对数；
 θ ——机械角度。

通过对式(1)、式(2)求导,可得电机在不同转动角度的径向和切向磁密值 B_r 、 B_s ,利用麦克斯韦张量法求出电机的电磁转矩 T_e :

$$T_e = \frac{L_e}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_r B_s d\theta \quad (3)$$

1.2 不同性能磁钢对电机自然特性的影响

为保证外转子轮毂电机运行稳定性,对外转子磁极采用 N35、N33 和 N30 3 种牌号的磁钢的电机电动势进行了计算。图 2 所示为不同牌号磁钢对应的电机自然特性,即在不同转速下电机的稳态转矩、电流、功率和相电动势,条件为施加稳定的三相电压 365 V。

虽然磁钢的牌号越高,永磁体磁场越大,在相同电枢电流下可以获得较高的输出转矩,提高电机的功率密度,但目前的永磁体有高温退磁的风险,牌号越高磁钢退磁温度越低,因此需结合电机性能和应用情况综合考虑。例如,车载供电系统电压等级是其中一个重要参数,需要合理设计电机本体的恒转矩与恒功率工作范围,以满足车辆在加速能力、最高巡航速度等方面的应用需求。

由图 2 可以看出,采用 3 种不同牌号的磁钢输出特性有一定程度的差别。磁钢牌号越高,起动转矩越大,反电动势也越大。随着转速的增加,电机较早地进入了恒压运行区域,电机电

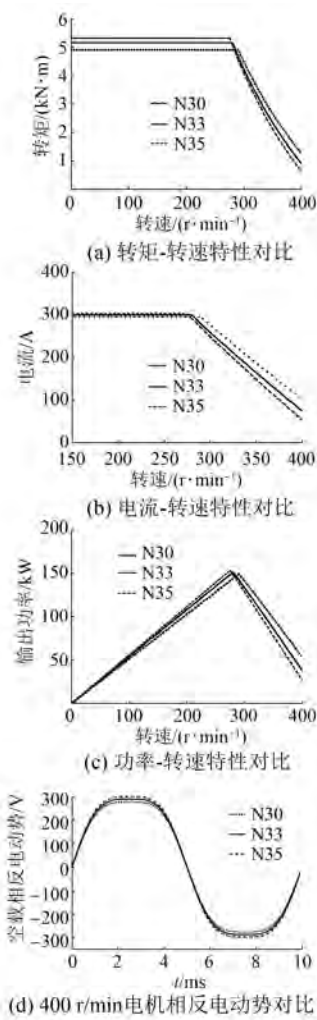


图 2 不同牌号磁钢对应的电机自然特性

流和转矩下降较快,对应的最高转速也较低。因此,本文选择了牌号 N30 的磁钢,其对应的调速范围较宽,在推力和功率满足指标要求的前提下恒转矩区域更广,在非弱磁情况下可实现较高的车速。

电机相反电动势仿真和测试结果如图 3 所示。

相电动势为含有基波和 3 次谐波的梯形波。稳态计算结果为 276 V、400 r/min,测量为 265 V、400 r/min,相电动势误差约 5%,验证了计算的准确性。

1.3 斜极对电机相反电动势的影响

永磁体磁极倾斜一定角度不仅可以降低电机的齿槽转矩,还可消除电机反电动势的某次谐波含量。为了有效提高基波反电势幅值,同时消除其他谐波分量,对斜极影响进行了优化分析。根

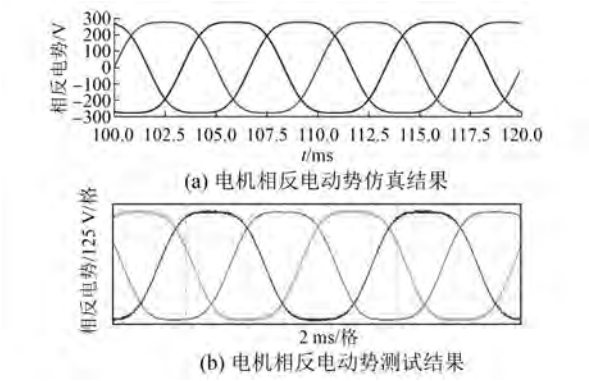


图3 仿真和试验结果对比

据电机学理论,若要消除 v 次谐波,应使扭斜的距离等于 v 次谐波的波长。通常方波电机的相反电动势中主要含有基波和 3、5、7 次谐波。为了消除 5 次谐波,应取斜极的距离为

$$t_{sk} = 2\pi / (2mq - 1) \tag{3}$$

为了消除 7 次谐波,斜极的距离为

$$t_{sk} = 2\pi / (2mq + 1) \tag{4}$$

为了同时削弱这两个齿谐波,斜极距离选为

$$t_{sk} = 2\pi / 2mq = \tau / mq = 1 \tag{5}$$

设计的 60 kW 外转子轮毂电机采用了一种特殊的转子磁极倾斜形式。在轴向上平均隔成两段,以灵活选择倾斜角度、同时减小单个磁钢长度,提高了外转子的机械强度。针对如图 4 所示的不斜极 ($skew = 0$)、磁极斜 1 个槽距 ($skew = 1$) 和磁极斜 2 个槽距 ($skew = 2$) 3 种工况进行了计算。

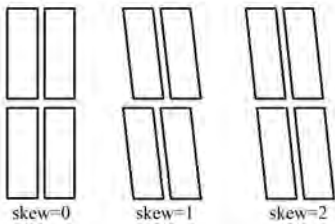


图4 电机磁钢斜极的 3 种工况

图 5 所示为 3 种工况下电机空载相反电动势波形(转速 400 r/min)。3 种工况下相反电动势的傅里叶分析结果如表 2 表示。

从图 5 可以看出,磁钢在不斜极和斜 1 个槽距的情况下电机相反电动势 3 次谐波较大,电动势波形成“平顶波”。磁钢斜 2 个槽距后波形正弦度较高,但是磁钢斜 2 个槽距后基波幅值降

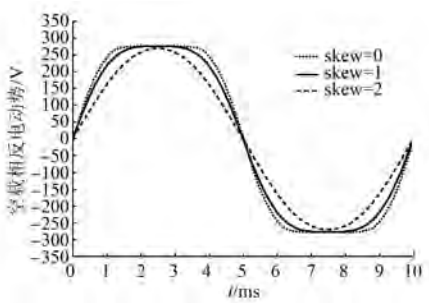


图5 3 种工况下电机空载相反电动势波形
(转速 400 r/min)

表 2 FFT 谐波分析结果

项目	不斜	斜 1 槽	斜 2 槽
基波幅值	325.0	311.3	272.3
3 次幅值	55.30	36.39	1.90
5 次幅值	5.72	1.90	1.10
7 次幅值	0.600	0.070	0.012
THD	18.9	12.3	1.1
基波减低/%	0	5	17

低较多,相应的转矩也会降低。磁极斜 1 个槽距和斜 2 个槽距后,基波幅值分别降低 5% 和 17%。从表 2 可以看出,当样机磁钢斜 2 个槽距后,3 次谐波幅值从 36.39 下降到 1.9,消除效果非常明显。为了尽量降低电机相反电动势正弦基波的幅值的减小程度,从而提高电机的输出转矩和功率密度,本文设计电机外转子磁钢倾斜 1 个槽距。此时相反电动势谐波分量主要存在 3 次谐波,由于电机绕组采用 Y 接方式,所以相反电动势的 3 次谐波不会产生电流,从而不会产生谐波转矩,同时电机的线反电动势能够消除 3 次谐波,正弦度较好。

2 驱动特性计算分析

电机的驱动区域通常包括恒转矩区域和恒压区域。在恒转矩区域采用恒流控制,为减少无功、提高转矩,设电机参考电流全部为转矩电流 i_q ,即 d 轴励磁电流 $i_d = 0$ 。控制过程中,给定 q 轴电流值,使转矩输出最大。设计的电机长期运行可承受最大电流约 300 A,根据电机相电压有效值计算线电压幅值并判断电机调速运行曲线的拐点。

在电机恒压区域最大利用电压保持不变,即

电机线电压幅值等于直流母线电压,同样采用 $i_d=0$ 控制策略,使电机输入电流全部产生转矩。

从图 6 可以看出,计算电机拐点位于 300 r/min 附近,最大输出转矩 5 250 N·m,恒转矩

区域电机相电流有效值约 337 A。当电机在拐点处时输出最大功率 166 kW,在转速 400 r/min 时的输出功率为 30 kW。电机在不弱磁的控制前提下,最大调速范围约为 405 r/min。

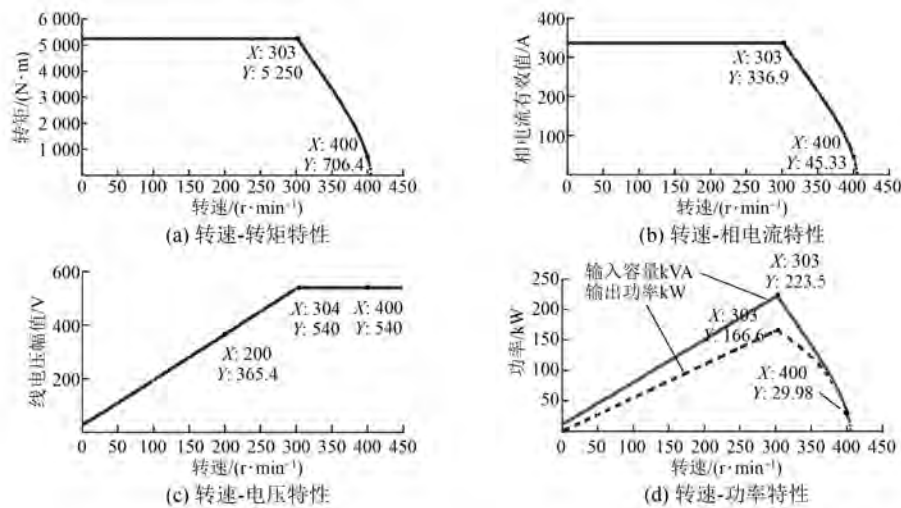


图 6 电机驱动特性计算

3 场路联合仿真分析

由于设计的轮毂电机相电动势中含有较多 3 次谐波,传统电机数学模型是基于正弦稳态的状态方程建立的,无法考虑 3 次谐波的影响。电机有限元模型不仅可以解决该问题,还能考虑

铁心饱和、永磁涡流损耗等非线性因素。随着计算硬件的提高,场路联合仿真的计算时间更短,计算结果更加真实。如图 7 所示,首先通过 Maxwell 软件建立电机有限元模型,然后在 Simplorer 中搭建主电路和控制算法,搭建场路联合仿真平台。

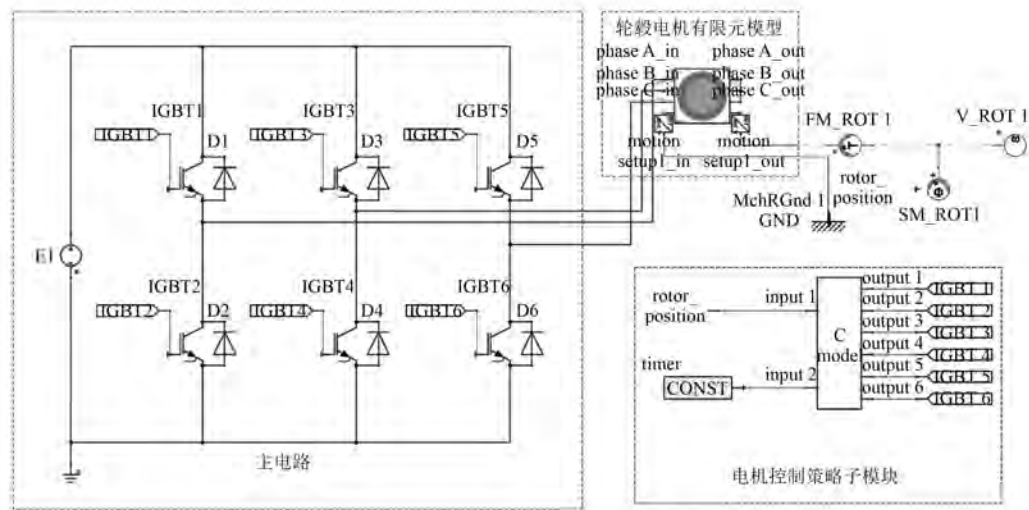


图 7 轮毂电机场路联合仿真平台

为便于分析比较不同控制策略的控制效果,本文采用两种不同的控制方法对该电机进行仿真

计算。母线电压均为 540 V,负载转矩为 2 500 N·m,给定目标转速 230 r/min。

(1) 将轮毂电机看作永磁同步电机,进行正弦波矢量控制。在仿真平台搭建转速-电流双闭环控制系统,并采用三相全桥逆变拓扑和空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 策略,设置开关频率为 4 kHz。

图 8 所示为设计样机的仿真结果。电机进入稳态后,电机三相电流有效值约 156 A,转矩在 2 500 N·m 处脉动,幅度为 6%。从图 8(a) 的电机绕组输入电流频率可知,电机转速基本稳定在 230 r/min。测得直流母线电流均值 116 A、电压 DC540 V,直流侧电源输出功率 62.48 kW,电机输出功率 60.21 kW。系统效率约 95%。

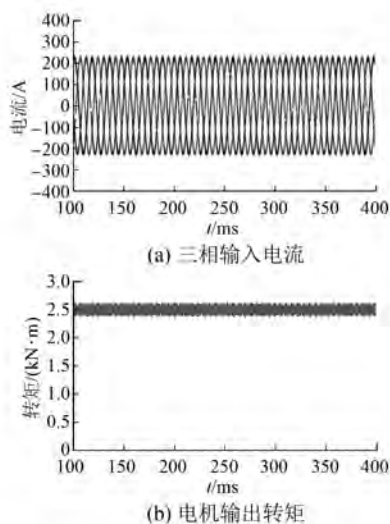


图 8 正弦波矢量控制结果

(2) 将轮毂电机看作方波电机进行换向控制。采用无刷直流电机控制方式,每相绕组导通 120°电角度,每个状态占 60°电角度。在仿真时搭建速度闭环,通过调节脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 占空比来调节输出电流、转矩和转速,使其稳定在给定值。

方波控制结果如图 9 所示。电机进入稳态后,电机三相电流有效值约 180 A,转矩在 2 500 N·m 处脉动,幅度约 15%,直流母线电压为 DC540 V、直流母线电流均值为 117 A,直流侧电源输出功率 64 kW,电机输出功率 60.21 kW,系统效率约 94%。

从控制效果看,在负载、输出功率相同的情况下,两种控制策略的效率基本一致。

将电机看作交流永磁电机进行磁场定向控制

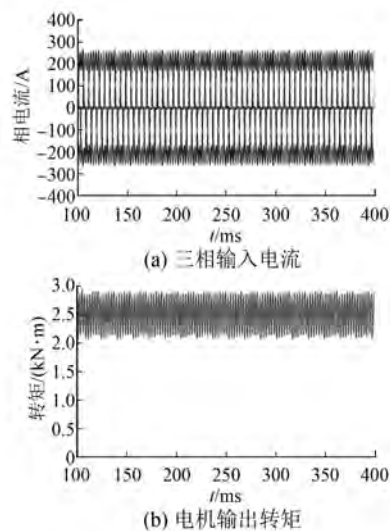


图 9 方波控制结果

时,具有转矩脉动小的特点。当作无刷直流电机控制时,理论上无刷直流电机是 120°导通,实际上由于绕组电感原因达不到 120°,为了达到同样的转矩输出和转速,需要更大的电机电流。但是交流永磁电机是 180°导通,而且实施了矢量控制,使绕组电流中的直轴分量 $i_d = 0$,最大限度利用了绕组电流。

4 结 语

本文设计了一种大功率、大转矩的外转子轮毂电机,可用于大转矩的纯电动车。通过对永磁体磁极斜槽设计,使相反电动势为只含有 3 次谐波的梯形波,线反电动势为正弦波,相反电动势基波基本不变,提高了电机的输出转矩。比较分析了不同磁钢牌号对电机自然特性的影响,综合考虑电机的转矩输出能力和电机调速范围后,采用 N30 磁钢作为外转子磁极。在搭建的 Simplorer-Maxwell 场路联合仿真平台上,对该电机的两种驱动特性进行了分析比较,结果表明正弦波磁场定向控制转矩脉动较小,效果更好。

【参考文献】

- [1] 褚文强,辜承林.电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势[J].电机与控制应用,2007,34(4): 1-5.
- [2] 辜承林.电动车轮毂永磁电机实用技术探讨[J].微电机,2008,41(2): 56-59.

(下转第 82 页)

计。在新电机的设计中,主要采取措施来降低转子中的高频谐波电流损耗。具体改进措施为:槽配合由 90/114 改成 90/80;转子槽口深度由 1.5 mm 改成 3.5 mm。

改进后的样机进行空载试验和负载试验。电机温升试验持续时间 6 h,热稳定后定子绕组温升 66 K,电机其他性能参数均满足技术协议要求。改进后空载试验数据如表 3 所示。

表 3 改进后空载试验数据

电压/V	电流/A	功率因数	输入功率/kW
791	878	0.044	56.2
690	566	0.029	21.2
619	452	0.026	13.5
550	376	0.027	10.2
481	324	0.028	7.8
412	276	0.031	6.2
344	232	0.034	4.8
207	139	0.056	2.8
115	78	0.110	1.7

如图 13 所示,对比改进前后空载曲线,空载损耗明显降低。对比表 2 和表 3 可知,在额定电压 690 V、额定频率 50 Hz 条件下,改进后空载损耗较改进前降低了 28.9 kW。有限元仿真结果中,改进后空载损耗降低 26.32 kW。两者相比较,数值比较接近,而造成仿真与试验误差的因素可能是电机试验供电电源存在时间谐波以及电机定转子存在偏心等。

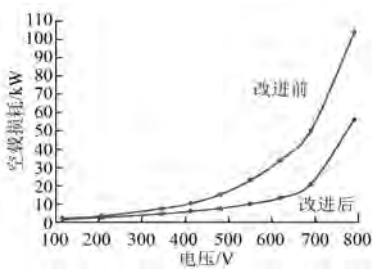


图 13 改进前后空载损耗曲线

5 结 语

本文通过 ANSYS Maxwell 二维有限元软件仿真计算了 10 极、1 100 kW 三相变频调速异步电动机空载气隙磁密、空载转子电流,并对空载气隙磁密、空载转子电流进行傅里叶分解,分析了空载工况不同转子槽深度、槽配合转子导条铜耗数据,得到转子槽口深度与空载转子铜耗之间的变化关系。样机的改进试验结果验证了仿真分析的正确性。本文的研究对于电机设计以及工程应用中考虑转子槽口深度及槽配合对转子损耗的影响具有一定的参考意义。

【参 考 文 献】

[1] 刘徽,胡虔生,濮开贵.异步电机基于谐波磁场影响的槽配合综述[J].微特电机,1994(5): 12-16.
[2] 程雪玲,吴泰,马砚芳.定子槽配合对高压异步电动机温升的影响[J].防爆电机,2013(4): 14-18.
[3] 鲍晓华,梁娜,方勇,等.定子槽开口对感应电机转子涡流损耗的影响[J].电机与控制学报,2015,19(11): 18-24.

收稿日期: 2018-05-22

(上接第 44 页)

[3] 李周清.外转子永磁轮毂电机的设计研究[J].机电工程技术,2012,41(3): 1-6.
[4] 雷良育,胡烨,宋志强,等.电动汽车用外转子轮毂电机的设计研究[J].微电机,2016,49(10): 6-10,50.
[5] 杨养户.电动汽车轮毂电机技术[J].汽车维修,2012(4): 44-47.
[6] 郭建龙,陈世元,韦立学.电动车用双凸轮式永磁轮毂电机电磁设计[J].微电机,2008,41(7): 12-15.
[7] 余海阔,陈世元.电励磁双凸极轮毂电机空载性能的有限元分析[J].微电机,2011,44(6): 23-25.
[8] 罗玲,梅康元.永磁无刷轮毂电机分数槽绕组的设计与分析[J].微电机,2011,44(5): 17-20.
[9] 宫海龙,柴凤,程树康.内置式低速大转矩永磁轮毂电机的设计研究[J].微电机,2010,43(2): 1-4.
[10] 陈冬雪,宗长富,何磊,等.轮毂电机的转矩脉动抑制方法研究[J].科学技术与工程,2012,12(8): 1811-1815.
[11] 明巧红,徐康聪.轮毂电机系统及其驱动技术分析[J].上海汽车,2016(3): 6-10.
[12] 姜卫东,廖玉茗,王培侠,等.减小无刷直流电机换相转矩波动和换相时间的协调控制方法[J].中国电机工程学报,2017,37(7): 2120-2130.
[13] BERTOLUZZO M, BUJA G, KESHRI R K, et al. Sinusoidal versus square-wave current supply of PM brushless DC drives: a convenience analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7339-7349.

收稿日期: 2018-05-31