

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.019

混合励磁开关磁链电机转子齿开槽 对齿槽转矩的影响研究*

董丹阳^{1,2,3}, 刘旭^{1,2,3*}, 王世永^{1,2,3}

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130; 2. 河北省电磁场与
电器可靠性重点实验室, 天津 300130; 3. 河北工业大学 电气工程学院, 天津 300130)

摘要: 针对混合励磁双凸极电机齿槽转矩较高, 引起较大的振动和噪声的问题, 对在 12/10 混合励磁开关磁链 (HESFPM) 电机转子齿顶开设辅助槽的方法进行了研究。介绍了 12/10 HESFPM 电机的拓扑结构和工作原理, 结合 12/10 HESFPM 电机齿槽转矩的解析表达式, 解释了转子齿顶开辅助槽降低齿槽转矩的原因; 应用有限元分析方法, 研究了辅助槽槽数、槽型、间距、尺寸和励磁电流对齿槽转矩的影响; 在对辅助槽结构优化的基础上, 比较了应用不同辅助槽结构时 12/10 HESFPM 电机的齿槽转矩, 得到了可以最大程度削弱齿槽转矩的辅助槽结构; 最后, 研究了辅助槽对空载反电动势和平均转矩的影响。研究表明: 当每个转子齿顶有 2 个矩形辅助槽时, 12/10 HESFPM 电机的齿槽转矩降低了 92.32%, 而平均转矩仅降低了 10.3%。

关键词: 混合励磁开关磁链电机; 齿槽转矩; 辅助槽

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2019)10-1105-05

Influence of rotor auxiliary slots on the cogging torque of HESFPM machine

DONG Dan-yang^{1,2,3}, LIU Xu^{1,2,3*}, WANG Shi-yong^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Tianjin 300130, China;
2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Tianjin
300130, China; 3. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Aiming at the problems of high vibration and noise caused by high cogging torque in hybrid excited doubly salient permanent magnet machine, the method of using auxiliary slots on the top of 12/10 hybrid excited switching flux permanent magnet (HESFPM) machine was investigated. The topology and operation principle of 12/10 HESFPM machine were introduced. Based on the cogging torque expression of 12/10 HESFPM machine, the reasons for the reduction of cogging torque by using auxiliary slot on the top of rotor were explained. By using finite element analysis, the influence of the shape, spacing and size of auxiliary slots on the cogging torque were investigated. Based on the optimization of the auxiliary slot structure, the cogging torque of 12/10 HESFPM machine with different auxiliary slot structures were compared, and the auxiliary slot structure which can mostly reduce the cogging torque was obtained. Finally, the influence of auxiliary slots on the back-EMF and average torque of machine were presented. The results indicate that if two rectangular auxiliary slots on the top of rotor are used, the cogging torque of 12/10 HESFPM machine can be reduced by 92.32% at the expense of 10.3% reduction of average torque.

Key words: hybrid excited switching flux permanent magnet (HESFPM) machine; cogging torque; auxiliary slots

收稿日期: 2019-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51507045)

作者简介: 董丹阳 (1994-), 女, 河北邯郸市人, 硕士研究生, 主要从事电机设计方面的研究。E-mail: 201631403006@stu.hebut.edu.cn

通信联系人: 刘旭, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: liuxu@hebut.edu.cn

0 引 言

HESFPM 电机以开关磁链电机为基础,通过在定子侧放置直流励磁绕组,从而由永磁体和励磁电流共同调节气隙磁密。HESFPM 电机既继承了永磁电机结构简单、体积小和效率高的优点,同时又具有气隙磁场调节能力,在航空航天、新能源发电等领域具有重要的应用前景^[1]。齿槽转矩是永磁电机在不通电的情况下由永磁体和有槽铁心相互作用所产生的一定周期转矩波动^[2]。作为永磁电机的一种,由于 HESFPM 电机的双凸极结构,使其产生较高的齿槽转矩,从而引起较大振动和噪声。

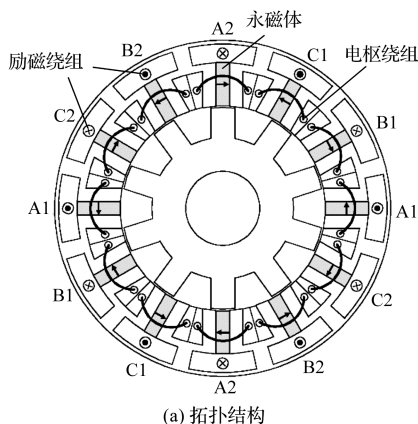
目前削弱齿槽转矩的方法主要有:分数槽绕组、优化极弧系数、磁极偏移、斜极斜槽、开辅助槽等^[3-5]。文献[6-9]研究了磁通切换电机齿槽转矩的产生机理和计算方法;文献[10]研究了表面式永磁电机转子开辅助槽对转矩脉动和平均转矩的影响;文献[11]研究了永磁无刷直流电机定子齿开辅助槽时,辅助槽数量和槽型和尺寸对齿槽转矩的影响;文献[12]提出了在开关磁链电机定转子上开设不同齿倒角的方法来降低齿槽转矩;文献[13]研究了 5 种转子齿型对开关磁链电机齿槽转矩的影响,结果表明 V 型槽和阶梯齿的组合齿型可以有效削弱电机的齿槽转矩。但上述文献未对混合励磁电机在转子齿顶开设辅助槽对齿槽转矩的影响作深入研究。

因此,本文将研究在 12/10 HESFPM 电机转子齿顶开设辅助槽时,辅助槽槽数、槽型、间距、尺寸和励磁电流对齿槽转矩的影响。

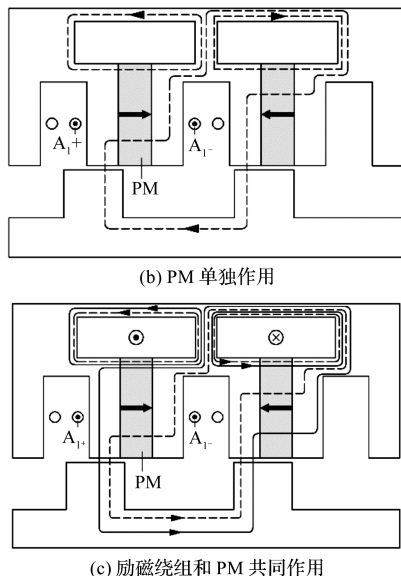
1 电机结构及其齿槽转矩分析

1.1 12/10 HESFPM 电机结构

12/10 HESFPM 电机的拓扑结构和磁通路径如图 1 所示。



(a) 拓扑结构



(c) 励磁绕组和 PM 共同作用

图 1 12/10 HESFPM 电机的拓扑结构和工作原理

通过图 1 可知:12/10 HESFPM 电机的励磁绕组和电枢绕组分别位于定子轭部和槽中,永磁体(PM)位于定子齿中,转子为无绕组和永磁体的凸极结构;当励磁绕组在通入方向、大小不同的励磁电流 i_f 时会对电机磁场起到增强、削弱的作用,从而调节电机磁场。

12/10 HESFPM 电机基本参数如表 1 所示。

表 1 12/10 HESFPM 电机基本参数

参数	数值
定子槽数	12
转子极数	10
轴向长度/mm	25
定子外径/mm	90
定子轭部厚度/mm	8
气隙长度/mm	0.5
转子外径/mm	54
永磁体厚度/mm	3.6

1.2 12/10 HESFPM 电机齿槽转矩

由于定转子铁芯齿槽的存在,使得电机气隙中的磁场能量分布不均匀。当电机转子旋转时,磁场能量会发生变化,从而产生齿槽转矩。根据能量法,电机齿槽转矩(T_{cog})的解析表达式可以表示为:

$$T_{cog} = - \frac{\partial W_{airgap}(\theta)}{\partial \theta} = - \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{1}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \int_0^{L_a} \int_0^{2\pi} G^2(\alpha, z) B^2(\alpha, \theta, i_f) d\alpha dz \right\} \quad (1)$$

式中: W_{airgap} — 气隙内的磁共能; α — 转子相对位置角; μ_0 — 空气磁导率; R_2 — 定子内径; R_1 — 转子外径; L_a — 电机轴向长度; i_f — 励磁电流; $G(\alpha, z)$ — 气隙磁导函数; $B(\alpha, \theta, i_f)$ — 气隙磁通密度分布函数。

在 HESFPM 电机励磁绕组中通入不同励磁电流 i_f 时,电机的气隙磁密会发生改变从而影响电机的齿槽

转矩;并且由于电机的永磁体位于定子齿中,电机的转子结构简单且易于改变。因此,本文采用在转子齿顶开设辅助槽的方法来削弱电机的齿槽转矩,即在转子齿顶开设辅助槽相当于改变了电机的气隙结构,影响了气隙磁导,从而达到削弱电机齿槽转矩的效果。

2 基于辅助槽方法的齿槽转矩分析

基于上述分析,笔者依次研究转子齿顶开辅助槽时的辅助槽槽数、槽型、间距、尺寸和励磁电流对电机齿槽转矩的影响。

2.1 辅助槽槽数和槽型对齿槽转矩的影响

以矩形辅助槽为例,本研究分别在电机转子齿顶处开设 1 个、2 个辅助槽。初步设定矩形辅助槽槽宽 $W_r = 0.4 \text{ mm}$,槽深 $H_r = 0.8 \text{ mm}$,槽间距 $D_r = 3.2 \text{ mm}$,研究不同辅助槽槽数对齿槽转矩的影响。

辅助槽槽数对齿槽转矩的影响如图 2 所示。

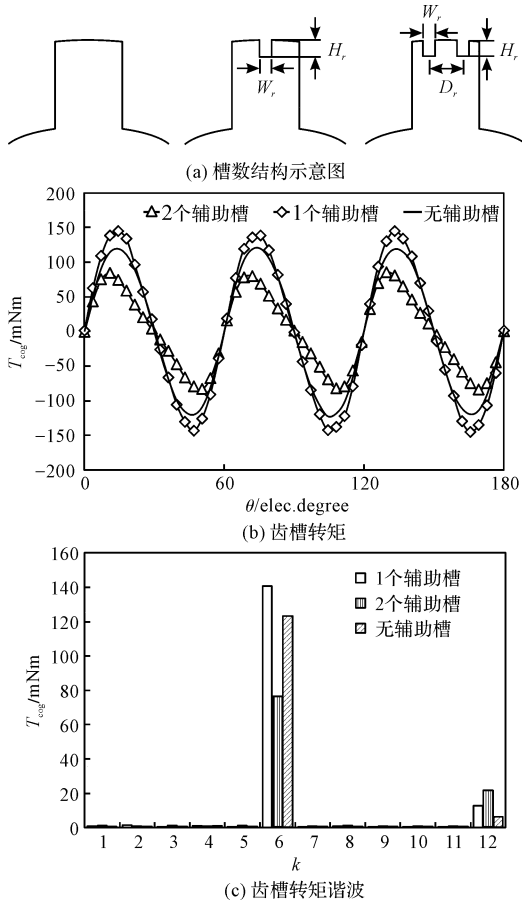


图 2 辅助槽槽数对齿槽转矩的影响

通过图 2 可知:当转子未开辅助槽时齿槽转矩为 122.5 mNm,开两个辅助槽时电机的齿槽转矩明显被削弱变为 86.3 mNm,而开一个辅助槽时反而会增大原有齿槽转矩,变为 146.7 mNm;电机的齿槽转矩主要受到 6 次谐波的影响,开两个辅助槽后齿槽转矩 6 次谐波明显得到了抑制。同理,另外两种槽型结论类似。

由此可知开槽数量会对齿槽转矩产生较大的影响。考虑到电机结构和制造工艺的限制,选择的开槽数量不易过多,数量过多会削弱电机气隙磁密的幅值,因此笔者选择开 2 个辅助槽进行研究。

根据上述仿真结果选定 2 个辅助槽,研究矩形、半圆形和三角形 3 种辅助槽槽型对齿槽转矩的影响。为保证 3 种槽型仿真结果的可对比性,本研究在槽深相同的情况下,改变辅助槽槽宽,选取与开槽面积 S 近似相等的情况,即在面积 S 分别近似为 0.4 mm^2 、 0.6 mm^2 、 0.77 mm^2 和 1 mm^2 这 4 种情况下进行对比。辅助槽槽型尺寸如表 2 所示。

表 2 辅助槽槽型尺寸

面积 $S/$ mm^2	矩形槽		半圆形槽	三角形槽	
	H_r/mm	W_r/mm	R/mm	H_r/mm	W_r/mm
0.4	0.5	0.8	0.5	0.5	1.6
0.6	0.6	1	0.6	0.6	2
0.77	0.7	1.1	0.7	0.7	2.2
1	0.8	1.3	0.8	0.8	2.6

辅助槽槽型对齿槽转矩的影响如图 3 所示。

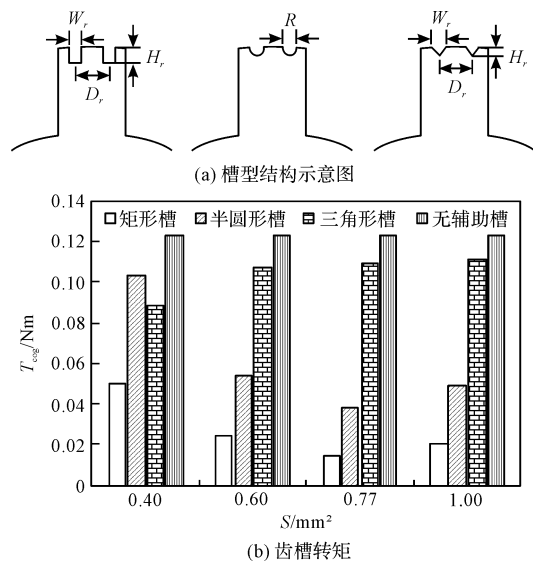


图 3 辅助槽槽型对齿槽转矩的影响

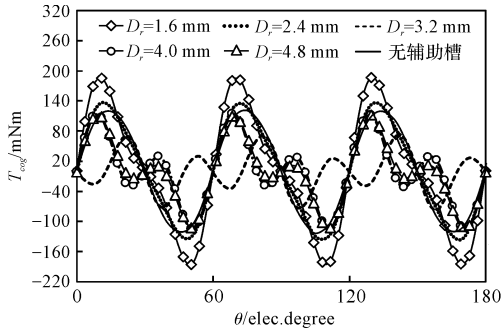
通过图 3 可知:不同的辅助槽槽型对电机齿槽转矩有很大影响,矩形槽对齿槽转矩削弱效果最好,半圆型槽削弱效果次之,三角形槽削弱效果最差。

2.2 辅助槽间距和尺寸对齿槽转矩的影响

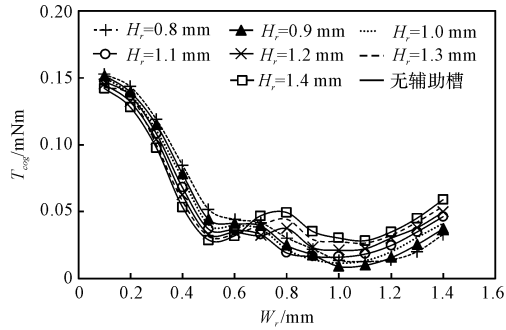
基于上述分析,笔者选定辅助槽槽型为矩形槽,研究辅助槽间距和尺寸对齿槽转矩的影响。

首先,本研究仿真分析不同辅助槽间距 D_r 对齿槽转矩的影响。初步设定辅助槽槽宽 $W_r = 0.4 \text{ mm}$,槽深 $H_r = 0.8 \text{ mm}$,槽间距 D_r 取值分别为 1.6 mm 、 2.4 mm 、 3.2 mm 、 4.0 mm 和 4.8 mm 。其次,在优化得到的槽间距的基础上,对辅助槽尺寸进行仿真分析。

辅助槽间距和尺寸对齿槽转矩的影响如图 4 所示。



(a) 辅助槽间距



(b) 辅助槽尺寸

图 4 辅助槽间距和尺寸对齿槽转矩的影响

通过图 4 可知:槽间距过大或过小对电机齿槽转矩的削弱作用很小甚至会增大齿槽转矩。结合本文的电机结构,辅助槽间距在 $D_r = 3.2$ mm 时削弱效果最好。在确定辅助槽间距 D_r 后,笔者对辅助槽槽深 H_r 、槽宽 W_r 进行优化仿真。辅助槽槽深 H_r 取值范围为 0.8 mm ~ 1.4 mm,槽宽 W_r 取值范围为 0.1 mm ~ 1 mm,间隔距离均为 0.1 mm。

当辅助槽宽度 D_r 小于 0.3 mm 时,电机的齿槽转矩反而高于未开槽时的齿槽转矩,并未对齿槽转矩起到削弱作用。当辅助槽宽度 $D_r = 0.3$ mm ~ 1.4 mm 时,电机的齿槽转矩一定程度上均被削弱。

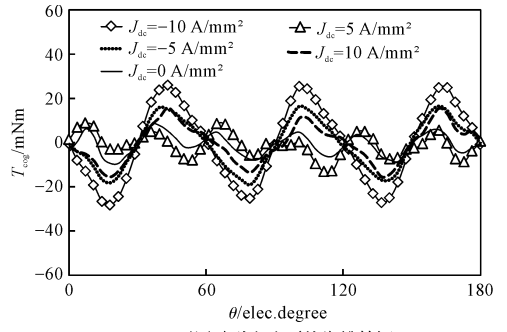
由此可知,辅助槽尺寸不合适,不仅不会降低电机的齿槽转矩,反而会增大其幅值的大小。当辅助槽间距 $D_r = 3.2$ mm,槽深 $H_r = 0.9$ mm,槽宽 $W_r = 1.1$ mm 时,电机的齿槽转矩由原来的 122.50 mNm 降至 9.40 mNm,减小了 92.32%,在该辅助槽间距和尺寸下,电机的齿槽转矩削弱程度最佳。

2.3 开辅助槽后励磁电流对齿槽转矩的影响

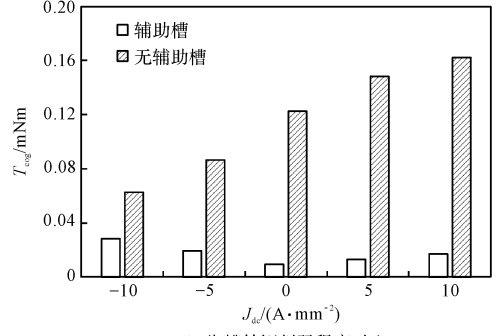
本研究通过上述优化过程,得到削弱齿槽转矩的最佳矩形辅助槽结构,仿真分析开辅助槽后励磁电流对齿槽转矩的影响。其中,通入的励磁电流密度 J_{dc} 分别为 0 A/mm²、 ± 5 A/mm²、 ± 10 A/mm²。

当电机通入不同励磁电流 i_f 时,会对电机主磁场起到增强、削弱的作用,从而调节电机气隙磁场,相应的电机齿槽转矩也会受到影响。

开辅助槽后不同励磁电流下齿槽转矩的变化情况如图 5 所示。



(a) 不同励磁电流下的齿槽转矩



(b) 齿槽转矩削弱程度对比

图 5 开辅助槽后不同励磁电流下齿槽转矩的变化情况

通过图 5 可知:在通入不同励磁电流密度情况下,开辅助槽后电机的齿槽转矩均能被削弱,证明了采用辅助槽方法的有效性。

3 开辅助槽对电机性能的影响

由于在转子齿顶开辅助槽引起电机结构改变,导致气隙大小发生变化,会对电机性能造成一定影响。因此,需要对开辅助槽后对电机性能的影响进行研究。

3.1 开辅助槽对反电动势的影响

通常削弱齿槽转矩都会影响到电机的反电动势,而反电动势反映了电机产生稳定转矩的能力,对电机转矩有很大影响。

开辅助槽后电机反电动势(EMF)的变化情况如图 6 所示。

其中,反电动势总谐波失真率(THD)为:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: U_1 —反电动势基波幅值; U_i —反电动势各次谐波幅值。

开辅助槽后电机反电动势基波幅值和 THD 的比较如表 3 所示。

结合图 6 和表 3 计算结果可知:开辅助槽后电机的反电动势基波幅值由原来的 3.06 V 降至 2.73 V,减少了 10.78%;并且,反电动势的 5 次谐波和 7 次谐波均被抑制,其反电动势总谐波失真率 THD 由原来的 8.61% 降到 6.34%,反电动势中的谐波含量被降低,改善了反电动势的波形。

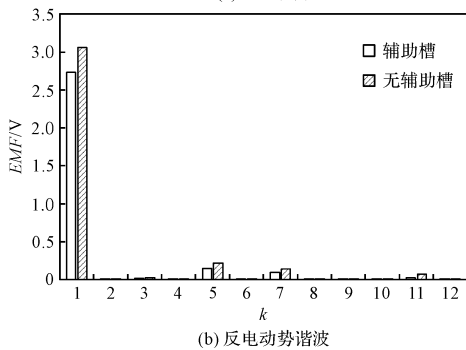
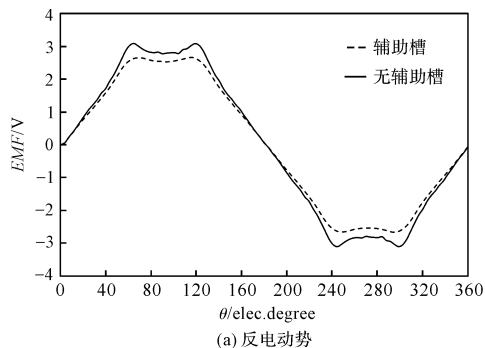


图 6 开辅助槽后电机反电动势的变化情况

表 3 开辅助槽后电机反电动势基波幅值和 THD 的比较

参数	辅助槽	无辅助槽
反电动势基波幅值/V	2.73	3.06
反电动势 THD/(%)	6.34	8.61

3.2 开辅助槽对平均转矩的影响

电机在额定电流 10 A 下,开辅助槽后电机平均转矩和齿槽转矩的比较如表 4 所示。

表 4 开辅助槽后电机平均转矩和齿槽转矩的比较

参数	辅助槽	无辅助槽
平均转矩/Nm	0.96	1.07
减小程度/(%)	10.28	0
齿槽转矩/mNm	9.4	122.5
削弱程度/(%)	92.32	0

通过表 4 计算结果可知:电机的平均转矩由原来的 1.07 Nm 降至 0.96 Nm,减少了 10.28%。可见,在牺牲了一部分输出转矩的情况下,齿槽转矩能够最大程度被削弱。

4 结束语

为了降低 HESFPM 电机的齿槽转矩,本文采用在电机转子齿顶开设辅助槽的方法,以 12/10 HESFPM 电机为例,研究了辅助槽槽数、槽型、间距和尺寸对电机齿槽转矩和电机性能的影响。

研究表明:不同的辅助槽槽数、槽型、间距和尺寸对齿槽转矩有很大的影响,转子齿顶开 2 个辅助

槽可以明显削弱电机的齿槽转矩。通过不同槽型的对比发现:矩形辅助槽对齿槽转矩削弱效果最好;优化后的矩形槽能够在仅降低 10.3% 输出转矩的情况下,减少了 92.32% 的齿槽转矩;并且当电机通入不同励磁电流密度时,开辅助槽后电机的齿槽转矩同样均能够被削弱;对于电机性能方面的影响,开辅助槽后电机的空载反电动势谐波含量降低,改善了反电动势波形。

参考文献 (References):

- [1] 朱孝勇,程明,赵文祥,等.混合励磁电机技术综述与发展展望[J].电工技术学报,2008,23(1):30-39.
- [2] 朱晓锋,花为.定子永磁型磁通切换电机齿槽转矩及其抑制技术[J].中国电机工程学报,2017,37(21):6146-6157.
- [3] 江胜军,胡余生,陈彬.永磁同步电机齿槽转矩优化方法分析[J].日用电器,2017(11):55-57,61.
- [4] 贺建忠.永磁同步电机齿槽转矩分析及削弱措施[J].科技创新与应用,2017(3):162-163.
- [5] JIN M J, WANG Y, SHEN J X, et al. Cogging torque suppression in a permanent magnet flux-switching integrated starter-generator[J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(8):647.
- [6] HU J H, WANG L, ZOU J B, et al. Cogging torque reduction of hybrid excitation flux switching motor[C]. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Qinhuangdao: IEEE, 2015.
- [7] 王道涵,王秀和.新型永磁型磁通切换型磁阻电机齿槽转矩机理分析和解析分析模型[J].电工技术学报,2015,30(10):77-82.
- [8] 朱晓锋,花为.定子永磁型磁通切换电机齿槽转矩及其抑制技术[J].中国电机工程学报,2017,37(21):6146-6157.
- [9] SIKDER C, HUSAIN I, OUYANG W. Cogging torque reduction in flux-switching permanent magnet machines by rotor pole shaping[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5):3609-3619.
- [10] 贺小克,沈建新.表面式永磁同步电机转子辅助槽对转矩的影响[J].微电机,2018,51(1):1-4,28.
- [11] 王轶楠,唐冲,颜钢锋.定子齿冠开辅助凹槽抑制永磁电机齿槽转矩[J].微电机,2014,47(10):20-23.
- [12] ZHU X, HUA W, CHENG M. Cogging torque minimization in flux-switching permanent magnet machines by tooth chamfering[C]. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee: IEEE, 2016.
- [13] ZHAO J, YAN Y, LI B, et al. Influence of different rotor teeth shapes on the performance of flux switching permanent magnet machines used for electric vehicles[J]. Energies, 2014, 7(12):8056-8075.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

董丹阳,刘旭,王世永.混合励磁开关磁链电机转子齿开槽对齿槽转矩的影响研究[J].机电工程,2019,36(10):1105-1109.

DONG Dan-yang, LIU Xu, WANG Shi-yong. Influence of rotor auxiliary slots on the cogging torque of HESFPM machine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(10):1105-1109.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>