

混合励磁轴向磁场磁通切换型永磁电机 特性分析与试验研究*

徐 妲, 林明耀, 付兴贺, 郝 立, 赵纪龙
(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 提出了一种适用于电动汽车驱动系统的 E 型铁心混合励磁轴向磁场磁通切换型永磁 (HEAFFSPM) 电机。以一台三相 6/10 极电机为例, 基于三维有限元方法全面研究该电机静态特性, 包括气隙磁密、空载永磁磁链、空载反电动势、电磁转矩、转矩-电流特性、绕组电感和磁场调节能力等; 研究转子齿扇形角度和转子斜极对电机反电动势和齿槽转矩的影响, 分析表明转子齿扇形和转子斜极可以改善反电动势和齿槽转矩波形。制造了一台 2 kW 样机并对其进行测试, 验证了有限元分析结果的准确性, 结果表明 HEAFFSPM 电机的磁链和反电动势均为正弦分布, 带载能力和磁场调节能力均较强。

关键词: 混合励磁; 轴向磁场; 磁通切换; 有限元法

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)11-0100-06

Performance Analysis and Experimental Study of a Hybrid Excited Axial Field Flux-Switching Permanent Magnet Machine*

XU Da, LIN Mingyao, FU Xinghe, HAO Li, ZHAO Jilong

(Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An e-core hybrid excited axial field flux-switching permanent magnet (HEAFFSPM) machine, which was suitable for electrical vehicle drive, was developed. The electromagnetic performances of a 3-phase 6/10 stator/rotor-pole HEAFFSPM machine, including the air-gap flux density, the PM flux linkage, the back electromotive force (back-EMF), the electromagnetic torque, the torque-current characteristics, the winding inductances, and the field regulation capacity, were thoroughly investigated based on 3-D finite element method (FEM). The influences of the rotor pole shape angle and rotor pole skewing on the back-EMF and cogging torque were analyzed. It showed that the back-EMF could be improved and the cogging torque could be reduced with trapezoidal rotor pole shape and skewed rotor pole. A 2 kW prototype was built and tested, which validated the FEM analysis. Results showed that the HEAFFSPM machine exhibits the essentially sinusoidal phase flux linkage and back-EMF, good load-carrying capacity and flexible flux-regulation capacity.

Key words: hybrid excited; axial field; flux-switching; finite element method (FEM)

0 引 言

磁通切换型永磁电机是一种新型定子永磁式电机, 由法国学者 E. Hoang 于 1997 年提出^[1]。该电机定、转子上均为凸极结构, 永磁体和绕组均置

于定子上, 转子上既无永磁体也无绕组, 结构简单、鲁棒性强、易于冷却、机械强度高。研究结果表明, 该电机具有体积小、工作稳定、转矩密度高和效率高等优点^[2-7]。在此基础上, 有学者研究并提出了双定子或双转子结构的轴向磁场磁通切

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51277025, 51577024); 江苏省自然科学基金项目(BK20161425)

作者简介: 徐 妲(1989—), 女, 博士研究生, 研究方向为永磁电机设计、分析。

林明耀(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机系统及其控制技术。

换型永磁电机,并对该电机的静态特性和齿槽转矩抑制等进行了研究^[8-13]。轴向磁场磁通切换型永磁电机同样具有磁通切换电机的优点,而较短的轴向长度使得该电机更适用于直接驱动控制系统如风力发电、电动汽车等。

以上磁通切换永磁电机采用永磁体励磁方式,永磁体用量较多,且无法直接改变磁场强度,作发电机运行时存在电压调整率大和故障灭磁困难等问题,作电动机运行时存在难以实现弱磁调速、恒功率运行范围窄等缺点。

为减小轴向磁场磁通切换型电机永磁体用量及扩大其调速范围,文献[14-17]提出了一种 E 型铁心混合励磁轴向磁场磁通切换型永磁 (Hybrid Excited Axial Field Flux-Switching Permanent Magnet, HEAFFSPM) 电机,兼具了磁通切换电机和混合励磁电机的优点,采用了非重叠的电枢和励磁绕组,可以用相对较少的永磁材料获得较高的气隙磁密。该电机气隙磁场可以双向平滑调节,弱磁调速能力较强,作电动机运行时可作节能驱动使用,其宽调速特性可应用于电动汽车。

本文以一台三相 6/10 极 HEAFFSPM 电机为例,基于三维有限元法分析该电机的电磁特性,包括气隙磁场分布、空载永磁磁链、反电动势、输出转矩、绕组电感和调磁特性等。在此基础上研究转子齿扇形角度和转子斜极对反电动势和齿槽转矩波形的影响。搭建样机试验平台,进行开路和带载试验以验证有限元分析结果。

1 电机结构和初始设计

三相 6/10 极 HEAFFSPM 电机结构如图 1(a) 所示。该电机由两个外定子和一个内转子组成,每个定子由 6 个 E 型铁心和 6 块切向充磁的永磁体交替放置。电枢绕组和励磁绕组均为集中绕组,电枢绕组绕于永磁体相邻的两个定子齿上,励磁绕组绕于 E 型铁心中间齿上。定子 E 型铁心单元采用平行永磁平行槽扇形齿结构。转子上既无永磁体也无绕组,与开关磁阻电机转子相似,结构简单。

HEAFFSPM 电机定子外径可根据式(1)计算^[17]:

$$D_{so} = \sqrt[3]{\frac{240P_2 p_s}{\sqrt{2} \pi^3 p_r k_{sio} (1 - k_{sio}^2) k_d k_F A_s B_{gmax} c_s n \eta}} \quad (1)$$

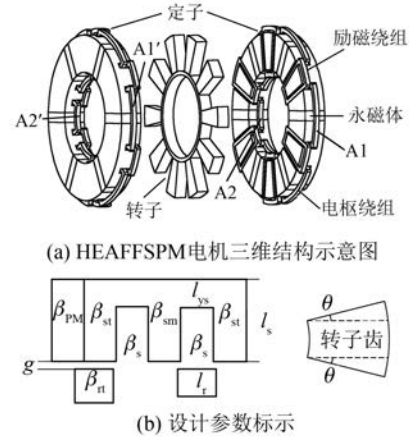


图 1 6/10 极 HEAFFSPM 电机结构示意图

式中: p_s, p_r ——定、转子单元数;

k_{sio} ——定子内、外径之比, $k_{sio} = D_{si}/D_{so}$;

k_d ——电机漏磁系数;

k_F ——气隙磁密分布系数;

A_s ——内径处电负荷;

B_{gmax} ——气隙磁密峰值;

c_s ——定子极弧系数;

P_2 ——电机输出功率。

而 HEAFFSPM 电机的励磁部分则采用等效磁路法进行分析计算,励磁方程可表示为

$$\begin{cases} F_{dc} = N_f I_f = \alpha h_{PM} \left[H_C - \frac{2\Phi_0}{\mu_r \mu_0 (D_{so} - D_{si}) l_s} \right] \\ \frac{N_f}{2p_s} S_{cu} = k_p \frac{\pi D_{si}}{2m} \frac{\beta_{slot}}{360/p_s} k_{slot} l_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_{dc} ——励磁磁动势;

N_f, I_f ——励磁绕组匝数和励磁电流;

α ——磁场调节系数;

h_{PM} ——永磁体磁化方向的厚度;

H_C ——永磁体矫顽力;

Φ_0 ——永磁磁链幅值;

μ_0, μ_r ——真空磁导率、相对磁导率;

l_s ——定子轴向长度;

S_{cu} ——励磁线圈截面积;

k_p ——槽满率;

m ——电枢绕组相数;

β_{slot} ——内径处定子槽宽角度;

k_{slot} ——定子槽深系数。

根据式(1)和式(2)可计算得 HEAFFSPM 电机的结构设计参数,各设计参数标示如图 1(b)所示。本文所研究的 2 kW 6/10 极 HEAFFSPM 电机的结构参数如表 1 所示。

表 1 HEAFFSPM 电机结构参数

设计参数名称	参数值
额定功率 P_2/kW	2
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 000
定子内径 D_{si}/mm	109.1
定子外径 D_{so}/mm	198.4
定子轴向长度 l_{s}/mm	25.5
定子轭部厚度 l_{ys}/mm	8.5
转子轴向长度 l_{r}/mm	15
气隙长度 g/mm	1
永磁体厚度 $\beta_{\text{PM}}/(\text{^\circ})$	12.5
定子齿宽 $\beta_{\text{st}}/(\text{^\circ})$	9
定子中间齿宽 $\beta_{\text{sm}}/(\text{^\circ})$	15
转子齿宽 $\beta_{\text{r}}/(\text{^\circ})$	14.5
转子扇形角度 $\theta/(\text{^\circ})$	0

2 静态特性分析

2.1 气隙磁密

两种负载情况下的气隙磁场分布如图 2 所示。由于电机的双凸极结构。气隙圆周磁密不呈正弦分布,含有较多的谐波分量。聚磁效应使得气隙磁密峰值能达到 1.5 T。与永磁体产生的气隙磁密相比,电枢电流产生的气隙磁场可以忽略,电枢反应对永磁体去磁的影响几乎可以忽略。

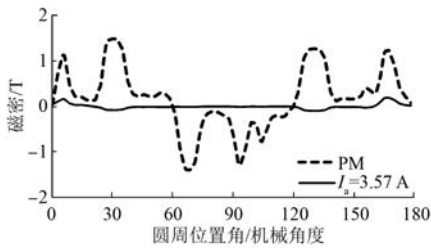


图 2 平均半径处气隙圆周磁密分布

2.2 永磁磁链和反电动势

初始设计参数下的 HEAFFSPM 电机三相空载磁链和三相反电动势如图 3 所示。由图 3 可见,永磁磁链基本呈正弦分布,反电动势波形正负半周略微不对称,因此需要对电机结构进行优化以获得正弦的反电动势波形。

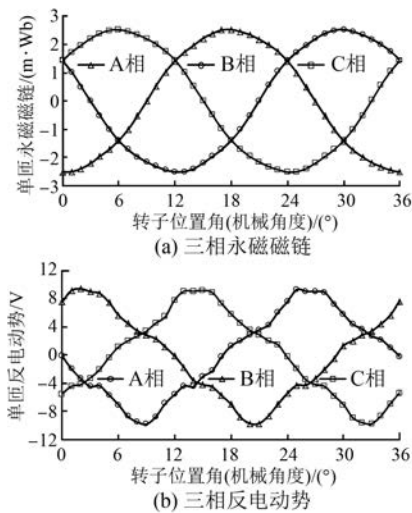


图 3 永磁磁链和反电动势

2.3 齿槽转矩和电磁转矩

HEAFFSPM 电机的齿槽转矩如图 4(a)所示。由于双凸极结构和聚磁效应,电机的齿槽转矩脉动较大。图 4(b)给出了转速 600 r/min 且电枢电流 $I_a=3.57\text{ A}$ 时不同励磁电流情况下的电磁转矩。由图 4 可知,直流励磁电流对电磁转矩的脉动和平均值有较大的影响。与施加强磁电流时相比,施加增磁电流时平均转矩的变化值较小且转矩脉动较低,此时电机铁心较饱和。

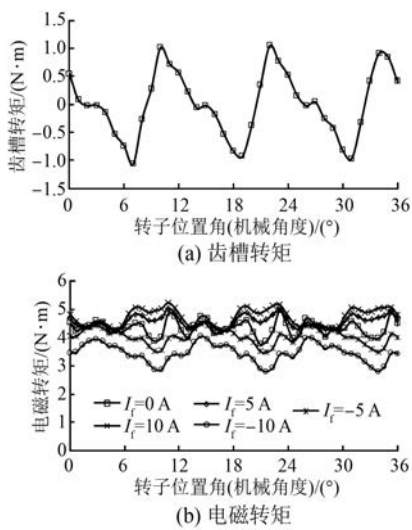


图 4 转矩特性

2.4 电感特性

HEAFFSPM 电机电枢绕组的自感和互感如图 5(a)所示。由于定子 E 型铁心中间齿的隔离

作用,电枢绕组的互感平均值约为自感值的 1/4。图 5(b)中给出了励磁绕组的自感 L_{ff} 及电枢绕组和励磁绕组之间的互感 M_{af} 。由于施加增磁电流时铁心相对弱磁电流时饱和,励磁绕组的增磁自感比弱磁自感小。励磁绕组自感 L_{ff} 在单个周期内近似恒定,比电枢和励磁绕组间的互感 M_{af} 大得多,这是因为励磁绕组所在的 E 型铁心中间齿是主磁路的一部分。

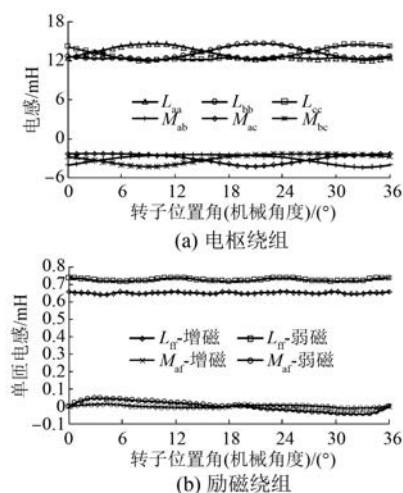


图5 绕组电感

2.5 调磁特性

6/10 极 HEAFFSPM 电机不同励磁电流情况下的电枢绕组匝链的磁通如图 6 所示。由图 6 可见,所施加的直流励磁电流对相绕组磁通幅值有较大影响,使电机具有较大的调速范围,同时提高了电机的转矩性能。施加增磁电流时,电机磁路饱和度增加,随着励磁电流的增加,磁通变化渐小,增磁效果有所减弱。由于磁路饱和,所以施加增磁电流时磁通的变化量较施加弱磁电流时要小。

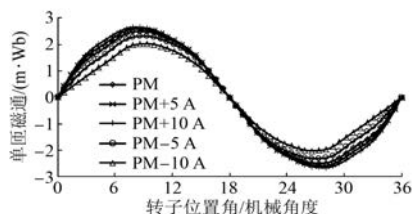


图6 施加励磁电流时的磁场调节特性

3 结构优化

由上文分析可知,初始设计结构下 6/10 极

HEAFFSPM 电机的反电动势谐波含量较大,且齿槽转矩较大,需要对电机结构进行优化。基于三维有限元方法,本节研究电机结构对反电动势和齿槽转矩的影响,如转子齿扇形角度、转子斜极等。

3.1 转子齿扇形角度

由图 1(b)可知,转子齿面积随转子齿扇形角度 θ 变化而变化。图 7 给出了电机反电动势谐波畸变率和齿槽转矩随转子扇形角度变化的波形。由图 7 可见,当转子齿扇形角 θ 为 10° 时,反电动势谐波畸变率 THD 最低,与初始值相比减小了 15%;当转子齿扇形角度 θ 为 8° 时,齿槽转矩最小,与初始值相比减小了 81.7%。通过优化转子齿扇形角度,HEAFFSPM 电机的齿槽转矩可以大大减小,而电机的反电动势仍存在较高的谐波畸变率,需要进一步优化。

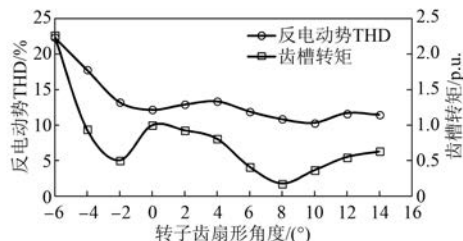


图7 转子齿扇形角度对反电动势和齿槽转矩的影响

3.2 转子斜极

6/10 极 HEAFFSPM 电机转子的初始设计和斜极结构的示意图如图 8 所示。HEAFFSPM 电机转子斜极时采用平行齿结构,也即转子齿扇形角度为 0° 。

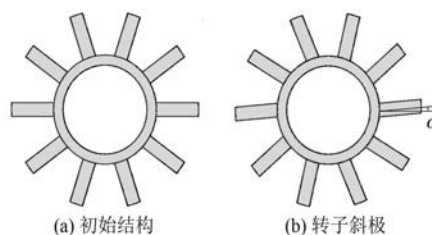


图8 转子结构示意图

图 9 给出了电机反电动势谐波畸变率和齿槽转矩随转子斜极角度变化的波形。由图 9 可见,反电动势谐波畸变率和齿槽转矩均随着转子斜极角度的增加而减小,当斜极角度增加至 8° 以上时,反电动势谐波畸变率和齿槽转矩大幅增加。当转子斜极角度为 7° 时,转子斜极结构与初始结

构下的反电动势与齿槽转矩的波形比较如图 10 所示。由图 10 可知,转子斜极后反电动势波形得到改善,对称性得到提高,谐波畸变率减小了 26.9%;转子斜极后的反电动势幅值与初始结构时几乎相同。转子斜极后齿槽转矩有所减小,但转子斜极后齿槽转矩的平均值不再为零,此时齿槽转矩对输出转矩会产生附加影响。若斜极角方向与转子旋转方向一致,齿槽转矩的平均值为负值,如图 10(b) 中所示,从而造成输出转矩平均值的减小。反之,斜极角方向与转子旋转方向相反时,齿槽转矩平均值为正,使输出转矩平均值增加。

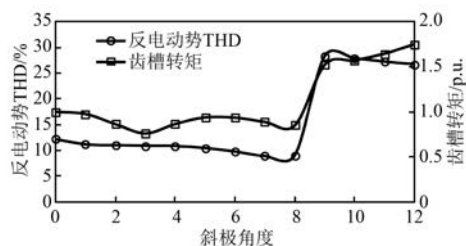


图9 转子斜极角度对反电动势和齿槽转矩的影响

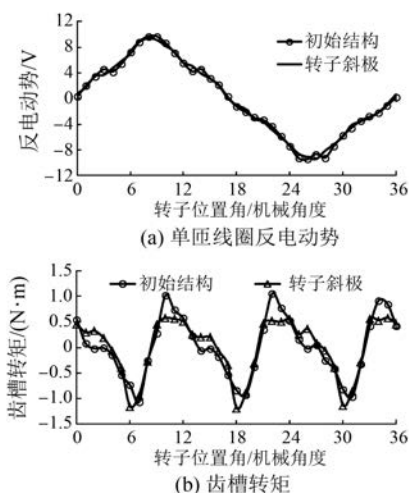


图10 转子斜极与初始结构的性能对比

4 试验验证

根据表 1 设计参数制造的三相 2 kW 6/10 极 HEAFFSPM 样机如图 11 所示。搭建 HEAFFSPM 电机试验平台,测试了样机的相关特性。图 12 给出了有限元分析和实测特性的比较,包括反电动势、齿槽转矩、电枢绕组自感。实测结果与有限元分析结果一致。电机弱磁调速特性、转矩-电枢电流特性和转矩-励磁电流特性如图 13 所示,测

试结果显示电机具有较好的带载能力。施加增磁电流可以有效提高输出转矩,适用于低转矩或低速工作区。电机高速运行时,采用恒转矩和 $i_d=0$ 控制策略,施加强磁电流电机转速可以有效上升。

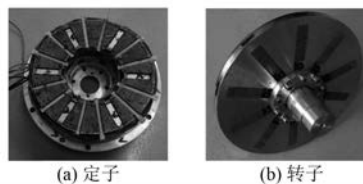


图11 6/10极 HEAFFSPM 样机图

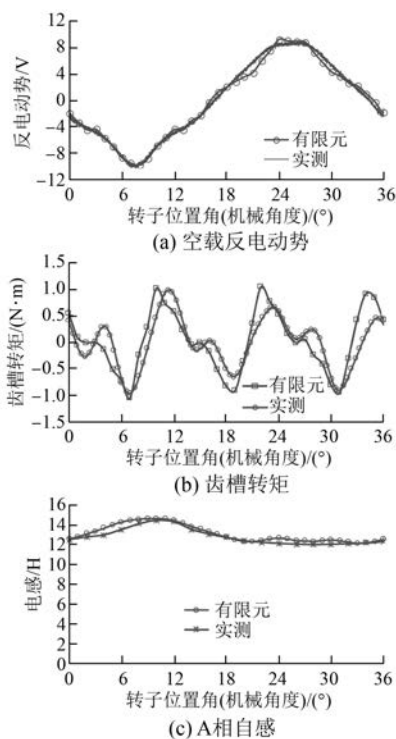


图12 有限元分析与实测结果对比

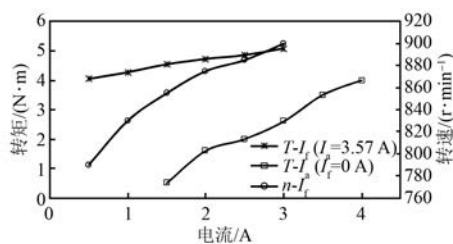


图13 实测弱磁调速特性和转矩-电流特性

5 结语

本文提出了一种三相 6/10 极 E 型铁心 HEAFFSPM 电机,研究了其基本结构、初始设计

通用方程,并基于三维有限元方法,对 6/10 极 HEAFFSPM 电机的静态特性进行了分析研究,主要包括气隙磁密分布、空载磁链、反电动势、齿槽转矩、电磁转矩、绕组电感和调磁特性等。HEAFFSPM 电机具有正弦度较高的磁通和感应电势波形,适于交流无刷控制运行。此外,还研究了转子齿扇形角度和转子斜极对电机反电动势和齿槽转矩的影响。分析表明,采用转子齿扇形可以改善反电动势波形,有效减小齿槽转矩;采用转子斜极结构,反电动势谐波畸变率和齿槽转矩分别减小 26.9% 和 16.8%,而反电动势幅值几乎不变。电机静态特性的样机试验结果与有限元结果一致,验证了分析的准确性。分析和试验表明 HEAFFSPM 电机具有结构简单、易于冷却和调磁方便等特点,带载能力强,易于实现高速恒功率和宽调速运行。改变直流励磁电流的方向和大小,可以有效地改变励磁磁通的方向和大小,从而调节磁场分布,实现磁通的双向调节。本文的研究结果为 HEAFFSPM 电机的分析、优化和控制策略的研究等奠定了基础。

【参考文献】

- [1] HOANG E, BEN-AHMED A H, LUCIDARME J. Switching flux permanent magnet polyphased synchronous machines [C] // 7th European Conference on Power Electronics and Applications, 1997: 903-908.
- [2] ZHU Z Q, PANG Y, HOWE D, et al. Analysis of electromagnetic performance of flux-switching permanent magnet machines by non-linear adaptive lumped parameter magnetic circuit model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(11): 4277-4287.
- [3] ZHU Z Q, CHEN J T. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 1447-1453.
- [4] HUA W, CHENG M, ZHU Z Q, et al. Analysis and optimization of back-EMF waveform of a flux-switching permanent magnet motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 727-733.
- [5] ZHU Z Q, ALANI M, LEE B, et al. Comparative study of the electromagnetic performance of switched flux permanent magnet machines [J]. IET Electric Power Applications, 2015, 9(4): 297-306.
- [6] XU W, ZHU J G, ZHANG Y C, et al. New axial laminated-structure flux-switching permanent magnet machine with 6/7 poles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 2823-2826.
- [7] 杨琳琳, 全力, 朱孝勇, 等. 新型定子分区磁通切换电机的电磁性能分析 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(5): 33-37.
- [8] LIN M Y, HAO L, LI X, et al. A novel axial field flux-switching permanent magnet wind power generator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4457-4460.
- [9] HAO L, LIN M Y, DU D, et al. Static characteristics of a novel axial field flux-switching permanent magnet motor with three stator structures [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(1): 1-4.
- [10] HAO L, LIN M Y, LI W, et al. Novel dual-rotor axial field flux-switching permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 4232-4235.
- [11] ZHAO W L, LIPO T A, KWON B I. A novel dual-rotor, axial field, fault-tolerant flux-switching permanent magnet machine with high-torque performance [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [12] 郝立, 林明耀, 徐姐, 等. 轴向磁场磁通切换型永磁电机齿槽转矩抑制 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 21-26.
- [13] KABIR M A, AHMED A, HUSAIN I. Axial flux segmental rotor flux-switching synchronous motor [C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015: 2148-2152.
- [14] XU D, LIN M Y, FU X H, et al. Influence of rotor design parameters on static characteristics of a novel hybrid axial field flux-switching permanent magnet machine [C] // 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014: 1096-1101.
- [15] 徐姐, 林明耀, 付兴贺, 等. 混合励磁轴向磁场磁通切换型永磁电机静态特性 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 58-63.
- [16] XU D, LIN M Y, FU X H, et al. Cogging torque reduction of a hybrid axial field flux-switching permanent-magnet machine with three methods [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-5.
- [17] XU D, LIN M Y, FU X H, et al. Design and analysis of a hybrid axial field flux-switching permanent magnet machine [C] // 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2015: 314-315.

收稿日期: 2017-03-14