

轴向磁场磁通切换永磁电机控制系统建模及仿真研究^{*}

张蔚, 袁晓强, 於锋
(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 提出了一种新型结构的 6/13 极定子模块式轴向磁场磁通切换永磁(AFFSPM)电机。该电机具有结构紧凑、转矩密度大、效率高和容错性能强等特点。分析了 AFFSPM 电机结构和工作原理, 推导了 AFFSPM 电机的数学模型。利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了 AFFSPM 电机控制系统仿真模型, 分别对滑模速度控制和比例谐振控制的控制策略进行仿真研究, 分析对比 AFFSPM 电机的转速、转矩和三相电流的波形。仿真结果表明, 与比例谐振控制策略相比而言, 滑模控制策略下该新型 AFFSPM 电机控制系统具有较好的静态和动态性能。

关键词: 电动汽车; 滑模控制; 比例谐振; 轴向磁场磁通切换永磁电机; 矢量控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)08-0012-07

Modeling and Simulation of Axial Field Flux-Switching Permanent Magnet Motor Control System^{*}

ZHANG Wei, YUAN Xiaoqiang, YU Feng
(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: A novel 6/13-pole axial field flux-switching permanent magnet (AFFSPM) motor with stator modules motor was proposed, which had the advantages of compact structure, high torque density, high efficiency and strong fault tolerance. The structure and working principle of AFFSPM motor were analyzed, and the mathematical model of AFFSPM motor was derived. The simulation model of control system was built by using MATLAB/Simulink simulation software. The control strategy of sliding mode speed control and proportional resonant control were investigated, respectively. The waveforms of speed, torque and three-phase currents of AFFSPM motor were analyzed and compared. The simulation results showed that, the control system of the novel AFFSPM motor had better static and dynamic performance under the sliding mode speed control strategy compared to the proportional resonant control method.

Key words: electric vehicle; sliding mode control; proportional resonance; axial field flux-switching permanent magnet (AFFSPM) motor; vector control

0 引言

随着汽车的大量使用, 汽车对资源和环境产生了严重的影响, 电动汽车有望解决环境污染及能源问题, 因此各个国家争相研究和开发电动汽

车, 并已相继研制出多种电动车型^[1-8]。电机驱动系统是电动汽车的心脏, 电机自身的性能将直接影响电动汽车的最高车速、加速性能及爬坡性能等。因此研究和开发适用于电动汽车的转矩与功率密度高、小型轻量化、高效率、可靠性的新型驱

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51507087); 江苏省科技项目(BK20140430)

作者简介: 张蔚(1977—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为永磁电机设计及控制。

袁晓强(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制技术。

动电机有着至关重要的作用^[9]。

轴向磁场磁通切换永磁 (Axial Field Flux-Switching Permanent Magnet, AFFSPM) 电机^[10-16]是一种将磁通切换^[17-18]和轴向磁场永磁电机有效结合起来的定子永磁型双凸极电机。目前,国内外对于 AFFSPM 电机研究的文献不多,目前只有东南大学、上海电机学院和江西科技大学等少数高校对 AFFSPM 电机进行了相关的研究。其中江西科技大学的学者们^[19]提出一种“H”形铁心 AFFSPM 电机,文献[20]对“H”形 AFFSPM 电机的调磁问题进行了相关研究,东南大学林明耀教授^[21-24]提出一种“E”形铁心 AFFSPM 电机。文献[10,15]提出用矢量控制策略控制 AFFSPM 电机,东南大学的程明教授^[25]提出采用空间矢量脉宽调制算法对 AFFSPM 电机进行控制。轴向磁场电机虽然在电机领域取得了一定的研究成果,但是 AFFSPM 电机在控制性能和容错能力等方面仍然存在不足。

传统双定子单转子“U”形铁心结构 AFFSPM 电机和“H”形铁心 AFFSPM 电机相间耦合达到 50%, 短路故障时,故障相对正常相电流有较大影响,因此电机本体的容错性能有待进一步提高;“E”形和“H”形铁心 AFFSPM 电机定子铁心加工、安装不便。在此基础上提出一种新型定子模块式轴向磁场磁通切换永磁电机^[21-24],该电机定子结构简单,转子牢固,定子模块的设计便于安装和大量生产;由于隔离槽的存在使相相之间实现了物理隔离、磁隔离、热隔离,减小了互感,提高了容错性。

本文以该 6/13 极新型 AFFSPM 电机作为控制对象,分析了 AFFSPM 电机结构和工作原理,推导了 AFFSPM 电机的数学模型,并建立 AFFSPM 电机控制系统仿真模型,对滑模速度控制与比例谐振控制两种矢量控制方式进行对比研究和分析。

1 电机的拓扑结构与工作原理

图 1 所示为 6/13 极 AFFSPM 电机三维结构图,电机由两个相同结构的定子和一个中间转子组成。每个定子由 12 个“U”型导磁铁心、6 块永磁体和 6 个电枢线圈构成,2 个“U”型导磁铁心和 1 个永磁体构成一个定子单元,6 个定子单元构成一个定子,永磁体沿圆周方向交替充磁。



图 1 AFFSPM 电机三维结构图

图 2 为 6/13 极 AFFSPM 电机二维展示图,定子 1 与定子 2 中相对的永磁体充磁方向相反。电枢线圈横跨在两个相邻的“U”型定子齿上,永磁体嵌在两个定子齿中间。定子的 6 个电枢线圈分成三相,径向相对的两个电枢线圈串联构成一相,如图 2 所示,定子 1 中的线圈 A1 与其径向相对的线圈串联构成定子 1 的 a 相电枢绕组,同样,定子 2 的线圈 A1' 与其径向相对的线圈串联构成定子 2 的 a 相电枢绕组。

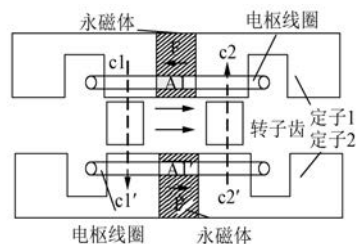


图 2 AFFSPM 电机二维展示图

在图 2 所示的 6/13 极 AFFSPM 电机二维展示图中,以 A1、A1' 线圈为例,两个永磁体中的箭头表示充磁方向,转子齿之间的箭头方向表示转子运动方向。当转子齿运动到 U 型铁心 c1、c1' 位置时,线圈中的磁通达到箭头所指方向的最大值;当转子齿继续运动到 U 型铁心 c2、c2' 位置时,线圈中的磁通达到 c2、c2' 之间箭头方向最大值,实现磁通切换。该新型 6/13 极 AFFSPM 电机由于将单个线圈串联构成一相,利用绕组线圈的互补性,能够使得主要谐波相互抵消,从而使磁链拥有更好的正弦度^[15]。

2 AFFSPM 电机数学模型

为了简化分析,假设 AFFSPM 电机为理想永磁电机,且满足下列条件^[25]:

(1) 忽略电机铁心的饱和;

- (2) 不计电机中的涡流和磁滞损耗;
- (3) 电机电流为对称的三相正弦波电流。

根据矢量控制原理,建立 AFFSPM 电机数学模型,如式(1)所示^[10]。

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_{pm} \\ \psi_q = L_q i_q \\ T_e = \frac{3}{2} p i_q [\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_d] \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q ——定子 d 轴和 q 轴的电压;
 i_d 、 i_q ——定子 d 轴和 q 轴的电流;
 R_s ——定子相绕组电阻;
 ψ_d ——定子 d 轴的磁链,包括定子 d 轴电流产生的磁链和永磁体产生的磁链;
 ψ_q ——定子 q 轴的磁链;
 ψ_{pm} ——永磁体产生的磁链;
 L_d 、 L_q ——定子绕组 d 轴和 q 轴的电感;
 ω ——电角速度;
 p ——电机的极对数;
 T_e ——电磁转矩。

3 基于 MATLAB/Simulink 的 AFFSPM 电机控制系统建模

本文仿真试验所采用的 AFFSPM 电机参数如表 1 所示。

表 1 AFFSPM 电机参数

参数名称	参数值
额定功率 P_n/W	600
额定转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	750
定子槽	6
极对数 p	13
永磁磁链幅值 ψ_{pm}/Wb	0.1
电枢绕组电阻 R_s/Ω	2.3
直轴电感 L_d/mH	6.5
交轴电感 L_q/mH	6.3
额定转矩 $T_e/(N \cdot m)$	7.6
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.004

两电平空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 算法能够减少逆变器输出电流的谐波成分,降低转矩脉动,提高直流母线电压采用率^[26]。滑模速度控制器系统响应快、抗干扰性能好、鲁棒性强^[27-29];比例谐振控制器可以避免旋转坐标系,计算量大大降低,无须精确估计电机参数,无须补偿项,就可以使系统的控制性能提高^[30]。

本文在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建基于 SVPWM 的滑模速度控制和比例谐振控制系统模型,对电机的静、动态特性进行仿真研究,并对这两个控制系统的仿真结果进行分析和对比。

3.1 基于滑模速度控制的 AFFSPM 电机矢量控制策略

图 3 为基于滑模速度控制器的 AFFSPM 电机矢量控制系统仿真模型。该模型的主要模块包括滑模速度控制器模块、AFFSPM 电机本体、坐标变换、电流环 PI 控制器、两电平 SVPWM 模块等。

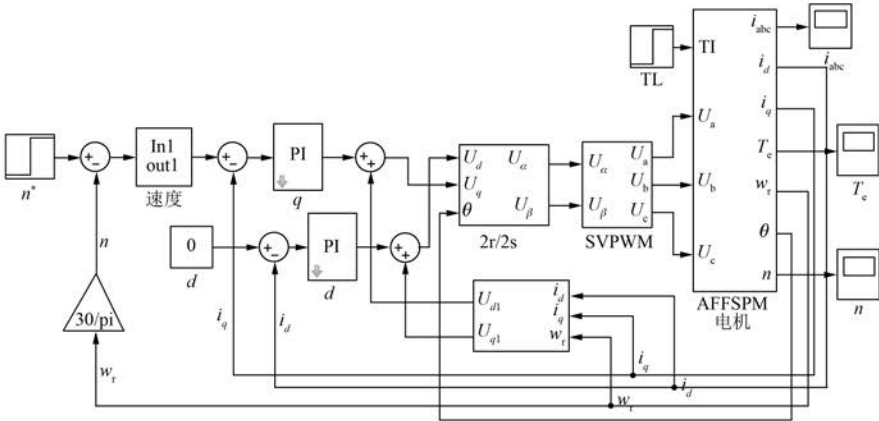


图 3 基于滑模速度控制器的 AFFSPM 电机矢量控制系统仿真模型

图4为滑模速度控制器仿真模型,该模型 d 轴参考电流 $i_d^* = 0$, q 轴参考电流 i_q^* 如式(2)所示。

$$i_q^* = \frac{2J}{3p_n \psi_f} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs] d\tau \quad (2)$$

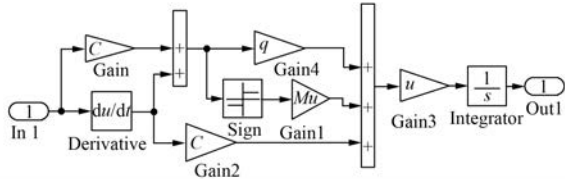


图4 滑模速度控制器仿真模型

3.2 基于比例谐振控制的 AFFSPM 电机矢量控制策略

图5为基于PR控制器的AFFSPM电机矢量控制系统仿真模型。该模型的主要模块包括PR模块、AFFSPM电机本体、坐标变换、速度环PI控制器、两电平SVPWM模块等。

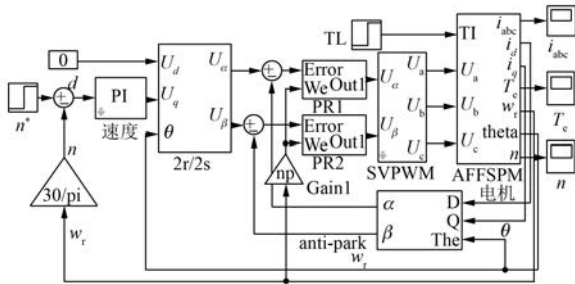


图5 基于PR控制器的AFFSPM电机矢量控制系统仿真模型

本文的PR模块采用一种改进的准PR控制器^[31],其传递函数为

$$G_{PR}(s) = K_P + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (3)$$

式中: ω_c ——准谐振控制器的截止频率;

ω_0 ——谐振频率;

K_p ——比例增益;

K_i ——积分增益。

式(3)的传递函数为 s 函数,文中对R控制器进行离散化,变换公式为

$$s = \frac{2(1 - z^{-1})}{T_s(1 + z^{-1})} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),可以得到:

$$G_R(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (5)$$

整理得到控制器的差分方程:

$$y(k) = b_0 e(k) + b_2 e(k-2) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) \quad (6)$$

式(6)实现了对误差信号的稳态控制。图6为根据式(6)建立的R控制器的实现框图。仿真系统模型中的PR模块如图7所示。

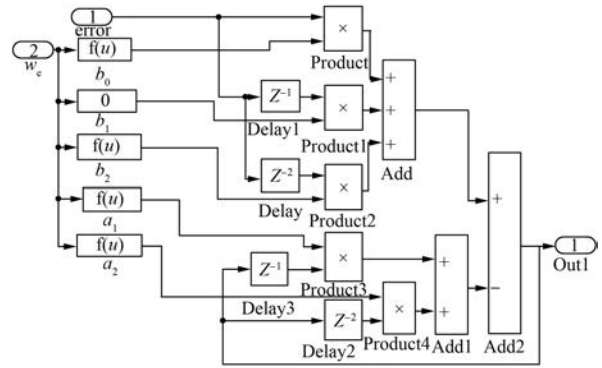


图6 R控制器的实现框图

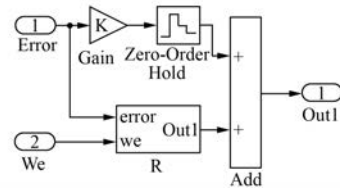


图7 PR控制器的仿真模型

4 AFFSPM 电机控制系统仿真结果与分析

本文仿真试验所采用的AFFSPM电机参数如表1所示。仿真条件设置如下:采用变步长ode45算法,相对误差设置为0.001,仿真时间设置为0.4s。

图3所示基于滑模速度控制器的AFFSPM电机矢量控制仿真模型中,滑模控制器的参数设置如下: $c=180, q=240, M_u=0.5, u=0.001\ 904$; d 轴电流环PI调节器的参数设置为 $K_p=5, K_i=140$; q 轴电流环PI调节器参数设置为 $K_p=150, K_i=200$ 。图5所示基于PR控制器的静止坐标系下的三相永磁同步电机矢量控制仿真模型中,比例谐振控制器的参数设置如下: $K_{pd}=K_{pq}=100L_d, K_{id}=K_{iq}=1\ 200, \omega_c=20$; 转速环的 $K_p=0.05, K_i=2$ 。

4.1 静态特性仿真结果对比分析

电机参考转速设定为额定转速 $n=750\ \text{r/min}$,

负载转矩设定为额定转矩 $T_L = 7.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

图 8 为 AFFSPM 电机三相电流静态响应曲线。滑模控制策略的电机电流在 0.04 s 时达到稳定, 电流稳定时幅值为 5 A, 三相电流波形对称; 比例谐振控制策略的电机电流在 0.03 s 时达到稳定, 稳定时电流幅值达到 8 A, 并且电流波形出现畸变, 谐波较大, 增加了电机损耗, 降低了电机的效率。

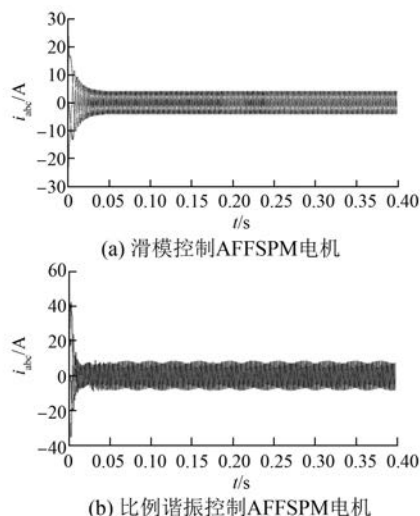


图 8 AFFSPM 电机三相电流静态响应曲线

图 9 为 AFFSPM 电机转矩静态响应曲线。滑模控制策略的转矩稳定时间约为 0.03 s, 转矩脉动率约为 9%; 比例谐振控制策略的转矩在 0.03 s 时达到稳定, 稳定后的转矩脉动率达到 200%。由图 9 可以看出滑模控制策略的转矩脉动相较于

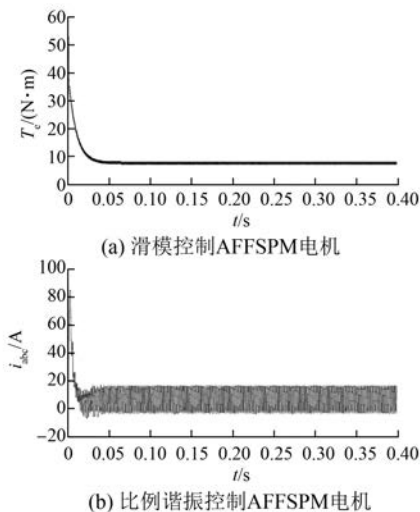


图 9 AFFSPM 电机转矩静态响应曲线

比例谐振控制策略的转矩脉动小得多, 稳态时转矩基本稳定在 $7.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

图 10 为 AFFSPM 电机转速静态响应曲线。两种控制策略的转速都能够实现快速起动, 并且稳定时间约为 0.04 s, 稳态时两种控制策略均使电机稳定运行在 750 r/min。

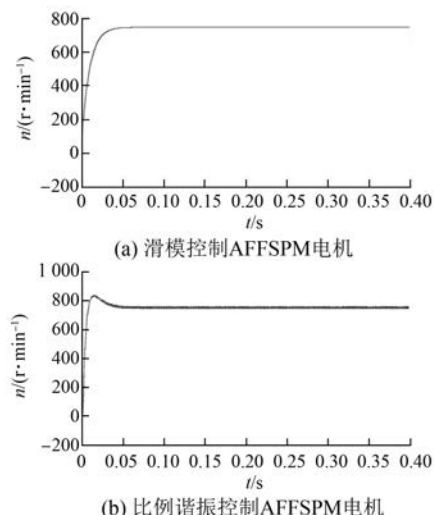


图 10 AFFSPM 电机转速静态响应曲线

4.2 动态特性仿真结果对比分析

电机初始转速设为 300 r/min, 0.12 s 时转速突变为 750 r/min, 初始负载转矩设为 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$, 0.25 s 时转矩突变为 $7.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

图 11 为 AFFSPM 电机三相电流动态响应曲线。0.12 s 转速发生突变时, 滑模控制策略电流经过 0.03 s 恢复稳定, 稳定前后电流幅值均为

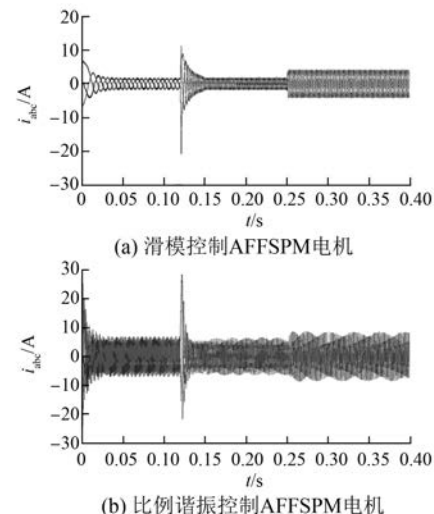


图 11 AFFSPM 电机三相电流动态响应曲线

2 A,比例谐振控制策略电流经过约 0.01 s 达到稳定,稳定前后电流幅值均在 7 A;0.25 s 时转矩突变,滑模控制策略的电流迅速响应达到稳定,稳定值为 5 A,比例谐振控制策略的电流也能够较快响应并稳定,稳定值约为 9 A,但在转速突变后电流幅值未保持恒定,呈现一定的脉动现象。

图 12 为 AFFSPM 电机转矩动态响应曲线。在 0.12 s 转速发生突变时,滑模控制策略的转矩经过约 0.04 s 达到稳定,且转速突变前后转矩均能维持在 $3 \text{ N}\cdot\text{m}$,0.25 s 时转矩突变,转矩快速响应并保持在 $7.6 \text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动率始终在 8%;比例谐振控制策略在转速和转矩发生突变时,波形都能较迅速的切换,但转矩脉动较大,始终达到约 200%。

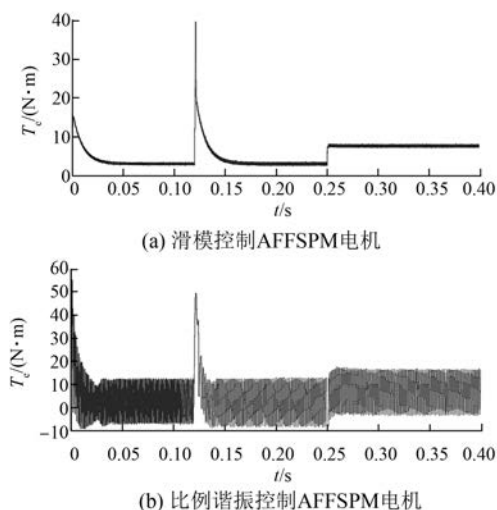


图 12 AFFSPM 电机转矩动态响应曲线

图 13 为 AFFSPM 电机转速动态响应曲线。在 0.12 s 转速突变时,滑模控制和比例谐振控制的转速分别经过 0.05 s 和 0.03 s 达到稳定,在 0.25 s 转矩突变时,两种控制策略的转速均能够在很短的时间内响应并且达到稳定,两种控制策略在稳态时转速基本上维持在转速的给定值。

5 结 语

本文基于一种新型 AFFSPM 电机,研究分析了滑模速度控制和比例谐振控制的控制策略。研究结果表明:滑模控制策略的电流波形对称、谐波较小,转矩和转速均能够快速响应并稳定运行;比例谐振控制策略的转速能够实现快速响应并稳定运行,但是转矩脉动较大,三相电流谐波较大且呈

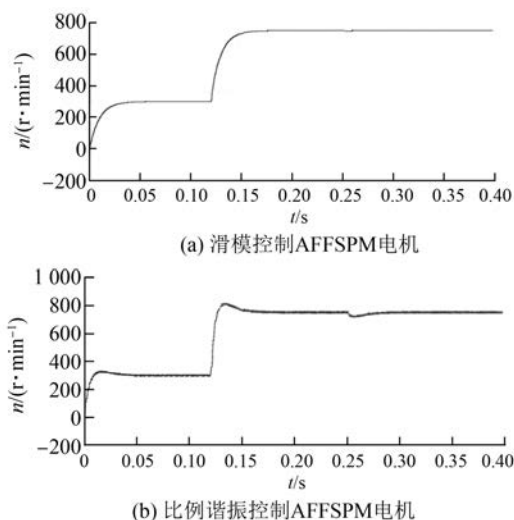


图 13 AFFSPM 电机转速动态响应曲线

现一定的脉动现象。两种控制策略的仿真结果都验证了该新型 AFFSPM 电机的可行性,滑模控制策略下该新型 AFFSPM 电机的控制系统具有较好的控制性能。

【参考文献】

- [1] 于晓勇,赵晨晓,马晶,等.基于专利分析的我国电动汽车技术发展趋势研究[J].科学学与科学技术管理,2011,32(4): 44-51.
- [2] 杨康,魏海峰,顾凯.电动汽车空调压缩机用永磁同步电机变频控制系统[J].电机与控制应用,2014,41(1): 33-36.
- [3] 葛叶明,朱孝勇,陈龙.电动汽车用定子永磁型磁通记忆式游标电机性能分析[J].电机与控制应用,2014,41(3): 45-51.
- [4] 黄智宇,鲜知良,李景俊,等.基于模型开发方法的电动汽车永磁同步电机矢量控制算法研究与应用[J].电机与控制应用,2014,41(6): 45-50.
- [5] 李强.电动汽车用异步电机参数辨识及优化[J].电机与控制应用,2014,41(6): 51-55.
- [6] 李强,王永全,付瑶琴.电动汽车用异步电机驱动控制系统可靠性分析[J].电机与控制应用,2014,41(7): 62-67.
- [7] 朱鲁佳.电动汽车用永磁同步电机驱动系统的高性能控制[J].电机与控制应用,2015,42(2): 56-59.
- [8] 黄智宇,陈俊兵.电动汽车用永磁同步电机起动过程分析与实现[J].电机与控制应用,2015,42(2): 60-64.
- [9] 贡俊.电动汽车驱动电机系统研究及其产业化现状

- 与发展[J].汽车与配件,2011(44): 20-25.
- [10] 赵纪龙,林明耀,裴召刚,等.轴向磁场磁通切换永磁电机矢量控制[J].东南大学学报,2014,44(5): 929-934.
- [11] 吉敬华,刘文庆,赵文祥.模块化磁通切换永磁直线电机的分析与控制[J].电机与控制应用,2014,41(1): 5-8.
- [12] 章超,陈栋.轴向磁通切换混合励磁电机比较[J].电机与控制应用,2014,41(6): 39-44.
- [13] 郝雯娟,邓智泉.一种基于分段定子的直线永磁磁通切换电机结构及其优化方法[J].电机与控制应用,2015,42(12): 1-6.
- [14] 许泽刚,谢少军.混合励磁磁通切换电机定子单元结构比较[J].电机与控制应用,2015,42(12): 23-30.
- [15] 裴召刚,赵纪龙,林明耀,等.轴向磁场磁通切换型永磁电机矢量控制[J].电机与控制应用,2013,40(7): 37-42.
- [16] 林明耀,张磊,李鑫.轴向磁场磁通切换永磁电机齿槽转矩分析[J].电机与控制学报,2009,13(6): 787-791.
- [17] HUA W, CHENG M, ZHU Z Q, et al. Analysis and optimization of back EMF waveform of a flux-switch permanent motor [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, 23(3): 723-733.
- [18] ZHU Z Q, CHENG J T. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 1447-1452.
- [19] LIU X P, ZHENG A H, WANG C. Design of a stator-separated axial flux-switching hybrid excitation synchronous machine [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, 2011: 20-23.
- [20] 李健,王爱元,李全峰,等.弱磁型混合励磁磁通切换电机的结构与原理分析[J].微特电机,2015,43(2): 8-11.
- [21] ZHANG W, LIN M Y, XU D, et al. Novel fault tolerant design of axial field flux-switching permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 1-4.
- [22] ZHANG W, LIN M Y. Influence of rotor pole number on optimal parameters in e-core axial field flux-switching permanent magnet machine [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, Busan, Korea, 2013: 1217-1221.
- [23] ZHANG W, LIN M Y, HAO L, et al. Design and analysis of a novel E-core axial field flux-switching permanent magnet machine [C] // The Ninth International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Hangzhou, China, 2013: 1-6.
- [24] ZHANG W, LIN M Y, LI H, et al. Comparative study of E-core axial field flux-switching permanent magnet machines [C] // Compumag 2013, Budapest, Hungary, 2013: 1-2.
- [25] 朱琰,程明,花为,等.磁通切换永磁电机的空间矢量脉宽调制控制[J].电机与工程学报,2010,14(3): 45-49.
- [26] 袁雷,胡冰新,魏克银,等.现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M].北京:北京航空航天大学出版社,2016.
- [27] 贺宇轩,谢小华,张爱春.基于滑模变结构控制的永磁同步电机[J].吉林大学学报(信息科学版),2015,33(1): 12-18.
- [28] 邱忠才,王斌,郭冀岭,等.卡尔曼滤波滑模变结构PMSM位置速度观测器[J].电力电子技术,2013,47(11): 103-105.
- [29] 朱晓虹,张广明,梅磊,等.基于滑模速度控制器的PMSM无速度传感器控制研究[J].电机与控制应用,2016,43(1): 1-6.
- [30] 郑喻,牛欢欢,付登昊.基于比例谐振控制器的逆变控制系统研究[J].电气开关,2015(5): 45-47.
- [31] 周娟,张勇,耿乙文,等.四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进PR控制[J].中国电机工程学报,2012,32(6): 113-120.

收稿日期: 2017-03-06

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国学术期刊(光盘版)

全国优秀科技期刊 华东优秀科技期刊

中国科学引文数据库来源期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊