

基于 TSF 的开关磁阻电机脉宽调制 变占空比控制*

刘 迪, 赵永生, 范云生, 柳 健

(大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 传统的基于转矩分配函数(TSF)的开关磁阻电机(SRM)控制策略存在电流跟踪效果较差和转矩脉动高的问题。为此提出一种变占空比的控制方法。该方法结合电流滞环和脉宽调制(PWM)技术,根据电感的线性模型特性进行区间分段,然后通过改变不同区间上 PWM 的占空比来调节绕组两端的电压,达到精确跟踪电流和抑制转矩脉动的目的。对改进后的控制方法进行了仿真和试验验证,结果表明:与传统控制方法相比,改进后的控制策略具有更小的电流跟踪误差和转矩脉动。

关键词: 开关磁阻电机; 转矩分配函数; 脉宽调制; 转矩脉动

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0015-06

doi: 10.12177/emca.2019.132

Pulse Width Modulation Variable Duty Cycle Control of Switched Reluctance Motor Based on Torque Sharing Function*

LIU Di, ZHAO Yongsheng, FAN Yunsheng, LIU Jian

(College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that the traditional torque sharing function (TSF) control strategy of the switched reluctance motor (SRM) has the disadvantages of poor tracking performance of phase current and high torque ripples, an optimized TSF-based pulse width modulation (PWM) variable duty cycle control of the SRM is proposed. In this method, PWM and hysteresis control are combined, and the control process is sectioned based on the linear inductance model characteristics. The winding voltage is adjusted through changing the PWM duty cycle of different intervals, so as to achieve excellent current tracking and suppress torque ripple. Simulation and experimental results further verify the effectiveness of the proposed method. In comparison with the traditional TSF control strategy, the optimized control method has less current tracking error and lower torque ripple.

Key words: switched reluctance motor (SRM); torque sharing function; pulse width modulation (PWM); torque ripple

0 引 言

开关磁阻电机(SRM)具有结构坚固、成本低、控制方式灵活、可适应恶劣环境等优点,广泛应用于矿井运输、电动汽车、航空等领域^[1-2]。

SRM 特有的双凸极结构使电机产生较大的转矩脉动,尤其在换相期间更为严重,限制了 SRM 的发展^[3-4]。因此,减小转矩脉动是 SRM 亟待解决的问题之一。针对这个问题,国内外学者主要从电机的本体设计和控制策略两方面进行了研

收稿日期: 2019-10-16; 收到修改稿日期: 2019-11-12

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51609033); 辽宁省自然科学基金项目(20180520005)

作者简介: 刘 迪(1994—),女,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机调速及转矩控制。

赵永生(1962—),男,博士,教授,研究方向为计算机控制、智能控制、智能故障诊断和嵌入式系统等。

究^[3-6]。相较而言,后者更容易实现,而且效果较好。因此,本文从控制策略方面对 SRM 转矩脉动抑制进行研究。

转矩分配函数(TSF)控制方法具有易于实现和优良的转矩脉动抑制效果等优势,是 SRM 控制领域的研究热点之一^[7-9]。文献[10]基于传统的 TSF 函数提出了一种改进的分配函数,并通过对新型分配函数中的参数进行调整,实现参考转矩的合理分配,从而提高控制器的跟踪性能,最终达到抑制转矩脉动的目的。文献[11]对指数型 TSF 函数进行改进,并提出了综合考虑转矩脉动抑制和运行效率优化的控制方案,并通过仿真和试验验证了其方案的可行性。文献[12]提出了一种新型 TSF,并将最小铜耗和最优驱动性能作为优化指标来选取最优重叠角,对 TSF 进行优化,获得了抑制转矩脉动和降低铜耗的效果。但是该策略没有考虑电流跟踪性能对转矩跟踪性能的影响,而转矩跟踪性能直接影响转矩脉动。

综上所述,现有的基于 TSF 的转矩脉动抑制的研究侧重点在于如何将总转矩合理地分配给相转矩,忽略了相电流的跟踪性能对转矩脉动的影响,而较大的电流脉动会直接影响转矩的输出效果。在传统基于 TSF 的控制策略中,电流控制器使用滞环控制,但在实际应用中存在电流跟踪性能差、超调大和功率器件的开关频率依赖性较高等问题。

为此,本文提出一种改进的基于 TSF 的控制策略。该控制策略首先对电感线性模型特性进行了分析,并根据该特性进行区间分段;然后通过改变不同区间上脉宽调制(PWM)的占空比来调节绕组两端的电压,提高电流的跟踪性能;最后对改进的转矩分配控制进行仿真和试验验证,并与传统转矩分配控制进行对比,结果表明改进的转矩分配函数控制不仅减小了实际电流的跟踪误差还对转矩脉动有很好的抑制作用。

1 传统基于 TSF 的控制系统

1.1 传统 TSF 控制系统

图 1 所示为传统的基于 TSF 控制系统结构图。TSF 是通过设定的分配函数将总转矩合理地分配给相转矩,并使用转矩-位置-电流模型获得参考电流,然后通过控制开通相的电流,最终使合

转矩保持稳定的一种控制策略。

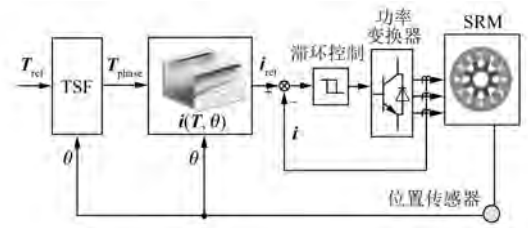


图 1 传统的 TSF 设计结构图

分配函数的选取直接影响 SRM 换相转矩脉动、馈电电压等,因此,合理地选取 TSF 对提高 SRM 控制性能非常重要。传统 TSF 有直线型、余弦型、立方型和指数型等。如果采用直线型或余弦型,在开通初期导通相会被分配到较大的转矩,这将增大换相时定子绕组电流的峰值,而这些尖峰的出现会对电机的性能产生影响^[13]。因此,本文选择指数型 TSF。图 2 所示为指数型 TSF 波形图。其中, θ_{on} 为开通角, θ_{off} 为关断角, θ_{ov} 为换相重叠角。

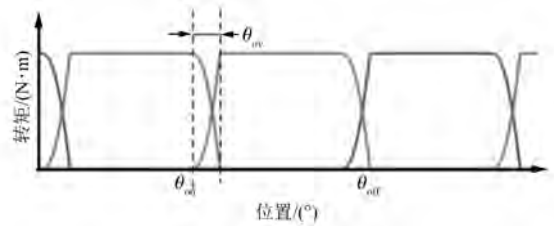


图 2 指数型 TSF 波形图

第 k 相的参考转矩被定义为

$$T_k^*(\theta) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta < \theta_{on} \\ T_{ref} \cdot f_{rise}(\theta), & \theta_{on} \leq \theta < \theta_{on} + \theta_{ov} \\ T_{ref}, & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta < \theta_{off} - \theta_{ov} \\ T_{ref} \cdot f_{fall}(\theta), & \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta < \theta_{off} \\ 0, & \theta_{off} \leq \theta < \frac{2\pi}{N_r} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_k^*(\theta)$ 为第 k 相参考转矩; T_{ref} 为给定参考转矩; N_r 为转子极数。

$f_{rise}(\theta)$ $f_{fall}(\theta)$ 的表达式为

$$\begin{cases} f_{rise}(\theta) = e^{2\left(\frac{\theta_{ov}}{\theta_{on}-\theta}+1\right)} \\ f_{fall}(\theta) = 1 - e^{2\left(\frac{\theta_{ov}}{\theta_{off}-\theta}+1\right)} \end{cases} \quad (2)$$

参考转矩经过 TSF 模块后可得到各相的参考转矩,再通过转矩-电流逆运算获得相参考电流。由图 1 可知,传统的基于 TSF 的控制策略使用滞环控制器实现相电流跟踪参考电流,但在实际控制系统中,传统滞环控制存在电流脉动较大和相电流较多超出滞环区间等问题,导致转矩脉动增大。

1.2 电流滞环控制下电流脉动原因分析

电流斩波控制器采用电流滞环控制,保持开通角和关断角不变,根据设定电流误差的上下限值对开关进行导通和关断控制,从而将电流限定在设定的范围内。对于不对称半桥驱动电路而言,电流斩波控制有电流硬斩波控制和电流软斩波控制 2 种工作方式。不对称半桥驱动电路有 3 种工作模式,分别是“-1”、“0”和“1”,如图 3 所示。硬斩波只有“-1”和“1”2 种模式;软斩波有 3 种模式。相对硬斩波来说,因为软斩波在斩波段相绕组端相电压近似为零,相电流下降缓慢,所以斩波次数较少,开关铜耗较低^[14]。因此,本文选择软斩波控制方式。

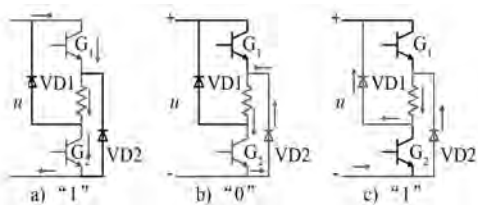


图 3 不对称驱动电路的 3 种工作模式

图 4 所示为基于传统 TSF 控制策略下使用电流斩波控制仿真后的电流波形。从图 4 可以看出,电流波形脉动较大,且明显有较多超出滞环区间。

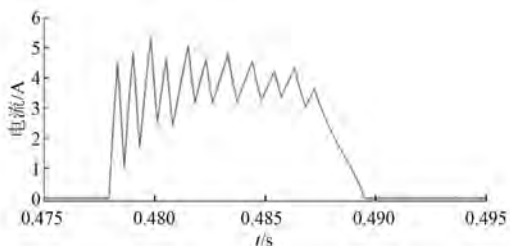


图 4 传统滞环控制相电流波形

在仿真过程中,由于电流控制器单元得到的相电流的值是在一定采样频率下获得的离散信

号,功率变换器所收到的开关控制信号便会滞后于电流的变化,如果在控制过程中电流变化较快,就会出现超出滞环区间的情况,导致较大电流脉动的产生。因此,电流控制器的跟踪性能受采样频率的限制。同理,在实际控制中,电流的跟踪性能受控制频率的限制。

由以上分析可知,电流滞环控制器会产生较大的脉动,而过大的电流脉动会损坏半导体器件,降低其使用寿命,同时由于转矩与电流存在非线性函数关系,也会使输出转矩脉动较大,影响电驱系统的性能。因此,有必要对传统电流控制器进行改进,减小电流脉动,从而实现相电流的精确跟踪。

2 改进的基于 TSF 的控制系统

由第 1 节可知,在控制过程中电流的跟踪性能受系统控制频率和绕组电压的影响。因为实际条件下系统的控制频率较难改变,所以通过调节绕组电压来抑制电流的过大脉动。本文将 PWM 和滞环控制方法结合,通过改变 PWM 占空比来调节绕组两端的平均电压。改进后的基于 TSF 的控制策略结构图如图 5 所示。

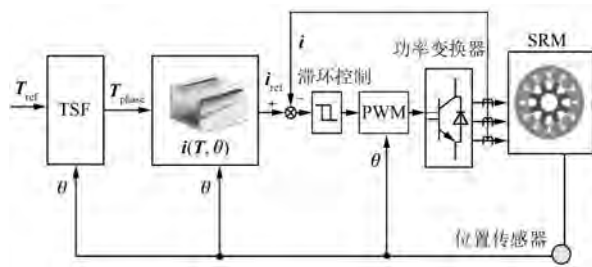


图 5 改进后的基于 TSF 的控制策略结构图

图 6 所示为电流滞环控制下开关管的 PWM 控制信号。图 6 中, P_1 、 P_2 分别是上开关管和下开关管的 PWM 信号, T_s 为采样时间, U_s 为相电压, D 为上开关管的占空比($D=1$)。此时绕组两

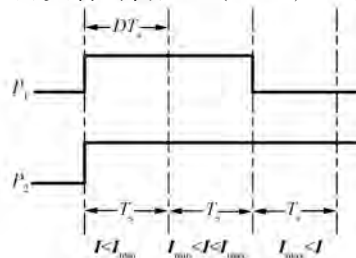


图 6 电流滞环方法下开关管的 PWM 控制信号

端电压 U_1 可表示为

$$U_1 = \frac{DT_s}{T_s} U_s = U_s \quad (3)$$

图 7 所示为本文控制方法下开关管的 PWM 控制信号。 D_1 为占空比,且满足 $0 < D_1 \leq 1$ 。有:

$$U_2 = \frac{D_1 T_s}{T_s} U_s = D_1 U_s \quad (4)$$

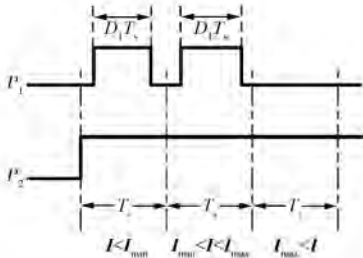


图 7 本文控制方法下开关管的 PWM 控制信号

由式(4)可知, $U_2 \leq U_1$, 则通过减小上开关管的占空比能够减小相绕组两端的电压。因此,只要选取合适的 PWM 值便可通过减小相绕组两端电压来减小电流脉动。

由图 4 可以看到整个导通区内相同的相电压供给下,相电流的脉动情况是不同的,在导通初期电机启动时旋转电动势较小导致相电流较其他位置变化速度快,才会出现较多超出滞环区间,且脉动较大的情况下,减小相电压可以减缓相电流的变化速度,因此有必要对相电流的变化率进行分析,并根据其特性设定 PWM 的值。

忽略磁路饱和的影响,即假设电感与相电流的大小无关,则相绕组电感 L 随转子位置角 θ 周期性变化曲线如图 8 所示。

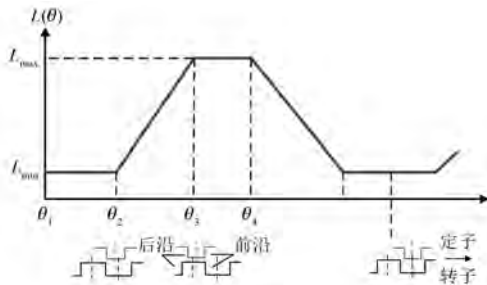


图 8 线性模型的电感随位置变化曲线

图 8 中的电感曲线对应的函数解析式为

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min}, & \theta_1 \leq \theta < \theta_2 \\ k(\theta - \theta_2) + L_{\min}, & \theta_2 \leq \theta < \theta_3 \\ L_{\max}, & \theta_3 \leq \theta < \theta_4 \\ L_{\max} - k(\theta - \theta_4), & \theta_4 \leq \theta < \theta_5 \end{cases} \quad (5)$$

其中: $k = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\theta_3 - \theta_2}$ 。

当 SRM 由恒定直流电压源供电时,可得出单相电路方程为

$$U_s = \frac{d\psi}{dt} + iR \quad (6)$$

式中: ψ 为磁链; i 为绕组两端的电流; R 为绕组的内阻。

忽略绕组压降,相电压可表示为

$$U_s = L(\theta) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta)}{dt} \omega \quad (7)$$

式中: ω 为电机转速。

整理式(7)可得电机电流的变化率:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_s - i \frac{dL}{d\theta} \omega}{L} \quad (8)$$

在实际控制中,为了得到较大的动力转矩,通常将开通角设计在 θ_2 之前,关断角设计在最大电感到达之前,即在 $\theta_2 < \theta_{\text{off}} < \theta_3$ 之间。根据式(5),可将电流的变化率写成:

$$\frac{di}{dt} = \begin{cases} \frac{U_s}{L_{\min}}, & \theta_{\text{on}} < \theta \leq \theta_2 \\ \frac{U_s - k\omega i}{L_{\min} + k(\theta - \theta_2)}, & \theta_2 < \theta \leq \theta_{\text{off}} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,区间 $\theta_{\text{on}} < \theta \leq \theta_2$ 内电流变化率是一个常数,电流上升速度较快,因此应给予较小的电压来减缓电流的上升速度,此时 D_1 的值为 D_{11} 。区间 $\theta_2 < \theta \leq \theta_{\text{off}}$ 内电流变化率随着电感的上升而减小,因此应设置稍大的占空比来确保相电流能够跟踪参考电流,此时 D_1 的值为 D_{12} 。

3 仿真实验

为了验证本文所设计控制系统的可行性,使用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,并将传统的基于 TSF 的控制系统作为比较对象。仿真中使用与试验平台相同参数的 12/8 极三相 SRM 样机,采样频率为 10 kHz。

在线性模型下电流变化率与电感有关,但在实际控制中,还受电机电流和转速的影响。因此,本文采用试凑法确定 D_{11} 、 D_{12} 的值,并将结果整理成为

$$D_{11} = \begin{cases} 0.0001\omega + 0.027T_{\text{ref}}, & T_{\text{ref}} \geq 4 \\ 0.1, & T_{\text{ref}} < 4 \end{cases} \quad (10)$$

$$D_{12} = \begin{cases} 0.008 + 0.062T_{\text{ref}}, & T_{\text{ref}} \geq 4 \\ 0.26, & T_{\text{ref}} < 4 \end{cases} \quad (11)$$

设定电机转速为 500 r/min, 分别采用 2 种不同的控制方法进行仿真验证。图 9、图 10 所示为 2 种不同控制下不同负载时的相电流跟踪参考电流的曲线图。对比图 9、图 10 可以发现, 开关频率为 10 kHz 时, 传统 TSF 控制方法电流脉动较大, 且相电流跟踪效果较差, 而采用本文控制方法后电流脉动明显减小, 电流跟踪效果有所改善。

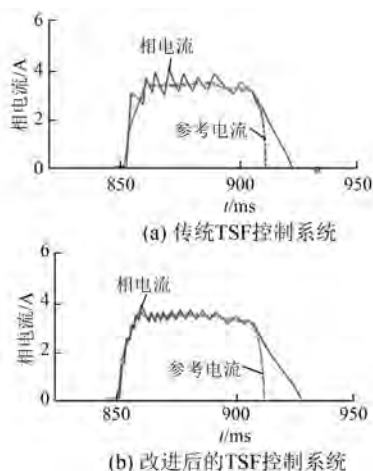


图 9 负载为 3 N·m 时 2 种控制方法的相电流曲线

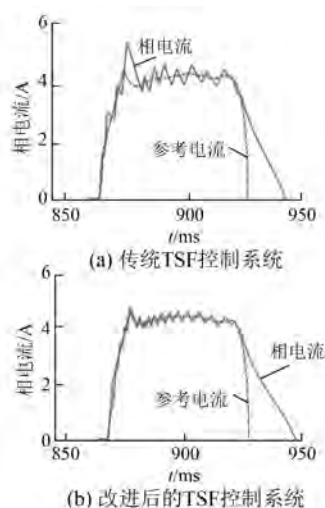


图 10 负载为 5 N·m 时 2 种控制方法的相电流曲线

图 11 所示为 2 种控制方法下的磁链、相电流、相转矩和总转矩波形对比图。从图 11 可以看出, 使用改进后的控制方法后转矩脉动明显减小, 且换相时脉动尖峰显著变小。

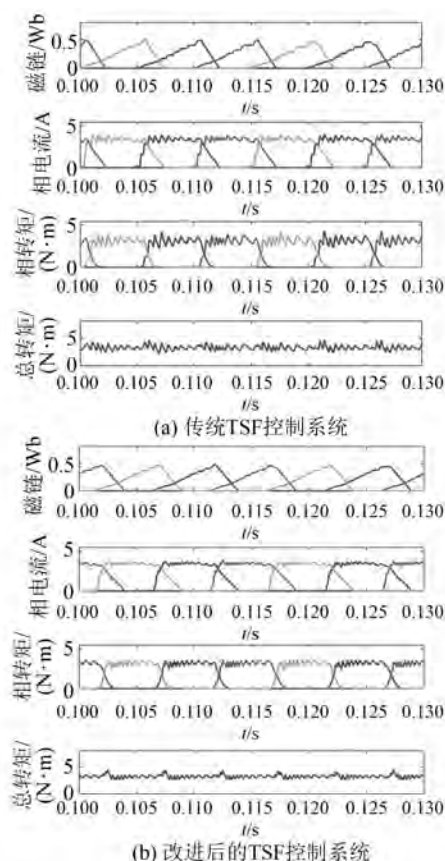


图 11 2 种控制方法下的磁链、电流、相转矩和总转矩波形对比图

为了对转矩脉动进行定量分析, 使用转矩脉动率来描述转矩脉动的大小。转矩脉动率 k_T 定义如下:

$$k_T = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: T_{max} 为合成转矩的最大值; T_{min} 为合成转矩的最小值; T_{avg} 为合成转矩的平均值。

表 1、表 2 所示为 2 种控制方法在不同负载转矩和不同参考转速下的转矩脉动结果值。其中, k_1 、 k_2 分别是传统控制方法和改进后控制方法的转矩脉动。

由表 1、表 2 可知, 本文控制方法相对于传统 TSF 控制方法转矩脉动抑制的效果更好。

表 1 参考转矩为 300 r/min 时 2 种控制方法的
转矩脉动值

T_{ref}	k_1	k_2
2	1.04	0.39
4	0.75	0.56
6	0.73	0.48

表 2 参考转矩为 500 r/min 时 2 种控制方法的
转矩脉动值

T_{ref}	k_1	k_2
2	0.91	0.70
4	0.73	0.57
6	0.84	0.54

4 试验验证

为了验证改进后 TSF 控制策略在实际控制过程中的可行性,搭建 SRM 试验平台,如图 12 所示。采用额定功率为 1.5 kW 的三相 12/8 极 SRM 进行试验。试验用样机参数如表 3 所示。

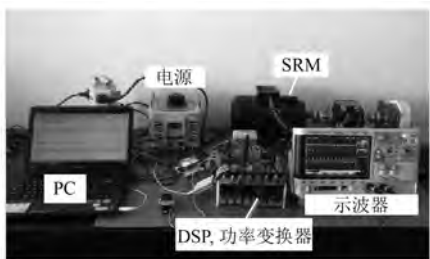


图 12 试验平台

表 3 试验用样机主要参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
额定转矩/(N·m)	9.55
调速范围/(r·min ⁻¹)	100~1 500

图 13 所示为 2 种控制方法下相电流跟踪试验波形。对比图 13 (a) 和图 13 (b) 可知,采用本文控制方法的电流跟踪效果明显优于传统 TSF 控制方法,且在跟踪过程中电流脉动较小。

综上所述,本文控制方法在减小电流脉动、改善电流跟踪和抑制转矩脉动上具有显著效果,且在实际控制中具有较好的实用性和可行性。

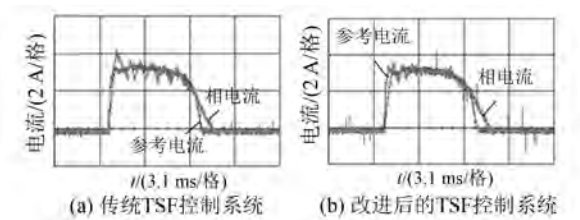


图 13 2 种控制方法的试验波形图

5 结 语

本文提出了一种改进的基于 TSF 的变占空比控制策略,通过对线性电感特性的分析得出了电流的变化规律,并以此进行区间分段,再根据各区间的特性给予不同的占空比,以实现电流的精确跟踪。仿真和试验结果表明,该策略减小了电流脉动,提升了电流的跟踪性能,抑制了转矩脉动,并且在实际控制过程中是可行的,具有良好的应用前景。

【参考文献】

[1] BOLDEA I, TUTELEA L N, PARSA L, et al. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (10) : 5696.

[2] SOZER Y, HUSAIN I, TORREY D A. Guidance in selecting advanced control techniques for switched reluctance machine drives in emerging applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51 (6) : 4505.

[3] YE J, BILGIN B, EMADI A. Comparative evaluation of power converters for 6/4 and 6/10 switched reluctance machines [C] // 2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2012.

[4] BILGIN B, EMADI A, KRISHNAMURTHY M. Comprehensive evaluation of the dynamic performance of a 6/10 SRM for traction application in PHEVs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (7) : 2564.

[5] 尹俊. 开关磁阻电机效率与转矩脉动优化控制设计 [D]. 南京: 东南大学, 2016.

[6] 马铭遥, 袁克湘, 杨晴晴, 等. 基于电流软斩波的开关磁阻电机分段 PWM 变占空比控制 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (18) : 5582.

(下转第 35 页)

- [8] RENU K, KUMARI N K, KRISHNA D S G. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor with flux weakening operation for washing machine application [C] // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- [9] 谢统辉. 基于单片机的永磁同步电机控制方法 [J]. 电子技术与软件工程, 2017(7): 264.
- [10] 李佑虹. 基于嵌入式 DSP 的小功率无刷直流电机控制系统的仿真研究 [J]. 科技风, 2018(9): 37.
- [11] 许中阳, 郭希铮, 邹方朔, 等. 永磁同步电机无速度传感器控制离散化方法研究 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 52.
- [12] 王维强, 曾晓松, 夏茂树, 等. 基于 dSPACE 的电动汽车电机调速控制策略研究 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 86.
- [13] 杜常清, 徐懂懂. 基于 dSPACE 的混合动力汽车控制策略半实物仿真平台 [J]. 自动化与仪表, 2018, 33(1): 79.
- [14] 陈再发, 刘彦呈, 卢亨宇. 具有参数辨识的船舶永磁推进电机无位置传感器控制 [J]. 电机与控制学报, [http: // kns. cnki. net/kcms/detail/23. 1408. TM. 20190626.1056.006.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.TM.20190626.1056.006.html)
- [15] WU J, WEI H, ZHANG Y, et al. Sensorless vector control of permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system [C] // 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2017.
- [16] 陈杨. 基于 MRAS 无速度传感器的永磁同步电机转速跟踪控制 [J]. 科技通报, 2018, 34(10): 176.
- [17] NAIR R R, NARAYANAN G. Stator flux based model reference adaptive observers for rotor position and speed estimation in doubly-fed induction machines [C] // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- [18] 朱瑞杰. 基于模型参考自适应的永磁同步电机无位置传感器控制 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [19] 王杰, 谢源, 谢涛, 等. 基于 MRAS 的永磁同步电机无传感器矢量控制研究 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 30.

(上接第 20 页)

- [7] 王如乾, 王国峰, 李存贺, 等. 开关磁阻电机固定频率预测电流控制策略 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(7): 1.
- [8] MAGNI L, RAIMONDO D M, ALLGOWER F. Nonlinear model predictive control [M]. Berlin: Springer, 2009: 345-369.
- [9] ZHANG R, ZHANG Y, QIAN X, et al. Direct instantaneous torque control of switched reluctance motor based on adaptive backstepping [C] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [10] 刘涛, 吴忠, 吕昊曦. 开关磁阻电动机转矩分配策略研究 [J]. 微电机, 2013, 46(7): 11.
- [11] 王喜莲, 许振亮, 王翠. 开关磁阻电机转矩脉动与铜耗最小化控制研究 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(7): 52.
- [12] VUJICIC V. Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 388.
- [13] 王姣. 基于模糊滑模控制的开关磁阻电机转矩分配控制系统研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [14] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

(上接第 28 页)

- [17] ERGENE L T, SALON S J. Determining the equivalent circuit parameters of canned solid-rotor induction motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(7): 2281.
- [18] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 180-182.
- [19] 林宏民, 吴晓新, 乐胜康, 等. 基于三电平优化矢量的异步电机模型预测直接转矩控制 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22(8): 65.
- [20] 缪仲翠, 党建武, 巨梅, 等. 基于分数阶滑模观测的感应电机无速度传感器矢量控制 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22(5): 84.