

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.017

基于 SVPWM 的电动汽车直接转矩控制方法研究

李 杰¹, 韩峻峰², 潘盛辉¹

(1. 广西科技大学 电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006;

2. 广西机电职业技术学院, 广西 南宁 530007)

摘要: 针对传统直接转矩控制系统中存在较大转矩磁链脉动和开关频率不恒定等问题, 对电动汽车用永磁同步电机的数学模型及其直接转矩控制方法进行了研究, 提出了一种基于空间矢量脉宽调制技术(SVPWM)的直接转矩控制系统方案。该方案采用预期电压矢量计算单元取代传统直接转矩系统中滞环比较器, 以得到能够减小当前定子磁链与转矩脉动的预期电压矢量, 再利用 SVPWM 技术将预期电压矢量转换为实际电压矢量以实现电机的控制。在 Matlab/Simulink 下构建了基于 SVPWM 的电动汽车直接转矩控制系统的仿真模型。仿真研究结果表明, 该控制系统可以获得较小的转矩脉动和磁链脉动。

关键词: 直接转矩控制; 空间矢量脉宽调制; 永磁同步电机; Matlab/Simulink

中图分类号: TH39; U469.72; TP29

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)07-0898-05

Direct torque control system of electric vehicle based on SVPWM

LI Jie¹, HAN Jun-feng², PAN Sheng-hui¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. Guangxi Technological College of Machinery and Electricity, Nanning 530007, China)

Abstract: Aiming at the problems of torque pulsation and inconstant inverter switching frequency in the traditional direct torque control system, the mathematical model and the direct torque control method of permanent magnet synchronous motor were studied. A direct torque control system scheme based on space vector pulse width modulation (SVPWM) was presented to adopting the expected voltage vector calculation unit to replace the hysteresis comparator of conventional direct torque system, so that the expected voltage vector can reduce the current of stator flux and torque ripple would be obtained. In order to realize the motor control, the expected voltage vector was converted to the actual voltage vector by using the SVPWM technology. The simulation model of the direct torque control system based on the space vector modulation was built in the Matlab/Simulink. The simulation results indicate that the system can obtain small flux and torque pulsation.

Key words: direct torque control; space vector pulse width modulation(SVPWM); permanent magnet synchronous motor; Matlab/Simulink

0 引 言

由于全球石油资源紧张, 大气污染严重, 电动汽车作为新能源汽车的代表, 已被公认为 21 世纪汽车工业改造和发展的主要方向, 然而还存在相关问题必须解决, 其中, 驱动电动机及其控制技术是制约电动汽车发展的主要因素之一。随着电力电子技术与微机技术以及现代控制技术的高速发展, 交流电机及其驱动系统已逐步在实际应用中已成为主流^[1-2]。永磁同步电机

具有结构简单、体积小、质量轻、转动惯量小、功率密度高等特点。与直流电机、感应电机和开关磁阻电机等相比, 永磁同步电机更适合用于电动汽车电机驱动系统, 并得到了广泛应用^[3]。目前, 电动汽车用永磁同步电机驱动系统主要采用直接转矩控制技术和矢量控制技术。直接转矩控制技术最早是由德国教授 Depenbrock 和日本学者 Takahashi 分别提出的, 在 1997 年, 由 Zhong L 和 M. F. Rahman 等人^[4]将其应用到 PMSM 控制中, 该技术是基于定子磁场定向, 动态响应

好,结构简单,便于实现,但存在转矩脉动大以及开关频率不恒定的问题。为解决该问题,国内外学者提出了许多改进技术^[5-7]。文献[5]采用离散SVPWM方法,针对异步电机在不同的速度范围下使用不同的电压矢量,该方法易于实现,但若控制精度越高,矢量的划分就越细,增加了控制的复杂性。文献[6]详细介绍了减少转矩脉动和增加转矩响应快速的永磁同步电机直接转矩控制策略,采用SVPWM技术后的直接转矩控制系统输出转矩脉动大大减少,控制性能得到了极大提高。

本研究将针对传统直接转矩控制存在的问题,提出一种基于空间矢量调制(SVPWM)的直接转矩控制方法,并对其进行建模仿真。该方法利用定子电压在定子磁链坐标轴上的分量控制电动机的磁链和转矩,再结合空间矢量调制方法控制逆变器运行,以克服传统直接转矩控制系统的不足。

1 永磁同步电机模型

在忽略电动机铁心的饱和,不计电动机中的涡流和磁滞损耗,转子无阻尼绕组情况下,则永磁同步电机在d-q轴系下的电压、磁链和电磁转矩方程为:

$$\varphi_d = \varphi_f + L_d i_d \tag{1}$$

$$\varphi_q = L_q i_q \tag{2}$$

$$u_{sd} = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \tag{3}$$

$$u_{sq} = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \tag{4}$$

$$T_e = \frac{p_0}{L_d L_q} \left[\varphi_f \varphi_s L_q \sin \delta_{sf} - \frac{1}{2} (L_d - L_q) \varphi_s^2 \sin 2\delta_{sf} \right] \tag{5}$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{p_0}{L_d L_q} \left[\varphi_f \varphi_s L_q \cos \delta_{sf} - (L_d - L_q) \varphi_s^2 \cos 2\delta_{sf} \right] \frac{d\delta_{sf}}{dt} \tag{6}$$

式中: $\varphi_d, \varphi_q, u_{sd}, u_{sq}, i_d, i_q, L_d, L_q$ —d轴和q轴的磁链、电压、电流、电枢电感; R_s —定子电阻; ω —转子角速度; φ_s —一定子磁链; φ_f —永磁体产生的磁链; T_e —电磁转矩; p_0 —极对数; δ_{sf} —一定、转子磁链之间的夹角,也称转矩角。

由式(5,6)可以看到,转矩和转矩的变化与转矩角变化是非线性关系,永磁同步电机直接转矩的基本思想是在保持定子磁链幅值不变的情况下,通过控制 δ_{sf} 和它的快速变化来实现对电机电磁转矩的有效控制。

2 基于SVPWM的永磁同步电机直接转矩控制系统

根据式(6),可得:

$$\Delta T_e = \frac{p_0}{L_d L_q} \left[\varphi_f \varphi_s L_q \cos \delta_{sf} - (L_d - L_q) \varphi_s^2 \cos 2\delta_{sf} \right] \Delta \delta_{sf} \tag{7}$$

式(7)表明,若 φ_s 已被控制为恒值,或者不计 φ_s 的变化对转矩的影响,转矩的增量 ΔT_e 就决定于转矩角的增量 $\Delta \delta_{sf}$,转矩角的增量如图1所示。

在图1中,定子磁链矢量 φ_s 在静止 $\alpha - \beta$ 坐标系中的空间相位角为 θ 。为产生转矩增量 $\Delta T_e, \varphi_s$ 的旋转速度应大于 φ_f ,使得能够产生转矩角 $\Delta \delta_{sf}$,为该定子磁链矢量 φ_s 应运动到新的位置,成为 φ_{sref} ,其相位角为 $\theta + \Delta \delta_{sf}$ 。其幅值为 $|\varphi_{sref}| = |\varphi_s^*|, |\varphi_s^*|$ 为给定值。

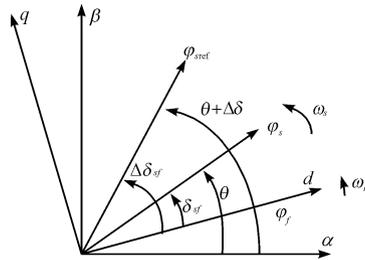


图1 转矩角的增量

在 $\alpha - \beta$ 坐标系中,定子电压方程为:

$$u_\alpha = R_s i_\alpha + \frac{d\varphi_\alpha}{dt} \tag{8}$$

$$u_\beta = R_s i_\beta + \frac{d\varphi_\beta}{dt} \tag{9}$$

由图1,可将上两式近似表示为:

$$u_{\alpha ref} = R_s i_\alpha + \frac{|\varphi_{sref}| \cos(\theta + \Delta \delta_{sf}) - |\varphi_s| \cos \theta}{\Delta T} \tag{10}$$

$$u_{\beta ref} = R_s i_\beta + \frac{|\varphi_{sref}| \sin(\theta + \Delta \delta_{sf}) - |\varphi_s| \sin \theta}{\Delta T} \tag{11}$$

式中: ΔT —控制周期; $u_{\alpha ref}, u_{\beta ref}$ —期望电压矢量 V_{out} 的电压分量值。

由式(10,11)便可确定期望电压矢量的幅值和相位角:

$$|V_{out}| = \sqrt{u_{\alpha ref}^2 + u_{\beta ref}^2} \tag{12}$$

$$\theta_{uref} = a \sin \frac{u_{\beta ref}}{|V_{out}|} \tag{13}$$

由期望电压矢量 V_{out} 在 $\alpha - \beta$ 坐标系中电压分量值 $u_{\alpha ref}, u_{\beta ref}$ 便可确定期望电压所在区间及大小,从而经过电压空间矢量调制单元SVPWM产生SVPWM脉冲信号,最终控制逆变器驱动永磁同步电机。基于空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制系统原理框图如图2所示。其中第2个PID调节器和与预期电压矢量计算单元以及SVPWM单元代替了传统直接转矩控制中的磁链、转矩滞环比较器和开关表。预期电压矢量计算单元实时地根据磁链、转

矩角增量、定子电流以及定子电阻,确定出控制电动机所需的期望电压矢量,再结合空间电压矢量调制方法确定控制逆变器运行的开关状态。传统直接转矩控制系统中每个采样周期中只作用一个有效电压矢量,并且期望电压矢量仅在 6 个基本电压矢量中选择,同时由于置环比较器的存在,导致逆变器开关频率不恒定^[8-9]。而在采用 SVPWM 合成电压矢量的方法中,一个采样周期内作用的是相邻有效电压矢量和零矢量的合成矢量,其为任意电压矢量,并且该矢量是根据实时的磁链、转矩角、定子电流以及电阻来确定的,因而,其可以有效减小电动机转矩脉动和改变开关频率不恒定等问题。

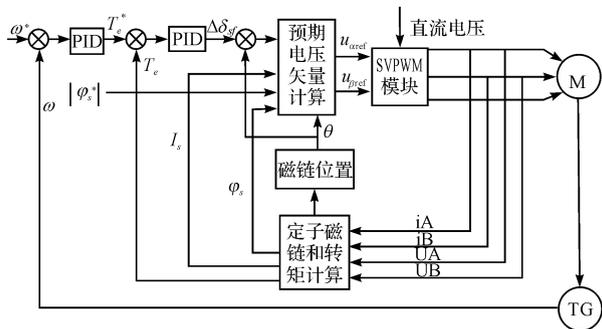


图 2 基于 SVPWM 的永磁同步电动机直接转矩控制系统

3 系统建模仿真

本研究在 Matlab/Simulink 下建立的基于 SVPWM 的同步电机直接转矩控制系统仿真模型如图 3 所示。

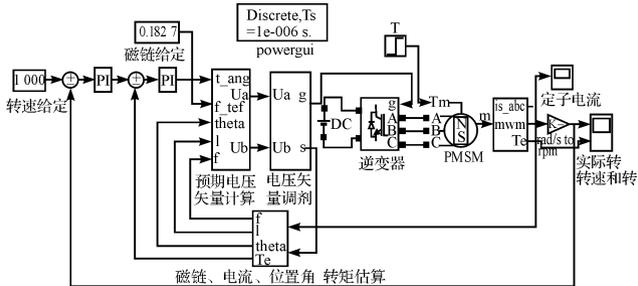


图 3 基于 SVPWM 的同步电机直接转矩控制系统仿真模型

整个系统仿真模型使用了 Simulink 基本仿真模块以及 SimPowerSystems 模型库中的部分元件^[10]。可以看到,仿真模型的结构与原理框图是基本相同的。整个仿真模型共分为 PI 速度调节模块、转矩 PI 调节模块、期望电压矢量计算模块、SVPWM、逆变器模块、PMSM 模块、磁链转矩估算模块和测量模块。

磁链转矩估算模块:磁链和转矩的估计是在两相静止 $\alpha - \beta$ 坐标系内进行的,利用坐标变换将三相电流变换到 $\alpha - \beta$ 坐标系上,同时根据当前输出的逆变

器开关状态和直流母线电压来得到 $\alpha - \beta$ 坐标系下的定子电压,根据所得的电流、电压,便可估算出转矩和磁链,上述过程如图 4 ~ 6 所示。

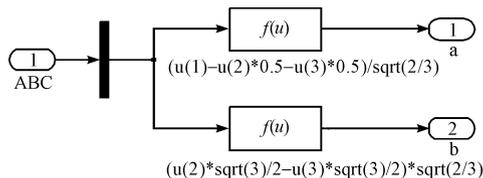


图 4 $\alpha - \beta$ 定子电流

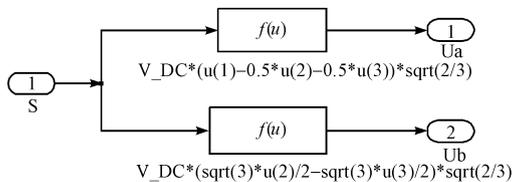


图 5 $\alpha - \beta$ 定子电压

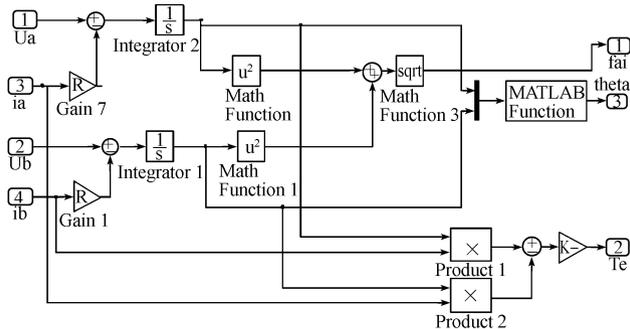


图 6 转矩和磁链估算

期望电压矢量计算模块:根据公式(10,11),在 Simulink 下搭建的计算期望电压的模块如图 7 所示。

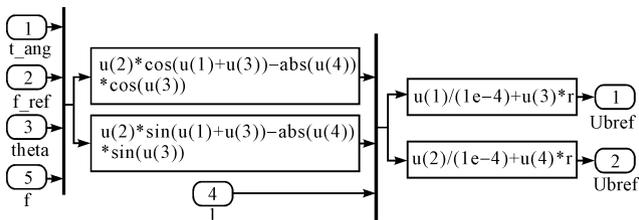


图 7 期望电压计算

SVPWM 模块:文献[11]中介绍的 SVPWM 的算法和建模方法,建立 SVPWM 的模型框图如图 8 所示。其中包括扇区判断、导通时间 T1、T2 的计算、导通时刻 Tcm1、Tcm2、Tcm3 的计算以及 SVPWM 波的产生等子模块。

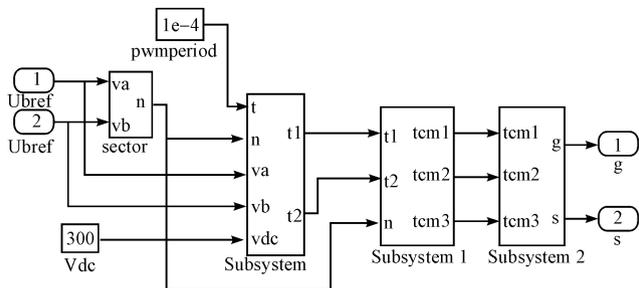


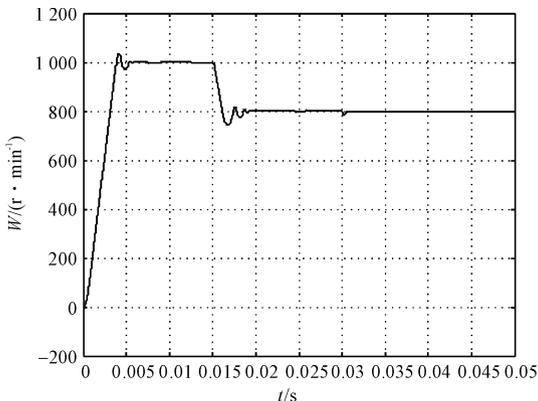
图 8 SVPWM 模块

4 仿真分析

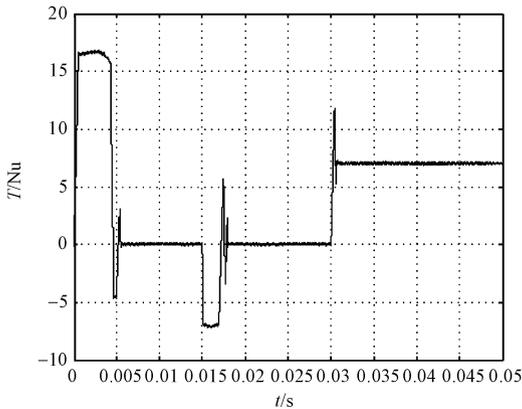
4.1 模型建立

本研究根据上述分析,建立了基于SVPWM的永磁同步电动机直接转矩控制仿真模型。

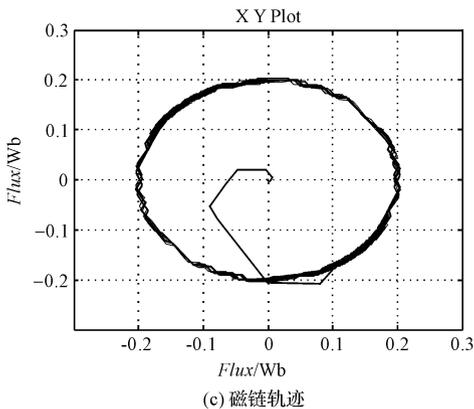
参数设置如下:定子电阻 $0.9585\ \Omega$ 、电感 $L_d=L_q=0.00525\ \text{H}$ 、转子磁链为 $0.1827\ \text{Wb}$ 、转动惯量 $J=0.0006329\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、极对数为4;逆变器直流母线电压为 $300\ \text{V}$ 、磁链给定值 $=0.2$ 。逆变器的开关频率为 $10\ \text{kHz}$ 、转速调节器的PI参数为 $K_p=2, K_i=0.01$,转矩上限设为 $17\ \text{N}\cdot\text{m}$,转矩角调节器的PI参数为 $K_p=0.01, K_i=0.01$,输出上限为 0.1 。系统采样周期为 $1\text{e-}6\ \text{s}$,PWM波周期为



(a) 转速响应曲线



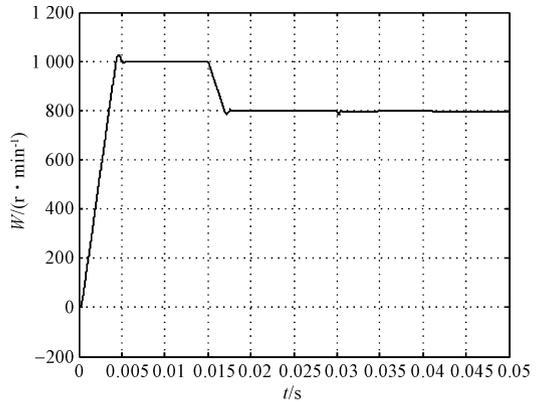
(b) 转矩波形



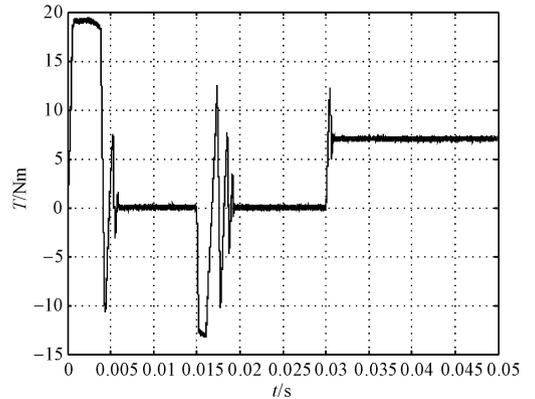
(c) 磁链轨迹

图9 传统直接转矩控制系统仿真波形

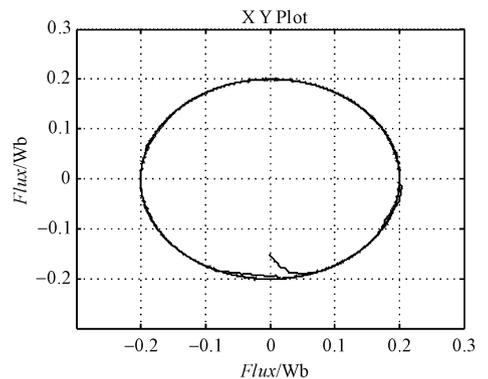
$1\text{e-}4\ \text{s}$ 。仿真算法采用固定步长算法ode3,步长设定为 $1\text{e-}6\ \text{s}$ 。针对以下工况进行仿真验证:在 $t=0\ \text{s}$ 时,电动汽车起步,给定启动速度为 $1000\ \text{r}/\text{min}$;完成加速后,在 $t=0.015\ \text{s}$ 时,给定目标速度为 $800\ \text{r}/\text{min}$,实现减速;完成减速后,在 $t=0.03\ \text{s}$ 时,负载转矩由 $0\ \text{N}\cdot\text{m}$ 突变到 $7\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。为验证所研究的直接转矩控制方法在减小磁链和转矩脉动方面的有效性,本研究同时也对传统的直接转矩控制方法也进行了仿真,所得仿真结果如图9、图10所示。



(a) 转速响应曲线



(b) 转矩波形



(c) 磁链轨迹

图10 基于SVPWM的直接转矩控制系统仿真波形

4.2 结果分析

永磁同步电机采用传统直接转矩控制方法仿真所

得到的转速、转矩、磁链仿真波形如图 9 所示。

本研究所设计的基于 SVPWM 的直接转矩控制方法的仿真得到的转速、转矩、磁链仿真波形如图 10 所示。

从图 9、图 10 中可以看出,转速很快加速到给定转速,用时不到 0.005 s,传统直接转矩控制系统的超调量为 3.5%,改进后的系统所得超调量为 2%,超调明显减小;该两种控制方法的定子磁链轨迹都为圆形轨迹;转矩响应快速,用时不到 0.001 s 就达到了定上限,在速度达到给定转速后,转矩马上恢复到 0 N·m 上,在 0.03 s 时加载负载转矩时,转矩响应又跟随上升到负载转矩上。两种方法均能够随给定工况进行工作。但是传统直接转矩控制系统由于转矩和磁链控制均采用滞环控制器进行调节,转矩和磁链脉动较为明显,在系统稳态时转矩波动范围为 ± 0.03 N·m,磁链脉动小于 0.002 Wb。

相比于传统直接转矩控制方法,本研究所采用的 SVPWM 的直接转矩控制方法在系统稳态时,转矩和磁链的脉动明显减小,转矩波动范围为 ± 0.01 N·m,磁链脉动小于 0.001 Wb。同时也使得逆变器的开关频率得到固定,证明了该方法的有效性。

5 结束语

本研究在分析电动汽车用永磁同步电机数学模型的基础上,提出了一种基于 SVPWM 的直接转矩控制系统。系统用 PI 控制器代替了传统直接转矩控制系统中磁链与转矩滞环比较器,用 SVPWM 技术取代了开关矢量表,在 Matlab/Simulink 下进行了建模和仿真研究。仿真结果表明,各个参量的变化波形都符合理论分析,能够为电动汽车实际驱动控制系统的开发设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] EHSANI M, GAO Yi-min, EMADI A. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车—基本原理、理论和设计[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:新华出版社,2004.
- [3] 温旭辉,刘 钧,赵 峰. 车用高性能永磁电机驱动系统的研发[J]. 汽车工程,2011,33(10):880-884.
- [4] ZHONG L, RAHMAN M F, HU Y W, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives[J]. *IEEE Trans Power Electron*, 1997, 12(3): 528-536.
- [5] CASADEI D, SERRA G, TANI A. Implementation of a direct torque control algorithm for induction motors based on discrete space vector modulation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993)*, 2000, 15(4): 769-777.
- [6] CHO Y, KIM D H. Torque Ripple Reduction and Fast Torque Response Strategy of Direct Torque Control for Permanent-magnet Synchronous Motor[C]// 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Taiwan: [s. n.], 2013:1-6.
- [7] 李耀华,马 建,刘晶郁,等. 电动汽车用永磁同步电机驱动系统控制策略比较研究[J]. 汽车工程,2013,35(5): 413-415
- [8] 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.
- [9] 孙 丹,贺益康. 基于恒定开关频率空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12):112-116.
- [10] 张 钊,陈 涛,周 勇. 永磁同步电机伺服控制系统建模与仿真[J]. 兵工自动化,2014,33(3):75-78.
- [11] 范心明. 基于 Smulink 的 SVPWM 仿真[J]. 电气传动自动化,2009,31(3):19-21.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

李 杰,韩峻峰,潘盛辉. 基于 SVPWM 的电动汽车直接转矩控制方法研究[J]. 机电工程,2014,31(7):898-902.

LI Jie, HAN Jun-feng, PAN Sheng-hui. Direct torque control system of electric vehicle based on SVPWM[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(7):898-902.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>