

文章编号: 1006-4710(2014)03-0346-05

改善直接转矩低速性能的 定子电压矢量预测 SVPWM 控制研究

李生民^{1,2}, 吴波^{1,2}, 余雷^{1,2}

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 鉴于传统直接转矩控制(DTC)系统低速时存在着转矩脉动大、逆变器开关频率不固定等缺点,提出了一种基于电压矢量预测的低速 SVPWM 直接转矩控制方法。该方法通过对定子磁链和转矩的估算得到两者的误差,然后根据 DTC 的基本原理推导出弥补转矩和磁链误差的参考电压矢量,最后利用 SVPWM 算法合成矢量。仿真结果表明该方法显著改善了直接转矩控制系统的性能,不仅有效地抑制了磁链和转矩脉动,还同时保证了开关频率恒定。

关键词: 直接转矩控制;参考电压矢量;空间矢量脉宽调制;开关频率

中图分类号: TM343 **文献标志码:** A

Study on forecast of reference voltage vector and space vector pulse width modulation to improve the performance of direct torque control system

LI Shengmin^{1,2}, WU Bo^{1,2}, YU Lei^{1,2}

(1. Faculty of Automation and Information Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Key Laboratory of

Shaanxi Province for Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problems of that torque ripple was large and the frequency of switching was inconstant in the conventional direct torque control(DTC), a kind of space vector modulation (SVM) predictive control method was presented. By the estimation of the stator flux and torque, the errors between them can be got and the derive reference voltage vector which can compensate these two errors will be inferred according to the basic principles of direct torque. Then use the space vector pulse width modulation (SVPWM) method to output the PWM waveform. The simulation results show that this method significantly improves the performance of direct torque control system and effectively inhibits the flux and the torque ripple. At the same time it makes the switching frequency constant.

Key words: direct torque control; reference voltage vector; space vector pulse width modulation; switching frequency

直接转矩控制(DTC)系统因其控制思想新颖,结构简单,转矩响应快以及鲁棒性强等优点,一经提出就得到了广泛的关注^[1]。传统的直接转矩控制根据磁链和转矩滞环比较器的逻辑输出和磁链位置,选取固定的6个电压矢量作用于定子绕组上,实现对转矩和磁链的直接控制^[2]。这种方法简单明确,但是该方法只考虑磁链和转矩误差的方向,忽略了误差的大小,经常造成磁链和转矩超出滞环容差范

围。此外逆变器的参考输出电压矢量数目较少,并且电压矢量的突变对磁链和转矩引起较大冲击,引起开关频率不稳定^[3]。

针对以上问题,许多学者提出了改进方法,文献[4]采用滑模控制理论,设计了一种新型的定子磁链观测器,提高了磁链的观测精度。文献[5]采用磁链扇区细分的方法,解决了当磁链在两扇区交界时磁链观测的不精确导致的磁链和转矩脉动。文献

收稿日期: 2013-11-08

作者简介: 李生民,男,副教授,研究方向为电能变换与电力传动技术。E-mail: lsm707@xaut.edu.cn.

[6] 通过逆变器的三相和两相混合连接,得到了 12 个电压矢量,文献[7]就传统 DTC 控制方法的电压矢量选择表的局限性,在详细研究当前算法的基础上,提出了一种改善转矩脉动的合成矢量开关表方法,这两种方法在一定程度上避免了在定子磁链幅值和磁通角变化相矛盾时电压矢量选取难的缺陷,降低了不合理的转矩脉动,由于电压矢量局限在 6 个数目内,因此无法精确补偿转矩误差及定子磁链。

文献[8]和[9]采用了两个 PI 调节器替代传统的滞环比较器,PI 调节器输出的参考电压经坐标变换后由 SVPWM 算法输出 PWM 波控制逆变器,该方法得到了恒定的开关频率,但需要经过冗长复杂的数学坐标变换,而且 PI 调节器参数调节过于复杂。

本研究提出了一种基于定子参考电压矢量预测的 SVPWM 直接转矩控制方法,在低速时,该方法能够准确的预测出可以精确补偿转矩误差和磁链的电压空间矢量,不仅抑制了磁链和转矩脉动,同时保证了开关频率恒定。仿真结果与传统直接转矩控制比较表明该方法对电机低速性能有明显地改善。

1 DTC 控制基本原理

DTC 控制系统的原理如图 1 所示,在两相静止坐标系上观测定子磁链和转矩,借助离散的滞环比较器选择合适的电压矢量,将磁链和转矩控制在一定的范围内。

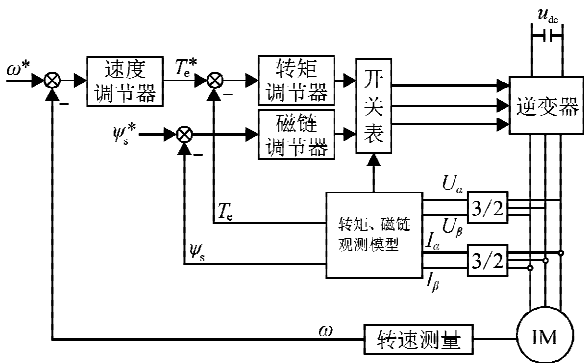


图 1 传统 DTC 原理图

Fig. 1 The theory diagram of traditional DTC

根据异步电机的数学模型可知磁链和转矩的公式为：

$$y_s = \int (u_s - i_s R_s) dt \quad (1)$$

$$T_e = \frac{l_m}{l_s l_r - l_m^2} n_p |\psi_s| |\psi_r| \sin(\psi_s, \psi_r) \quad (2)$$

式中, u_s 为定子电压, R_s 为定子电阻, l_s 、 l_r 、 l_m 分别为定子自感、转子自感以及两者之间的自感, n_p 为

电机的极对数, $|\psi_s|$ 为定子磁链幅值, $|\psi_r|$ 为转子磁链幅值, $\angle(\psi_s, \psi_r)$ 为磁通角。

从式(2)可以看出电磁转矩与定、转子磁链以及两者夹角的关系。为了充分利用电机,要求保持定子磁链幅值恒定,而转子磁链由负载决定,所以只能通过控制定子磁链的旋转方向来控制定子磁链间的夹角,进而控制电磁转矩。

若忽略定子电阻压降,则式(1)可以表示为：

$$\psi_s = \int u_s dt \quad (3)$$

式(3)表明定子磁链的运动方向与定子电压的运动方向保持平行,可以通过选择不同电压矢量来控制定子磁链的方向和幅值。传统的 DTC 控制就是靠选择固定的电压矢量来控制定子磁链的方向和幅值以达到对定子转矩和磁链的直接控制。

2 SVM-DTC 预测控制

2.1 SVM-DTC 预测控制的基本原理

SVM-DTC 预测控制方法采用参考电压预测模型和空间矢量调制算法代替了滞环比较器和电压矢量开关表。通过在两相静止坐标下观测出的电机定子磁链和电磁转矩与期望值比较得到两者的误差,然后根据 DTC 的基本原理推导出弥补转矩和磁链误差的参考电压矢量,最后利用 SVPWM 算法合成矢量。与传统直接转矩有限的电压矢量相比而言,能够有效地补偿定子磁链和转矩误差,同时保持开关频率恒定。其系统框图如图 2 所示。

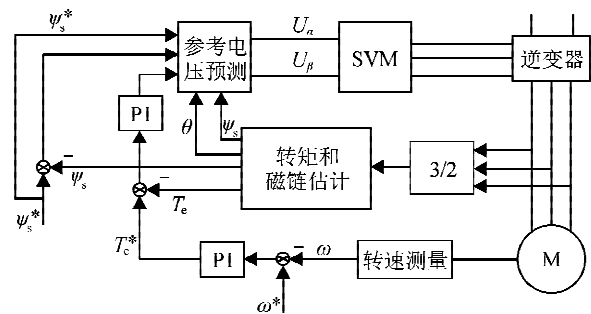


图 2 SVM-DTC 系统框图

Fig. 2 The block diagram of SVM-DTC

磁链、转矩在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系上的数学模型为：

$$\psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_s) dt \quad (4)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - i_{s\beta} R_s) dt \quad (5)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan \frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}} \quad (7)$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (8)$$

式中, $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ 为两相静止 α 、 β 轴的磁链分量。

2.2 定子参考电压预测模型

传统的 DTC 所选择的电压矢量比较局限, 将磁链和转矩控制在给定值的一定范围内, 电压矢量选择的依据是磁链、转矩误差的方向, 而不是误差的大小, 同时选取的电压矢量不可能同时满足对磁链和转矩的控制要求, 只能将其控制在一定的范围内, 如果能根据误差的大小与方向选取任意大小、方向的电压矢量补偿误差, 将大大降低磁链和转矩的脉动, 实现对两者的平滑控制。

图 3 是两个周期的磁链关系图, ψ_s 为当前周期的定子磁链矢量, 幅值为磁链模型的观测值, ψ_{sref} 为下一周期的定子磁链矢量, 其幅值为给定值。

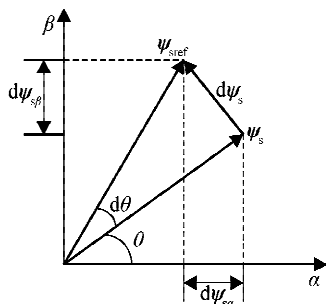


图 3 磁链矢量关系图

Fig. 3 The diagram of Flux linkage vector

根据图 3 可以得到:

$$\begin{cases} d\psi_{s\alpha} = |\psi_{sref}| \cos(\theta + d\theta) - |\psi_s| \cos(\theta) \\ d\psi_{s\beta} = |\psi_{sref}| \sin(\theta + d\theta) - |\psi_s| \sin(\theta) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $d\psi_{s\alpha}$ 、 $d\psi_{s\beta}$ 分别为定子磁链在两相静止 α - β 坐标上的增量。

如果时间间隔非常短, 对式(4)、(5)离散化后得:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = \frac{d\psi_{s\alpha}}{T_s} + R_s i_{s\alpha} \\ u_{s\beta} = \frac{d\psi_{s\beta}}{T_s} + R_s i_{s\beta} \end{cases} \quad (10)$$

将式(9)带入式(10)便可得到期望的参考电压 $u_{s\alpha}$ 和 $u_{s\beta}$ 。同时可以得到参考电压的幅值和相角, 即:

$$|u_s| = \sqrt{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2} \quad (11)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{u_{s\beta}}{u_{s\alpha}}\right) \quad (12)$$

2.3 空间矢量调制算法

根据式(9)~(12)得到可以补偿磁链与转矩误差的定子参考电压矢量, 然后用逆变器 8 个矢量来

合成, 电压合成原理如图 4 所示。参考合成电压矢量由所处扇区相邻的两个非零电压矢量以及零矢量作用而成^[11]。

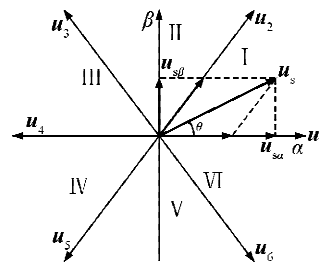


图 4 电压空间矢量图

Fig. 4 The block diagram of voltage space vector

由图 4 可得到:

$$\begin{cases} |u_{s\alpha}| T_s = |u_k| T_1 \cos\theta_1 + |u_{k+1}| T_2 \cos\theta_2 \\ |u_{s\beta}| T_s = |u_k| T_1 \sin\theta_1 + |u_{k+1}| T_2 \sin\theta_2 \\ T_s = T_1 + T_2 + T_0 \end{cases} \quad (13)$$

推导式(13)就可以得到各电压矢量的作用时间。式中, T_s 为采样周期, T_1 、 T_2 、 T_0 分别为相邻两个电压矢量以及零矢量的作用时间。

如果 $(T_1 + T_2) > T_s/2$, 为了防止饱和, 需要修正为:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} T_s \\ T_2 = \frac{T_2}{T_1 + T_2} T_s \\ T_0 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

通过控制固有电压矢量的作用时间, 可以合成任意的参考电压。先测出的电机的定子磁链和电磁转矩与期望值比较得到两者的误差, 然后计算出弥补转矩和磁链误差的参考电压矢量, 最后利用 SVPWM 算法合成矢量, 来实现对磁链、转矩准确、平滑地控制。由于每一个采样周期的磁链、转矩的误差都可以得到及时补偿, 从而降低了转矩和磁链的脉动。同时也由于是在一个采样周期内进行矢量合成, 而采样周期是固定的, 因此逆变器的开关频率也就随之恒定了。

3 仿真结果及分析

为了验证所提出的 SVM-DTC 预测控制方法对电机性能的改善, 本研究利用 MATLAB 搭建仿真电路, 将传统 DTC 与电压矢量预测的 SVM-DTC 控制进行波形比较。

电机参数: 功率 $P=22$ kW, 电压 $U=380$ V, 频率 50 Hz, 定子电阻 $R_s=0.435$ Ω , 定子电感 $L_s=2$ mH, 转子电阻 $R_r=0.816$ Ω , 转子电感 $L_r=2$ mH,

互感 $L_m=0.069$ H,极对数 $p=2$ 。仿真时给定定子磁链幅值为 1 Wb,给定转速 100 r/min,系统启动时

电机为空载,在 0.2 s 时突加负载 10 N·m。仿真结果如图 5~7 所示。

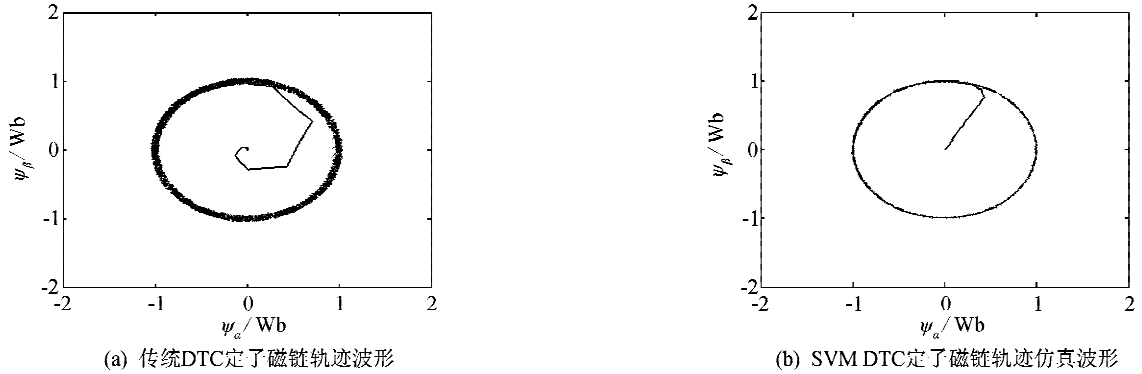


图 5 定子磁链轨迹仿真波形

Fig. 5 The simulation waveforms of stator flux track

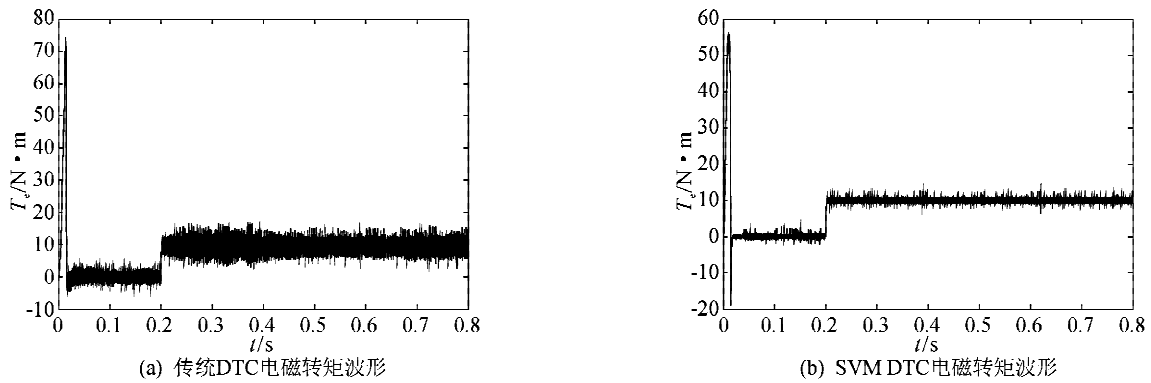


图 6 传统 DTC 和 SVM DTC 转矩波形

Fig. 6 The waveforms of torque of traditional DTC and SVM DTC

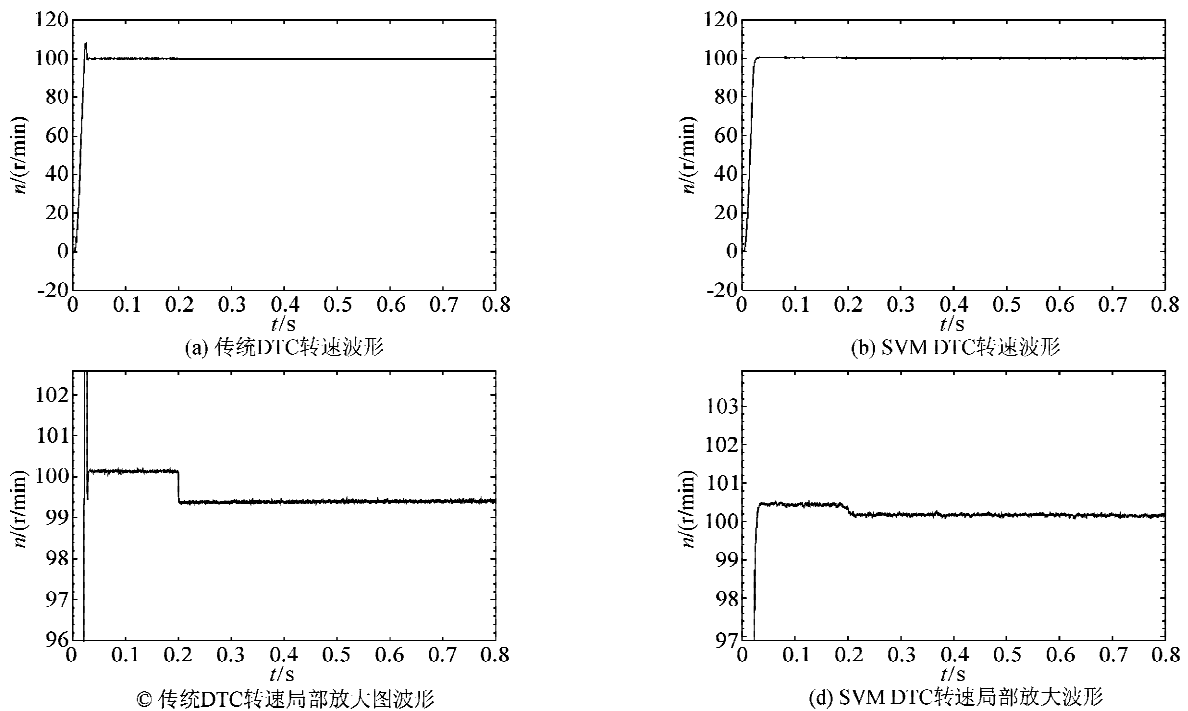


图 7 定子转速仿真波形

Fig. 7 The simulation waveforms of motor speed

比较图 5(a)、5(b)可以看出,改进算法的磁链脉动明显比传统 DTC 磁链脉动要小,轨迹也更加光滑。这主要是由于传统 DTC 控制中的磁链滞环比较器容许磁链在一定的容差范围内波动,并且只有当磁链超出容差范围逆变器才会动作,而 SVM-DTC 控制可以在一个采样周期内准确地补偿磁链误差。

比较图 6(a)、6(b)可看出,两种算法的转矩响应速度都很快,体现了直接转矩的优点。但是 SVM-DTC 算法的转矩脉动明显比传统 DTC 转矩脉动小。仿真结果表明,SVPWM 合成的由磁链和转矩误差得到的电压矢量比传统 DTC 有限的控制电压矢量相比能更有效地抑制转矩脉动。

图 7(a)、7(b)为转速波形,图 7(c)、7(d)为其放大图。从图 7(a)、7(b)可以看到,两种方法的响应速度都很快,当 0.2 s 突加负载转矩后,转速有一定的跌落,但都能够马上保持稳定,可是传统 DTC 算法的转速有超调,而改进算法解决了这一问题。从图 7(c)、7(d)可以看出,突加负载后,传统方法的转速变化更大,而 SVM-DTC 方法转速变化很小。

从图 5~图 7 可以看出 SVM-DTC 控制方法可以有效抑制因滞环比较器和电压矢量开关表而产生的磁链和转矩脉动,同时可以保证逆变器的开关频率恒定,改善了系统的性能。

4 结 论

1) 提出了一种基于电压矢量预测的低速 SVPWM 直接转矩控制方法;

2) 基于电压矢量预测的 SVPWM 直接转矩控制方法具有良好的动静态性能,有效地补偿定子磁链和转矩误差,并且抑制了磁链和转矩脉动,实现了对磁链和转矩的准确、平滑控制。

参考文献:

[1] Depenbrock M. Direct self-control(DSC) of inverter-fed induction machine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1988,3(4):420-429.

[2] 李文杰,李梅. 基于多空间矢量的直接转矩控制研究[J]. 电力电子技术,2010,44(10):78-80.

Li Wenjie, Li Mei. The study of space voltage vectors subdivision based on direct torque control[J]. Power Electronics,2010,44(10):78-80.

[3] 张兴华,孙振兴,沈捷. 计及逆变器电压输出限制的感应电机差拍直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(21):79-85.

Zhang Xinghua, Sun Zhenxing, Shen Jie. Deadbeat direct torque control for induction motor drives considering voltage limits of inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(21):79-85.

[4] 廖永衡,冯晓云,王珍. 基于定子磁链滑模观测器的异步电机空间矢量调制直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(18):88-97.

Liao Yongheng, Feng Xiaoyun, Wang Zhen. Induction motor direct torque control based on stator flux sliding mode observer and space vector pulse width modulation [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(18):88-97.

[5] 黄祯祥,郭延文,廖剑霞,等. 直接转矩控制系统磁链区间细分控制的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(1):61-65.

Huang Zhenxiang, Guo Yanwen, Liao Jianxia, et al. Application of flux section subdividing control in DTC [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008,20(1):61-65.

[6] 李耀华,郭巧娟,吴俊,等. 永磁同步电机直接转矩控制系统开关表分析[J]. 电气传动,2012,42(11):15-17.

Li Yaohua, Guo Qiaojuan, Wu Jun, et al. Analysis of the switching table of the PMSM DTC system[J]. Electric Drive, 2012, 42(11):15-17.

[7] 王建渊,钟彦儒,崇鑫,等. 合成矢量控制法改善直接转矩控制转矩脉动的研究[J]. 西安理工大学学报,2008,24(1):13-17.

Wang Jianyuan, Zhong Yanru, Chong Xin, et al. Research on synthesizing vector control method for improving the torque ripple of direct torque control(DTC)[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2008,24(1):13-17.

[8] Lai YenShin, Chen JianHo. A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant switching frequency and torque ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(3): 220-226.

[9] 张华强,王新生,魏鹏飞,等. 基于空间矢量调制的直接转矩控制算法研究[J]. 电机与控制学报,2012,16(11):13-18.

Zhang Huangqiang, Wang Xincheng, Wei Pengfei, et al. Study on direct torque control algorithm based on space vector modulation[J]. Electric Machines And Control, 2012, 16(11):13-18.

[10] Toufouti R, Meziane S, Benalla H. Direct torque control for induction motors based on discrete space vector modulation [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2007, 3(2): 453-466.

[11] Wang Huangang, Xu Wenli, Yang Geng, et al. Variable-structure torque control of induction motors using space vector modulation [J]. Electrical Engineering, 2005, 87(2): 93-102.

[12] 张爱玲,王震宇,杨文杰. 直接转矩控制系统中减小转矩脉动方案的比较[J]. 电机与控制学报,2008,12(5):566-570.

Zhang Ailing, Wang Zhenyu, Yang Wenjie. Comparison between two kinds of reducing torque ripple of based on direct torque control[J]. Electric Machines And Control, 2008,12(5): 566-570.

(责任编辑 李虹燕)