

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.014

永磁同步电机直接转矩控制系统的改进及仿真

周胜灵, 刘 峰

(西南大学 工程技术学院, 重庆 400715)

摘 要: 针对传统的永磁同步电机直接转矩控制中磁链、转矩脉动大, 开关频率不恒定等问题, 在永磁同步电机数学模型基础上, 进行深入分析, 提出了一种基于空间电压矢量调制、实现简单的控制方式。该方式结合直接转矩控制和矢量控制的优点, 只包含一个易于调节的速度 PI 调节器, 系统简单且参数容易调节。仿真结果证明, 引入空间矢量调制概念后, 在保持直接转矩控制优异动态响应特性不变的前提下, 可有效提高永磁同步电机直接转矩控制系统的稳态运行性能, 保证功率器件开关频率恒定。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; 空间矢量调制; 开关频率; 仿真

中图分类号: TP13

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)11-087-06

Improvement and simulation on direct torque control system of permanent magnet synchronous motor

ZHOU Shengling, LIU Feng

(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To solve the problems of large flux, torque ripple and inconstant inverter switching frequency in conventional direct torque control (DTC), a space vector modulation (SVM) technique is introduced to the conventional PMSM-DTC system and analyzed thoroughly based on the mathematical model. This novel control method which enjoys the advantages of VC and DTC has only one easy adjustable PI regulator and is easy to realize. The simulation verifies that this control system is capable of effectively improving the steady state performance and keeping the excellent dynamic performance of the PMSM-DTC system simultaneously and remain the switching frequency constant.

Key words: permanent magnet synchronous motor; direct torque control; space vector modulation; switching frequency; simulation

直接转矩控制(DTC)是继矢量控制技术之后的又一新型高效变频调速技术。在定子坐标系下, 应用定子磁链定向, 利用离散 Band-Band 进行调节, 产生逆变器脉宽调制信号, 对电机的磁链和转矩进行直接控制, 获得电机转矩的高动态性能, 近些年来这种控制方法已被广泛应用于永磁同步电机(PMSM)^[1]。传统 PMSM-DTC 采用转矩、磁链滞

环控制器和基于 60° 定子磁链位置信号, 按照设定规则从预先制定的开关表中选取相应的电压空间矢量对永磁同步电机转矩、磁链进行直接控制, 这种控制系统结构简单, 不需要复杂的坐标变换, 通过对磁链和转矩的直接跟踪, 实现脉宽调制和系统的高动态性能, 对电机参数不敏感, 系统鲁棒性强^[2]。但大量的分析和实践表明, 这种控制方法存在较大缺陷, 其

收稿日期: 2013-07-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(XDJK2011C068)

作者简介: 周胜灵(1981-), 女, 西南大学讲师, 主要从事控制理论和控制方法研究, (E-mail)swuzhou1@163.com。

中磁链、转矩脉动较大,逆变器开关频率不恒定已成为限制其在工业中广泛应用的最主要原因^[3-5]。针对这一问题,国内外学者进行了广泛的研究,文献[6]中将磁链细分法引入 PMSM-DTC,定子磁链平面被分成 12 个扇区,矢量选择更加细致;文献[7-9]将零电压矢量引入到转矩调节器中,并对零矢量的作用进行了详细的理论分析,指出在电机低速运行时,零电压矢量对转矩的影响很小,可以用来保持转矩,但当电机高速运行时,零电压矢量会起到减小转矩的作用;文献[10-11]分析了电压矢量对电磁转矩的作用,给出了不合理转矩脉动产生的根源,对空间电压矢量的选择条件做了细化,并由此改进开关表。这些方法都可在一定程度上改善系统的静态性能,但是由于可供选择的电压空间矢量被局限为只有 8 个,因此都无法在本质上完全消除磁链、转矩期望值与实际值之间的误差。2002 年 tang 等^[12]将空间矢量调制(SVM)技术引入到 PMSM-DTC 中,即在一个开关周期内,通过零矢量和相邻两个基本电压矢量合成所需的任意目标电压矢量,从而实现目标电压矢量的连续线性可调。从仿真和实验结果来看,这种方法在有效减少转矩脉动,改善直接转矩控制系统性能的基础上,同时保持逆变器开关频率恒定。但目前这类控制系统多采用两个 PI 调节器(一个用以调节磁链,另一个用来调节转矩)^[13-15],用于计算 SVM 所需要的目标电压矢量,在提高系统稳态性能的同时导致系统结构复杂,动态性能变差,参数调节更加困难。

笔者在对永磁同步电机数学模型进行深入分析的基础上,将一简单的 SVM 策略引入 PMSM-DTC 系统中,设计一个只包含单个速度 PI 调节的基于空间矢量调制的 PMSM-DTC 系统,文中阐述了系统的构成原理,详细介绍了各个模块的构成。最后,针对一款极隐式永磁同步电机建立仿真模型,给出仿真结果,并与传统 DTC 控制效果进行对比。对比结果表明,该方案能有效减小永磁同步电机磁链、转矩脉动,同时保证逆变器的开关频率恒定。即在不增加系统复杂性的条件下,保持系统优异的动态响应特性,有效提高系统的稳态性能。笔者所用电机参数为

$$\begin{aligned} \phi_{PM} &= 0.2 \text{ Wb}, L_d = L_q = 6.0 \text{ mH}, \\ R_s &= 0.975 \Omega, J = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2, p = 4. \end{aligned}$$

1 永磁同步电机的数学模型

永磁同步电机矢量图如图 1 所示,忽略磁滞损耗和电机涡流,假定转子无阻尼绕组,则永磁同步电机在 d - q 轴转子坐标系下的电压、磁链和电磁转矩方程^[16]为

$$\phi_d = L_d i_d + \phi_f, \quad (1)$$

$$\phi_q = L_q i_q, \quad (2)$$

$$u_d = \frac{d\phi_d}{dt} - \omega \phi_q + R_s i_d, \quad (3)$$

$$u_q = \frac{d\phi_q}{dt} - \omega \phi_d + R_s i_q, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_s \times i_s) \\ &= \frac{3p}{4L_d L_q} |\psi_s| [2\psi_f L_q \sin\delta - |\psi_s| (L_d - L_q) \sin 2\delta], \end{aligned} \quad (5)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m. \quad (6)$$

式中: ϕ_d 、 ϕ_q 为定子磁链 ψ_s 的 d 、 q 轴分量; L_d 、 L_q 为定子绕组 d 、 q 轴电感; ϕ_f 为永磁体磁链; u_d 、 u_q 为定子电压 U_s 的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 为定子电流 i_s 的 d 、 q 轴分量; R_s 为定子电阻; p 为电机转子极对数; T_e 为电机电磁转矩; δ 为定、转子磁链之间的夹角,称转矩角; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; B 为摩擦系数; ω_m 为电机转子角速度。针对笔者采用的表面式永磁同步电机,存在 $L_s = L_d = L_q$,转子永磁体产生的磁链 ϕ_f 为一恒定值 ϕ_{PM} ,则式(5)可简化为

$$T_e = \frac{3p}{2L_d} |\psi_s| \phi_{PM} \sin\delta. \quad (7)$$

式(7)说明,在恒定负载、稳态运行时,定子、转子磁链都以同步速旋转,此时 δ 为恒值;瞬态时, δ 则因定子、转子的旋转速度不同而不断改变。直接转矩控制即是在尽量保持定子磁链幅值 $|\psi_s|$ 恒定的前提下,通过改变转矩角 δ 来控制电机电磁转矩 T_e 。

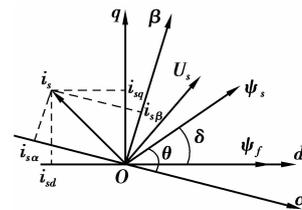


图 1 永磁同步电机在 d - q 坐标下矢量图

2 转矩角 δ 的简化计算

由式(7)不难看出转矩 T_e 与定子磁链的幅值 $|\psi_s|$ 及转矩角 δ 间存在密切的关系。针对笔者采用的永磁同步电机参数,在保持 $|\psi_s| = \phi_{PM}$ 的前提下,以电磁转矩 T_e 为自变量、转矩角 δ 为因变量画出关系曲线如图 2 中曲线 a 所示,观察曲线 a 发现在电机输出转矩 $[-16, 16]$ 范围内,转矩角 δ 与转矩 T_e 间近似呈线性关系。在转矩 $[-16, 16]$ 范围内,对曲线 a 进行线性拟合,得到近似直线 $b, \delta = k \times T_e + n$ 。对比曲线 a 和曲线 b 不难看出在电机允许的输

出转矩 T_e 变化范围内,曲线 a 、 b 近乎重合。曲线 b 将转矩角 δ 与转矩 T_e 近似为线性关系,不但可以清晰地指示出 δ 的实时变化,还可替代文献[13-15]中使用的转矩 PI 调节器,提高系统的动态特性,简化参数调节过程。

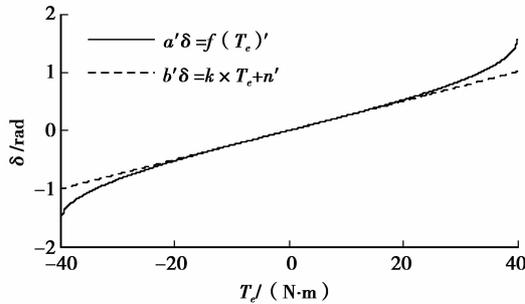


图 2 T_e - δ 关系曲线

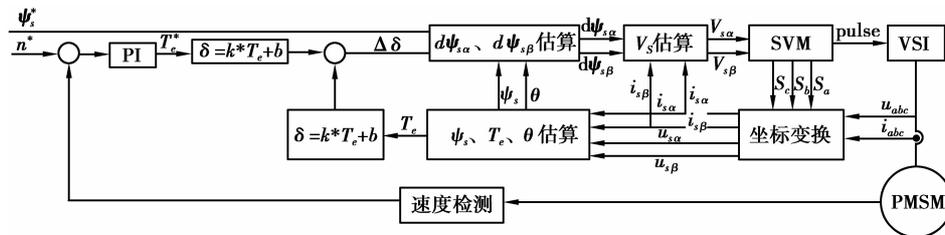


图 3 系统原理框图

PI 调节器输出的转矩参考值 T_e^* 与转矩估算值 T_e 之间存在误差 dT_e ,为了能够补偿误差 dT_e ,定子磁链相位角增加 $\Delta\delta$ 。由前面的分析可知针对笔者所用的永磁同步电机,在输出转矩 $[-16, 16]$ 范围内,可将转矩角 δ 与转矩 T_e 间的关系近似为线性 $\delta = k \times T_e + n$ 。由 $\Delta\delta$ 得到定子磁链目标磁链矢量 ψ_s^* 。将定子磁链估算值 ψ_s 与 ψ_s^* 进行对比,得到误差 $d\psi_s$ 。通过电压空间矢量 V_s 估算模块计算出补偿这一误差所需定子电压分量 $V_{s\alpha}$ 和 $V_{s\beta}$ 。系统采用一个 SVM 单元合成该目标电压空间矢量,将调制中由该单元产生的逆变器开关信号 pulse 送入电压源型逆变(VSD)单元,最终实现转矩、磁链的准确、平滑控制。

3.1 T_e 、 ψ_s 和 θ 的估算

在 PMSM 的直接转矩控制系统中,定子磁链矢量的幅值和角位置、转矩是在定子 α - β 坐标系下实现的,如图 1 所示,可由下列式子来观测。

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \int (u_\alpha - R_s i_{s\alpha}) dt, \\ \psi_{s\beta} = \int (u_\beta - R_s i_{s\beta}) dt, \end{cases} \quad (8)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2}, \quad (9)$$

3 基于 SVM 的 PMSM-DTC 系统

受逆变器结构的限制,其同一桥臂上提供的电压 V_{DC} 为恒值,因而基本空间电压矢量也比较固定,只能提供 6 个 ($V_1 \sim V_6$) 非零矢量和 2 个 (V_0, V_7) 零矢量。传统的直接转矩控制系统是经过多次滞环比较,通过增加逆变器开关频率来无限趋进。这种控制方法一方面使电机在运行中产生较大转矩和磁链脉动,另一方面则导致逆变器开关频率不恒定。为解决这一问题,本系统在不增加 PI 回路的前提下,引入空间电压矢量调制概念,即在不改变基本电压矢量, $V_1 \sim V_6$ 非零矢量和 V_0, V_7 零矢量的情况下,改变每个采样周期中各电压矢量的作用时间,从而合成理想的电压矢量 V_s 完成对目标磁链矢量 ψ_s^* 的调制。系统结构框图如图 3 所示。

$$\theta = \arctan(\psi_{s\beta} / \psi_{s\alpha}), \quad (10)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}). \quad (11)$$

其中下标 α, β 为各量在定子 α - β 坐标系 α, β 轴上的分量, θ 为定子磁链的相位角。

3.2 ψ_s 误差估算及目标电压矢量 V_s 估计

定子磁链的参考矢量 ψ_s^* 与定子磁链的当前观测值 ψ_s 之间存在的矢量误差 $d\psi_s$,如图 4 所示。

$$\begin{cases} d\psi_{s\alpha} = \psi_{s\beta} \cos(\theta + d\delta) - \psi_s \cos\theta, \\ d\psi_{s\beta} = \psi_{s\alpha} \cos(\theta + d\delta) - \psi_s \sin\theta, \end{cases} \quad (12)$$

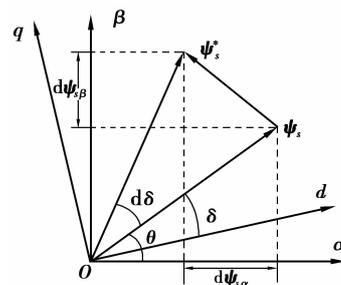


图 4 磁链矢量关系图

将定子磁链的误差矢量 $d\psi_s$ 送入 V_s 估算单元

计算出为消除转矩、磁链误差所需的目标电压矢量 \mathbf{V}_s , \mathbf{V}_s 的幅值和相位角 ϕ , 计算方法如下:

$$\begin{cases} V_{\alpha} = d\psi_{\alpha}/T_s + R_s i_{\alpha} \\ V_{\beta} = d\psi_{\beta}/T_s + R_s i_{\beta} \end{cases}, \quad (13)$$

$$|\mathbf{V}_s| = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2}, \quad (14)$$

$$\phi = \arctan(V_{\beta}/V_{\alpha}). \quad (15)$$

3.3 SVM 单元组成

采用 SVM 的目标是利用逆变器固有的基本空间矢量合成所需的目标电压空间矢量。电压源型逆变器(VSI)有 8 个基本空间电压矢量, 合成目标电压矢量 \mathbf{V}_s , 即

$$\begin{cases} \mathbf{V}_n T_n + \mathbf{V}_{n+1} T_{n+1} + \mathbf{V}_0 T_0 = \mathbf{V}_s T_s, \\ T_n + T_{n+1} + T_0 = T_s. \end{cases} \quad (16)$$

其中, T_s 为系统采样周期, 即 VSI 逆变器开关周期; T_0, T_n, T_{n+1} 分别为在一个采样周期中基本空间电压矢量 $\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_n, \mathbf{V}_{n+1}$ 的作用时间。

在仿真模型中, SVM 单元包括矢量扇区判断模块 S1、基本矢量作用时间计算模块 S2、三相功率器件导通时刻计算模块 S3 以及触发脉冲生成模块 S4, 其仿真模型如图 5 所示。首先根据 ϕ 值判断出目标电压矢量 \mathbf{V}_s 所在的扇区, 判定合成该目标矢量所需的 2 个非零基本矢量和零矢量; 其次计算出零电压矢量和 2 个基本电压矢量各自作用时间; 通过与对称三角波比较输出三相 PWM 控制信号 pulse 及开关状态信号 Sa、Sb、Sc。

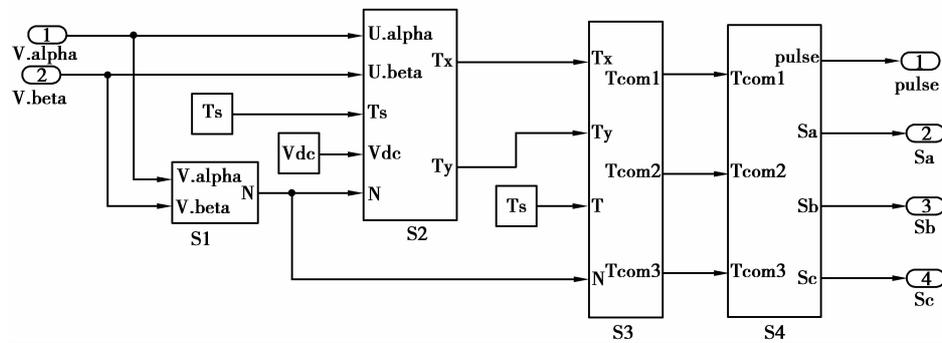


图 5 空间矢量调制 SVM 模型

4 系统仿真及结果分析

基于上述分析, 在 Matlab/simulink 环境下建立仿真模型如图 6 所示。该模型结构与图 2 系统原理框图基本一致, 整体模型由以下单元组成: 逆变电路与 PMSM 复合模块 U1、坐标变换模块 U2、 T_e, ψ_s 和 θ 估算模块 U3、 ψ_s 误差估算模块 U4、目标电压矢量 \mathbf{V}_s 估算模块 U5、SVM 模块 U6、PI 速度控制模块以及 $T_e - \delta$ 线性模块。为验证笔者理论分析和系

统建模的正确性, 针对笔者所采用永磁同步电机在 Simulink 环境下对模型进行仿真, 同时给出了常规 DTC 的仿真结果以进行比较。仿真条件设置如下: 功率器件开关周期 $T_s = 2 \text{ ms}$, 在 PI 控制环节设置限幅值 $\pm 16 \text{ N} \cdot \text{m}$, 摩擦系数 B 为零, 直流母线电压 $V_{DC} = 310 \text{ V}$, 定子磁链 $\psi_s^* = \psi_{PM} = 0.2 \text{ Wb}$ 。电机空载以额定转矩启动, 从零转速加速到额定转速 1000 r/min ; 稳态运行过程中 $T = 0.1 \text{ s}$ 时突加负载至 $4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

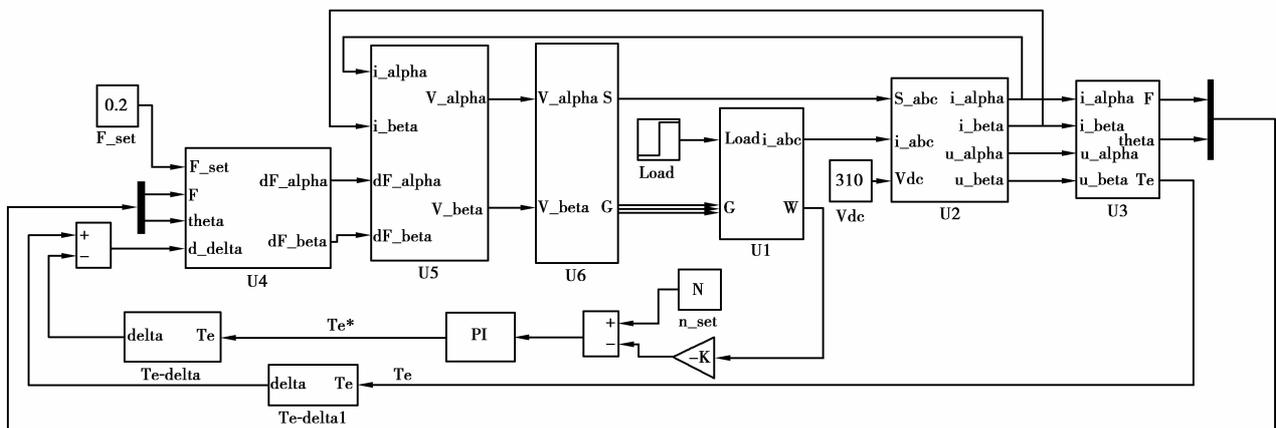
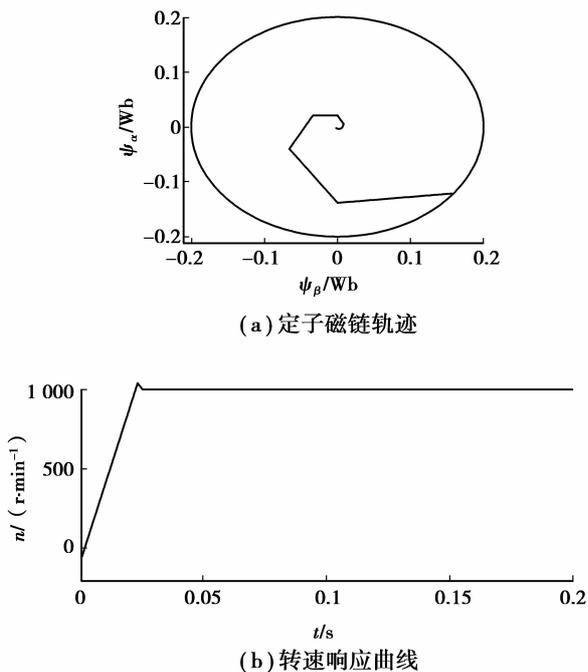


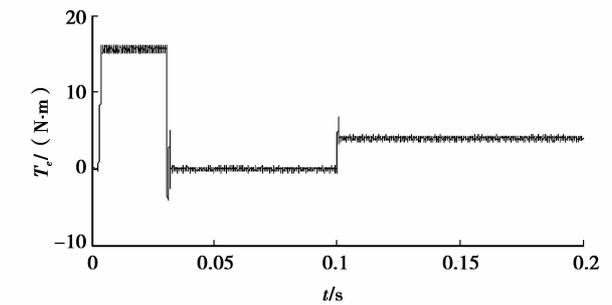
图 6 基于 SVM 的 PMSM-DTC 系统模型

系统仿真结果如图 7、图 8 所示,图 7(a)~(c)和图 8(a)~(c)分别对比了 SVM-DTC 与传统 DTC 两种控制系统的仿真结果。从图中可以看出,系统空载启动时,从零转速加速到额定转速 1 000 r/min,大约需要 30 ms,与常规直接转矩控制的启动时间相差不大,上升时间都非常短,超调量非常小仅 0.1%左右,这正是直接转矩控制系统的突出优点。从转矩和磁链的响应波形来看,两种系统的动态响应都非常快,进入稳态运行以后相对于常规直接转矩控制,基于 SVM 的 PWM-DTC 系统的转矩和磁链波动更小。稳态运行过程中突加负载,两种系统的转矩响应都很快,约为 1.0 ms,负载变化时转速波动很小,说明系统抗干扰能力较强。产生上述结果的根本原因在于:常规的 PMSM-DTC 只能选择 8 个基本空间电压矢量,通过转矩、磁链滞环来控制定子磁链的运动,而将 SVM 引入 PMSM-DTC 系统后,使得逆变器能够输出线性连续的空间电压矢量,消除由于常规 PMSM-DTC 在各个区域交界处对转矩的控制效果减弱而导致的转矩、磁链出现周期性波动,同时减小稳态运行时转矩、磁链的脉动;其次笔者采用一种简化的基于电压空间矢量调制的直接转矩控制,整个系统只采用一个易于调节的速度 PI 调节器,故可在保持常规直接转矩控制快速的动态响应的前提下,有效提高系统的稳态运行性能。



(c) 转矩响应曲线

图 7 系统仿真结果 1



(a) 定子磁链轨迹

(b) 转速响应曲线

(c) 转矩响应曲线

图 8 系统仿真结果 2

5 结 语

在对永磁同步电机数学模型深入分析的基础上,提出一种简化的基于 SVM 的 PMSM-DTC 系统,即采用电压矢量调制获得空间电压矢量的优化组合,实现转矩和磁链误差的精确补偿,整个系统只采用了一个 PI 调节器,系统结构简单,参数容易调节,且保证逆变器开关频率恒定。仿真结果表明,这

种控制系统在保持优异动态响应特性不变的条件下,有效提高 PMSM-DTC 系统的稳态运行性能,在保证逆变器开关频率恒定的基础上,达到高性能的直接转矩控制效果。

参考文献:

- [1] FOO G H B, RAHMAN M F. Direct torque control of an IPM-synchronous motor drive at very low speed using a sliding-mode stator flux observer[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25 (4): 933-942.
- [2] 李兵强, 林辉. 新型面装式永磁同步电机高性能控制技术[J]. *电机与控制学报*, 2010, 14(2): 1-6.
LI Bingqiang, LIN Hui. A novel high performance control method for surface-mounted permanent magnet synchronous motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2010, 14(2): 1-6.
- [3] ZHANG Y C, ZHU J G. A novel duty cycle control strategy to reduce both torque and flux ripples for DTC of permanent magnet synchronous motor drives with switching frequency reduction [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(10): 3055-3067.
- [4] 王明渝, 邓威, 陈杨裕, 等. 快速虚拟矢量调制的三电平直接转矩预测控制[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33 (9): 41-46.
WANG Mingyu, DENG Wei, CHEN Yangyu, et al. Three-level direct torque predictive control based on fast virtual vector modulation [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33 (9): 41-46.
- [5] 李耀华, 刘卫国. 永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动[J]. *电机与控制学报*, 2007, 11(2): 148-152.
LI Yaohua, LIU Weigu. Unreasonable torque ripple of direct torque control in permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2007, 11(2): 148-152.
- [6] LIU G H, ZHANG Y N, CHEN Z L, et al. PMSM DTC predictive control system using SVPWM based on the subdivision of space voltage vectors [C]// *Proceedings of the 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, May 17-20, 2009, Wuhan, China. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1818-1821.
- [7] LI Y H, GERLING D, LIU W G. A novel switching table using zero voltage vectors for direct torque control in permanent magnet synchronous motor [C]// *Proceedings of the 18th International Conference on Electrical Machines*, Sept 6-9, 2008, Vilamoura, Portugal. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [8] 王莹, 胡育文, 杨建飞. 零矢量在永磁同步电机直接转矩控制中的作用及其仿真研究[J]. *微电机*, 2011, 44(5): 48-51.
WANG Ying, HU Yuwen, YANG Jianfei. Simulation and study on zero voltage vector in permanent magnet synchronous motor based on direct torque control[J]. *Micromotors*, 2011, 44(5): 48-51.
- [9] Haghbin S, Carlson O. Performance of a direct torque controlled IPM drive system in the low speed region [C]// *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, July 4-7, 2010, Bari, France. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1420-1425.
- [10] 李耀华, 刘卫国. 永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动抑制研究[J]. *西北工业大学学报*, 2007, 25(5): 667-671.
LI Yaohua, LIU Weigu. A method for suppressing unreasonable torque ripple in direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, 25(5): 667-671.
- [11] FOO G, RAHMAN M F. Direct torque and flux control of an IPM synchronous motor drive using a backstepping approach [J]. *Electric Power Applications*, 2009, 3(5): 413-421.
- [12] TANG L, ZHONG L, RAHMAN M F. A novel direct torque control scheme for interior permanent magnet synchronous machine drive system with low ripple in torque and flux, and fixed switching frequency [C]// *Proceedings of 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2002, USA. Piscataway: IEEE Press, 2002(2): 529-534.
- [13] 徐艳平, 钟彦儒. 基于空间矢量 PWM 的新型直接转矩控制系统仿真[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(2): 344-348.
XU Yanping, ZHONG Yanru. Simulation of novel DTC system based on space vector PWM [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(2): 344-348.
- [14] Foo G, Rahman M F. A novel speed sensorless direct torque and flux controlled interior permanent magnet synchronous motor drive [C]. *Power Electronics Specialists Conference*, 2008: 50-56.
- [15] 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]. *电机与控制学报*, 2005, 25(12): 112-116.
SUN Dan, HE Yikang. Space vector modulated based constant switching frequency direct torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(12): 112-116.
- [16] 王斌, 王跃, 王兆安. 空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. *电机与控制学报*, 2010, 14(6): 45-50.
WANG Bin, WANG Yue, WANG Zhaoan. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor drives using space vector modulation [J]. *Electric Machines and Control*, 2010, 14(6): 45-50.