

改进的参考电压矢量获取方法*

吴 扬, 赵龙章, 龚媛雯, 墨 蒙

(南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

摘 要: 针对基于空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制方法中,参考电压矢量获取涉及电机参数,而电机参数的变化又导致预测结果不可靠的问题,提出了一种不依赖电机参数的参考电压矢量获取方法。通过对转矩误差以及定子磁链幅值误差进行 PI 控制,对其输出量分别分配一定的权重,用其绝对值的加权,作为参考电压矢量幅值的控制量,用其比值作为确定参考电压矢量相对于定子磁链矢量角度偏差的依据。仿真结果表明,该方法能很好克服电机参数变化造成的影响,从而试验验证了该方法的有效性。

关键词: 参考电压矢量; 空间矢量调制; 直接转矩控制; 永磁同步电机

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)02-0086-04

Improved Method of Reference Voltage Vector Acquisition*

WU Yang, ZHAO Longzhang, GONG Aiwu, MO Meng

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing TECH University, Nanjing 211816, China)

Abstract: A new method of reference voltage vector acquisition that did not rely on motor's parameter was proposed for the problem which the change of motor's parameter could made the accuracy of reference voltage vector acquisition unreliable in the PMSM's SVM-DTC method. The PI controllers were used for the error of torque and amplitude of stator linkage, and their output was separately allotted a weight. The weighted sum of their absolute value was used for the control of amplitude of reference voltage vector, and their ratio would be the gist that could compute the angle between reference voltage vector and stator linkage vector. The result of simulation showed that the performance of this method was favourable and the influence making by the change of motor's parameters could be well overcome. The simulation verifies that the method was effective.

Key words: reference voltage vector; space vector modulation (SVM); direct torque control (DTC); permanent magnet synchronous motor (PMSM)

0 引 言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 因其自身的众多优点得到了广泛的关注,特别是我国的永磁材料储量巨大,使得 PMSM 的控制方法迅速发展。

PMSM 传统直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC) 方法中,采用 6 扇区划分的方法,使用 6 个基本的电压矢量控制电磁转矩和定子磁链,转矩脉动很大,并且逆变器的开关频率也不恒

定,使系统性能较差^[1-4]。文献[5-9]在 DTC 的方法中采用空间电压矢量调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 合成最合适的电压矢量,从而减小转矩脉动,固定逆变器开关频率。文献[10]利用定子电压在定子磁链定向坐标轴上的分量来对电动机的磁链和转矩进行控制,再结合 SVPWM 的方法控制逆变器运行。文献[11]利用磁链和转矩的无差拍控制方法结合空间矢量调制 (Space Vector Modulation, SVM) 加快了 SVM-DTC 的动态响应速度。文献[12]通过

* 基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(12KJB470007)

作者简介: 吴 扬(1994—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制技术。

赵龙章(1961—),男,博士,教授,研究方向为电力系统控制技术。

建立磁链、转矩双闭环 PI 控制,直接使用磁链和转矩作为控制量,结合 SVM 提高系统性能。文献[13]利用转矩和磁链的滑模控制器代替 DTC 中的滞环开关策略,结合 SVM 提出了一种基于滑模和 SVM 的 DTC 方法。

在 PMSM 的 DTC 方法中引入 SVM,能够有效解决传统 DTC 中存在的转矩脉动和功率器件开关频率问题,但 SVPWM 是通过控制电压矢量的方式来进行的。在 DTC 系统中,对参考电压矢量的获取往往需要依赖电机的模型参数,而这些参数的变化会导致系统性能不稳定,因此,本文提出了一种不依赖电机参数的参考电压矢量获取的方法。对于参考电压矢量的获取不再依赖于电机模型,增强了系统的鲁棒性,同时也减小了系统的计算量。为了对方法的有效性进行验证,分别对传统的参考电压矢量获取方法和本文提出的参考电压矢量获取方法进行了仿真对比。仿真结果证实了方法的有效性。

1 PMSM 的 SVM-DTC 方法

在 PMSM 的 DTC 中引入 SVM 技术合成任意需要的电压矢量,通过预测下个控制周期最优的参考电压矢量,然后把预测的参考电压矢量交给 SVM 模块来实施,这就是 PMSM 的 SVM-DTC 基本原理。由于每次实施的电压矢量都能够刚好补偿转矩和定子磁链幅值误差的量,因此系统的静态性能都很出色。

1.1 PMSM 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模型

PMSM 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int (u_\alpha - Ri_\alpha) dt \\ \psi_\beta = \int (u_\beta - Ri_\beta) dt \\ \psi_s = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \end{cases} \quad (2)$$

转矩方程为

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

式中: u_α, u_β ——定子电压在 $\alpha\beta$ 轴上的分量;

i_α, i_β ——定子电流在 $\alpha\beta$ 轴上的分量;

ψ_s ——定子磁链;

ψ_α, ψ_β ——定子磁链在 α, β 轴上的分量;

T_e ——电磁转矩;

R ——定子电阻;

p ——极对数。

1.2 参考电压矢量的预测

在 SVM-DTC 中,参考电压矢量的获取是一项非常重要的工作,也是 SVM-DTC 的核心。准确地预测参考电压矢量能够很大程度上抑制转矩脉动,令转矩响应更平滑,可以与矢量控制对转矩的控制相媲美。传统的参考电压矢量预测方法是通过对电磁转矩的命令值与实际值之间的误差进行 PI 调节,来获得转矩角相对于当前位置的目标变化量来预测参考电压矢量。

根据转矩角的目标变化量 $\Delta\delta$ 和定子磁链的当前位置 θ_s 可以得知定子磁链的目标位置,再根据定子磁链的目标幅值 $|\psi_s|^*$ 即可计算出目标定子磁链矢量的 α, β 轴分量:

$$\begin{cases} \psi_\alpha^* = |\psi_s^*| \cos(\theta_s + \Delta\delta) \\ \psi_\beta^* = |\psi_s^*| \sin(\theta_s + \Delta\delta) \end{cases} \quad (4)$$

因此,目标定子磁链与当前定子磁链的偏差在 α, β 轴的分量为

$$\begin{cases} \Delta\psi_\alpha = \psi_\alpha^* - \psi_\alpha \\ \Delta\psi_\beta = \psi_\beta^* - \psi_\beta \end{cases} \quad (5)$$

再根据式(6)就可预测到目标电压矢量:

$$\begin{cases} u_\alpha^* = Ri_\alpha + \frac{\Delta\psi_\alpha}{T} \\ u_\beta^* = Ri_\beta + \frac{\Delta\psi_\beta}{T} \end{cases} \quad (6)$$

1.3 SVM

PMSM 的控制系统采用三桥臂的逆变器,共有 8 种开关组合,构成了 8 个基础的空间电压矢量。空间矢量调制利用 8 个空间电压矢量在时间上的组合,再利用矢量合成的原理来构成任意的空间电压矢量。

SVM 算法中包含 3 个步骤:

(1) 根据输入的参考电压矢量的 α, β 轴分量 u_α, u_β 来判断目标电压矢量所在扇区。

(2) 根据参考电压矢量的 α, β 轴分量 u_α, u_β , 结合所在的扇区,利用三角形公式即可求出在此扇区中相邻的两个基本电压矢量的作用时间 T_1

和 T_2 , 再根据控制周期 T , 算出零矢量的作用时间 T_0 。若 T_1 和 T_2 之和大于周期 T , 则对其进行限幅操作。

(3) 将算得的空间矢量作用时间进行七段式分段, 目的是尽可能使功率开关管的开关次数最少, 并且一次空间电压矢量的作用只对应一个桥臂开关动作。每次调制都从上 3 个桥臂关断开始, 再到上 3 个桥臂关断时结束, 桥臂的七段变化中每次只有一个桥臂发生变化。计算出七段变化的变化节点的时间, 通过与一个周期和采样周期相同的三角波信号比较来控制对应桥臂的导通与关断。如此, 功率管就会根据输入的参考电压矢量按照一定的开关顺序, 有序地开通关断, 输出合成的电压矢量。每个 SVM 过程中, 每个桥臂都导通和关断一次, 使得功率管的开关频率与控制周期一致。

1.4 PMSM 的 SVM-DTC 系统

系统中通过转速环调节器可以得到转矩的控制量, 再由转矩调节器得到转矩角的变化量, 最后结合定子磁链幅值的给定和当前定子磁链位置预测参考电压矢量。获得目标电压矢量之后, 通过 SVPWM 方法, 产生功率管开关顺序, 控制功率管导通, 以此来控制电机按照给定运转, 如图 1 所示。

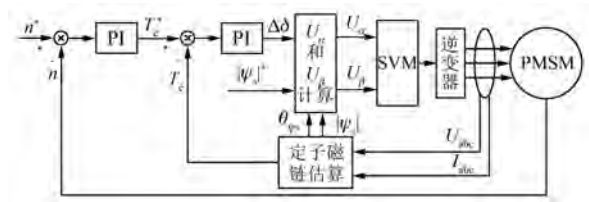


图1 PMSM SVM-DTC 系统图

2 改进的参考电压矢量预测方法

在PMSM的SVM-DTC方法中, 传统的参考电压矢量的预测方法需要结合PMSM在两相静止坐标系下的数学模型来进行, 而PMSM的电阻参数在运行过程中并不是恒定的, 随着电机本身温度的变化, 会产生一定的改变, 而这足以影响参考电压矢量预测的准确性, 从而导致控制系统不能按照预定的理论设计来执行, 使系统性能变差。在系统中加入对电机参数的观测器, 在线辨识电机的参数, 可以有效地改善参数变化带来的性能

恶化问题, 但参数的辨识算法往往比较复杂, 增加了系统的负担。

预测参考电压矢量的目的是为了得到合适的电压输入来有效地控制电磁转矩和定子磁链幅值, 尽可能减小转矩误差和定子磁链幅值误差, 即参考电压矢量的作用就是让转矩和定子磁链幅值更好地跟随指令值。从分析参考电压矢量的构成可知, 参考电压矢量除了可以分解为在两相静止坐标系上的坐标外, 还可以由参考电压矢量的幅值 $|u^*|$ 和相对于定子磁链矢量的位置 θ_{us} (逆时针方向为正) 构成。 $|u^*|$ 决定了目标电压矢量的总控制量, θ_{us} 决定了目标电压矢量对转矩和定子磁链幅值控制的比重。所以, 通过对转矩误差与定子磁链幅值误差分别进行PI调节, 对于各自调节器的输出量按照一定的权值分配其对目标电压矢量的影响, 并最终根据两个调节器输出的加权, 控制参考电压矢量的幅值。两个调节器输出量分别对应转矩与定子磁链幅值的偏差大小, 因此, 他们之间的比值对应的反正切值可以用来计算参考电压矢量相对于定子磁链矢量的角度。

定义两个变量 a 和 b , 分别代表转矩环和磁链环的PI调节器的输出, 对其结果限幅在 $[-1, 1]$ 。当某一个误差比较大时, 对应的变量 a 或 b 也比较大, 其调节的作用也比较强。

$$\begin{cases} a = \text{PI}(T_e^* - T_e), & -1 \leq a \leq 1 \\ b = \text{PI}(|\psi_s|^* - |\psi_s|), & -1 \leq b \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

定义 a 和 b 分别对参考电压矢量影响的比重 k 和 $1-k$ ($0 < k < 1$), 定义 m 为其加权和。 k 值的大小影响了 a 和 b 的值对生成参考电压矢量的参与度; 同时, 还影响了参考电压矢量对转矩和磁链分别的控制效果。通过合理调节 k 值可以使得预测的参考电压矢量更好地补偿转矩误差和定子磁链幅值误差。

$$m = ka + (1 - k)b \quad (8)$$

式(9)用来计算参考电压矢量的幅值, 其中 U_{dc} 为逆变器直流母线的电压。

$$|u^*| = \frac{m\sqrt{3}}{3} U_{dc} \quad (9)$$

定义参考电压矢量位置相对于定子磁链矢量的夹角为 θ_{us} (逆时针为正方向)。 θ_{us} 可以根据式(10)计算得出。

$$\theta_{us} = \begin{cases} \arctan \frac{ka}{(1-k)b}, & b > 0 \\ \pi + \arctan \frac{ka}{(1-k)b}, & b < 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据式(11),可以得到参考电压矢量实际的位置 θ_u 。根据式(12)的 θ_u ,可以判断参考电压矢量所在的扇区 N 。

$$\theta_u = \theta_s + \theta_{us} \quad (11)$$

$$\begin{cases} N = \theta_u / 60 \\ \sigma = \theta_u \% 60 \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ ——参考电压矢量在扇区 N 中的角度。

根据以上各公式可以简便地算出合成参考电压矢量所需要的相邻两个基础电压矢量的作用时间 T_1 和 T_2 以及零矢量的作用时间 T_0 :

$$\begin{cases} T_1 = mT \sin(60 - \sigma) \\ T_2 = mT \sin(\sigma) \\ T_0 = T - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (13)$$

将参考电压矢量所在扇区 N ,两个相邻基础电压矢量的作用时间 T_1 和 T_2 及零矢量作用时间 T_0 通过空间矢量调制的方法来控制逆变器开关方式。图2为改进的SVM-DTC方法系统框图。

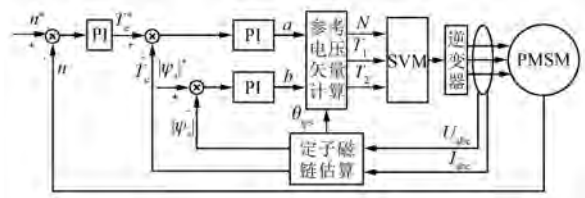


图2 改进的SVM-DTC方法系统框图

3 仿真研究

通过在MATLAB/Simulink中搭建系统模型,对比使用传统参考电压矢量预测方法与使用改进的参考电压矢量预测方法的仿真结果,以便研究本文提出方法的有效性。PMSM的永磁磁链0.175 Wb、定子电感8.5 mH、定子电阻2.88 Ω、极对数2、定子磁链幅值给定设置为0.175 Wb。

3.1 参数不变时的性能对比

将电机参数保持为设计参数,设定电机转速为1 000 r/min,在0.05 s时加3 N·m负载。观察两个系统的转矩响应。

图3为传统方法转矩响应,转矩能够跟随给定,但是有一定的偏差;图4为改进方法的转矩响

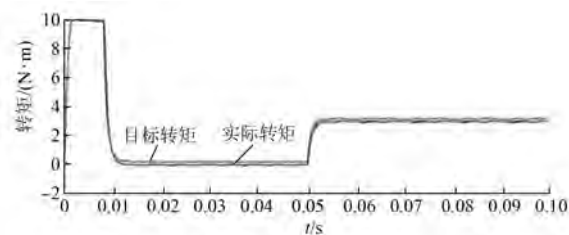


图3 参数不变时传统SVM-DTC方法转矩响应

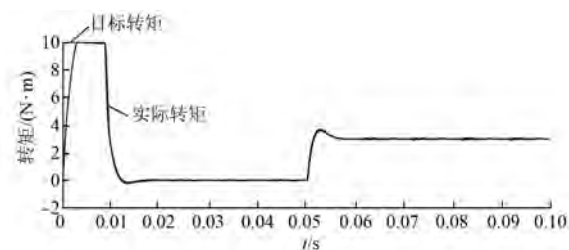


图4 参数不变时改进SVM-DTC方法转矩响应

应,可以看出转矩能够完全跟随目标值,性能很好。

3.2 参数变化时的性能对比

调节PMSM的电阻,使其与传统的SVM-DTC方法中设定值不一致。再次观测两个系统的转矩响应。

图5为改变电阻参数后传统SVM-DTC方法的转矩响应曲线,可以看出在跟随目标转矩时,产生了明显的脉动,由此可见参数的变化影响了系统的性能。图6为改进方法的转矩响应曲线。由于该方法的运算中不涉及电机参数,因此系统转

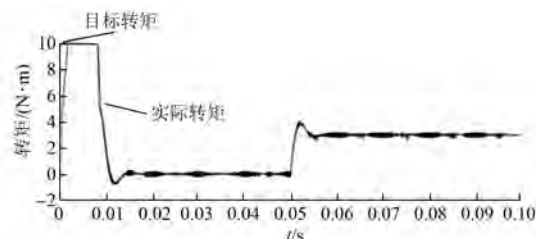


图5 参数改变时传统SVM-DTC方法转矩响应

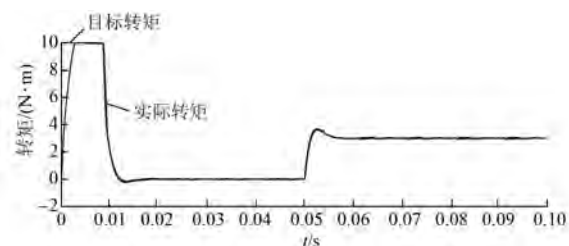


图6 参数改变时改进SVM-DTC方法转矩响应

(下转第96页)

- [10] 张松,张立春.永磁推进电机损耗及冷却效能分析[J].电机与控制应用,2013,40(12): 1-4.
- [11] 汪远林,窦满峰.高功率密度永磁同步电动机散热设计及热场分析[J].微特电机,2013,41(5): 23-31.
- [12] 胡萌,李海奇,李旭光,等.电动车用水套冷却永磁电机损耗及温度[J].电机与控制应用,2014,41(1): 27-32.
- [13] 丁杰,张平.永磁同步电机的冷却结构优化设计及温度场仿真[J].微特电机,2016,44(6): 31-34.
- [14] CHUDI P, MALMQUIST A. Development of a small gas turbine-driven high-speed permanent magnet generator [M]. Stockholm: The Royal Institute of Technology, KTH, 1989.
- [15] 丁树业,王海涛,郭保成,等.50 kW 永磁同步电机内流体流动特性数值研究[J].电机与控制学报,2014,18(9): 30-36.
- [16] 曹君慈,李伟力,程树康,等.复合笼条转子感应电动机温度场计算及相关性分析[J].中国电机工程学报,2008,28(30): 96-103.
- [17] 张晓晨,李伟力,邱洪波,等.超高速永磁同步发电机的多复合结构电磁场及温度场计算[J].中国电机工程学报,2011,31(30): 85-92.
- [18] 王天煜,温福强,马振杰.高速永磁电机转子蒸发冷却系统数值模拟[J].大电机技术,2017(3): 1-6.
- [19] 王秀和,杨玉波,朱长青.异步起动永磁同步电动机——理论、设计与测试[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [20] 王继强.高速永磁电机的机械和电磁特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2006.
- [21] MIROSLAVR M, YVES P. Analytical solution for rotor eddy-current losses in a slotless permanent-magnet motor: the case of current sheet excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(3): 386-393.
- [22] 赵镇南.传热学[M].北京:高等教育出版社,2008.

收稿日期: 2017 -06 -02

(上接第 89 页)

矩响应与参数不变时一致。这也证明了系统能够克服参数变化造成的影响。

4 结 语

本文研究了一种新型的参考电压矢量预测方法,在保持性能良好的情况下,克服了传统方法对电机参数的依赖。在实际中,电机运行情况的改变很容易令参数发生变化,因此该方法更能适应实际情况,具有很好的实用价值。

【参考文献】

- [1] 王成元,夏加宽,孙宜标.现代电机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [2] 杨建飞.永磁同步电机直接转矩控制系统若干关键问题研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [3] 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.
- [4] 廖永衡,冯晓云,王珍.无差拍空间矢量调制直接转矩控制简化设计[J].电工技术学报,2011; 26(6): 95-101.
- [5] TANG L, ZHONG L, RAHMAN M F, et al. A novel direct torque controlled interior permanent magnet synchronous machine drive with low ripple in flux and torque and fixed switching frequency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(2): 346-354.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李耀华,马建,刘晶郁,等.永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择[J].长安大学学报(自然科学版),2013,33(6): 102-109.
- [9] MERZOUG M S, BENALLA H, NACERI H. Speed estimation using extended filter kalman for the direct torque controlled permanent magnet synchronous motor (PMSM) [C] // Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, IEEE Computer Society, 2009: 122-127.
- [10] 徐艳平,钟彦儒,杨惠.一种基于空间矢量调制的永磁同步电动机新型直接转矩控制方案[J].电工技术学报,2008,23(11): 47-52.
- [11] 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.
- [12] 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(6): 13-18.
- [13] 韩亚军,朱亚红.基于滑模和空间矢量调制的永磁同步电动机直接转矩控制[J].微特电机,2012,40(6): 53-56.

收稿日期: 2017 -05 -09