

基于双变量预测控制的表贴式永磁同步电机 直接转矩控制系统*

李耀华, 孟祥臻, 师浩浩, 任佳越, 杨启东, 曲亚飞
(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 基于电压矢量幅值和相角为变量的表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 定子磁链幅值和转矩表达式, 给出了 9 个不同幅值和相角的备选电压矢量, 采用预测控制计算得出施加不同电压矢量下一时刻的定子磁链幅值和转矩值, 建立了基于磁链和转矩误差的目标函数, 并选择使目标函数最小的电压矢量为作为下一时刻施加的最优电压矢量。仿真结果表明: 在双变量预测控制下, SPMSM 直接转矩控制系统运行良好, 定子磁链轨迹为理想圆, 磁链和转矩均符合控制要求, 转速跟踪良好, 定子电流波形正弦。进一步对比分析表明: 与开关表和固定电压矢量选择策略相比, 双变量预测控制能显著减小转矩和磁链脉动。与开关表相比, 转矩脉动均方根误差降低了 62.92%, 磁链脉动均方根误差降低了 45.05%, 评价函数均值降低了 60.30%; 与固定电压矢量选择策略相比, 转矩脉动均方根误差降低了 22.40%, 磁链脉动均方根误差降低了 3.85%, 评价函数均值降低了 15.93%。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 直接转矩控制; 电压矢量选择; 预测控制

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)06-0015-06

Direct Torque Control System of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Bivariate Predictive Control*

LI Yaohua, MENG Xiangzhen, SHI Haohao, REN Jiayue, YANG Qidong, QU Yafei
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on flux and torque's expressions of surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) direct torque control (DTC) system using the amplitude and angle of applying voltage vector as variables, 9 voltage vectors with different amplitudes and angles were used as selectable voltage vectors and values of stator flux and torque at next sampling point after applying these voltage vectors were given using predictive control. Object function based on flux and torque's errors was proposed. The predictive control of the SPMSM DTC system selects the applying voltage vector which aims to minimize object function. Simulation results showed that compared with switching table, the average value of evaluation function was reduced by 60.30% and root mean square errors (RMSEs) of torque and flux's ripples were reduced by 62.92% and 45.05%. Compared with fixed voltage vector selection strategy, the average value of evaluation function was reduced by 15.93% and RMSEs of torque and flux's ripples were reduced by 22.40% and 3.85%. Therefore, compared with switching table and fixed voltage vector selection strategy, the proposed strategy could reduce evaluation function, stator flux and torque's errors.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM); direct torque control (DTC); voltage vector selection; predictive control

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51207012); 陕西省工业科技攻关项目(2016GY-069); 陕西省微特电机及驱动技术重点实验室开放基金项目(2013SSJ2002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102228201)

作者简介: 李耀华(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机电控与新能源汽车技术。

0 引言

基于开关表控制的永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)技术是根据转矩和定子磁链幅值误差信号及定子磁链角位置信息,查表选择逆变器产生的基本电压矢量来实现对转矩和磁链的增减控制要求^[1-5]。开关表选择的电压矢量不能同时始终满足磁链和转矩控制要求^[6-7]。DTC系统只有选择位于电压矢量选择区域才能确保对磁链和转矩正确控制^[8]。文献[8]给出了PMSM DTC选择区域。相角位于选择区域的电压矢量均可作为备选矢量。文献[9]给出一种简易电压矢量选择方案,电压矢量相角为所在选择区域的角平分线,电压矢量幅值固定为 $\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$ 。但这种选择方法仅可确保对磁链和转矩正确控制,消除因开关表失效引起的转矩脉动,并不是最优电压矢量^[10-12]。模型预测控制基于系统预测模型,计算系统未来特性,从备选变量集合中选择最优变量。近年来,将模型预测控制应用于DTC技术,以减小磁链和转矩脉动成为研究的热点^[13-20]。模型预测控制在备选电压矢量集合中选取最优电压矢量。电压矢量的幅值和相角对磁链和转矩控制都有所影响。因此,本文将备选电压矢量幅值和相角均作为变量,研究不同幅值和相角的备选电压矢量控制下的表贴式永磁同步电机(SPMSM)模型预测DTC。

基于SPMSM DTC系统电压矢量选择区域,在选择区域内使用9个不同幅值和相角的电压矢量作为模型预测控制的备选电压矢量。根据定子磁链坐标系下的SPMSM磁链和转矩预测模型,计算得出施加不同电压矢量下一时刻定子磁链幅值和转矩的预测值,建立基于磁链和转矩误差的目标函数,选择使目标函数最小的电压矢量作为最优电压矢量。仿真结果表明:在双变量预测控制下,SPMSM DTC系统运行良好,定子磁链轨迹为理想圆,磁链和转矩均符合控制要求,转速跟踪良好,定子电流波形正弦。与开关表和固定电压矢量选择策略相比,本文所提双变量预测控制能显著减小转矩和磁链脉动。

1 SPMSM DTC 双变量预测控制

定子磁链坐标系下,SPMSM DTC系统电压矢量选择区域如下^[8]:

$$\begin{cases} \angle U_{11} \in (0^\circ, 90^\circ) \\ \angle U_{01} \in (90^\circ, 180^\circ - \delta) \\ \angle U_{00} \in (180^\circ, 270^\circ) \\ \angle U_{10} \in (270^\circ, 360^\circ - \delta) \end{cases} \quad (1)$$

忽略定子电阻压降和采样周期内转子磁链旋转引起的转矩角变化,在第 k 时刻施加电压矢量一个采样周期后, $(k+1)$ 时刻的SPMSM定子磁链幅值和转矩如式(2)、式(3)所示:

$$\begin{cases} \hat{\psi}_s(k+1) = \hat{\psi}_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \\ q = \hat{U}_s(k) \cdot \Delta t / \hat{\psi}_s(k) \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_f\hat{\psi}_s(k)}{2L_d} \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \cdot \sin\left[\delta(k) + \arcsin \frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}}\right] \quad (3)$$

式中: $\hat{\psi}_s(k)$ ——第 k 时刻磁链幅值;

α ——施加的电压矢量幅值与定子磁链的夹角;

$\hat{U}_s(k)$ ——第 k 时刻施加的电压矢量幅值;

Δt ——采样周期;

p ——电机极对数;

ψ_f ——永磁体磁链;

L_d —— d 轴电感;

$\delta(k)$ ——第 k 时刻转矩角。

由式(2)和式(3)可知,PMSM第 $(k+1)$ 时刻的定子磁链幅值和转矩由所施加的电压矢量幅值和相角决定。因此,电压矢量的相角和幅值可作为磁链和转矩预测控制的控制变量。

理论上,预测控制的备选变量个数越多,控制效果越好,但带来的实时运算负担也越重。综合考虑控制效果和运算负担,选取9个备选电压矢量,电压矢量幅值为 $\frac{1}{3} \times \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$ 、 $\frac{2}{3} \times \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$ 和 $\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$,电压矢量相角分别位于电压矢量选择区域的 $1/4$ 、 $1/2$ 和 $3/4$ 平分线。所提预测控制使用的9个备选电压矢量如图1所示。

将这9个电压矢量的幅值和相角代入式(2)

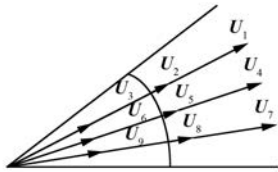


图1 备选电压矢量

和式(3),可得下一时刻 SPMSM 定子磁链幅值和转矩。为了综合考量备选电压矢量对磁链和转矩的控制效果,定义磁链和转矩误差目标函数如式(4)所示:

$$g = \sqrt{\left[\frac{\hat{\psi}_s^* - \hat{\psi}_s(k+1)}{\hat{\psi}_s^*}\right]^2 + \left[\frac{T_e^* - T_e(k+1)}{T_e^*}\right]^2}$$
 (4)

式中: $\hat{\psi}_s^*$ 、 T_e^* ——系统的参考定子磁链幅值和参考转矩。

将不同电压矢量施加后的定子磁链幅值和转矩代入式(4),可得9个不同的目标函数值。预测控制系统选择令目标函数值 g 最小的电压矢量作为下一时刻施加的电压矢量。由于基于预测选择得到的电压矢量幅值和相角均为变化值,需要采用空间矢量调制技术来合成所需的电压矢量。由此可得,SPMSM DTC 双变量预测控制流程和系统框图分别如图2和图3所示,其中, ϕ 和 τ 为磁链和转矩滞环控制信号, θ_s 为定子磁链矢量角位置。

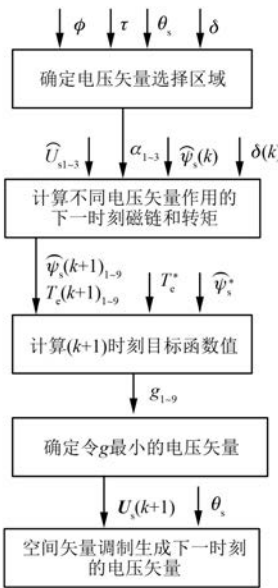


图2 PMSM DTC 双变量预测控制流程图

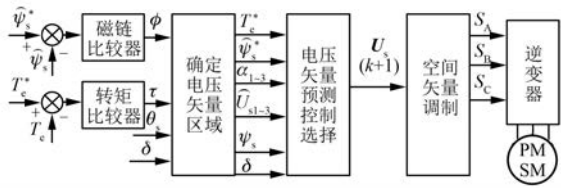


图3 SPMSM DTC 双变量预测控制系统

2 仿真实验

基于 MATLAB/Simulink 建立 SPMSM DTC 双变量预测控制系统离散仿真模型。仿真参数如下:系统采样周期为 5×10^{-5} s;参考转速为 60 r/min;参考转矩初始为 10 N·m,0.3 s 时阶跃至 30 N·m;参考定子磁链幅值为 0.3 Wb;转矩滞环宽度为 0.02 N·m;定子磁链幅值滞环宽度为 0.002 Wb。仿真用 SPMSM 参数如表1所示。

表1 仿真用 SPMSM 参数

电机参数	参数值
定子电阻/ Ω	0.2
d 轴电感/H	0.008 5
q 轴电感/H	0.008 5
转子磁链/Wb	0.175
极对数	4
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.089
黏滞阻尼/($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)	0.005

在双变量预测控制策略下,SPMSM DTC 系统的定子磁链轨迹、定子磁链幅值、电机转速、电机转矩和 A 相定子电流波形分别如图4~图8所示。

由图4~图8可知,在双变量预测控制策略下,SPMSM DTC 系统运行良好,定子磁链轨迹为理想圆,磁链和转矩均符合控制要求,转速跟踪良好,定子电流波形正弦。

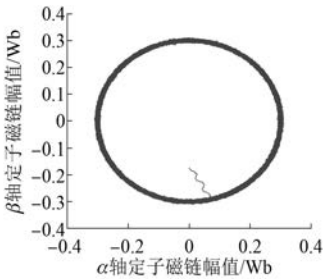


图4 定子磁链轨迹

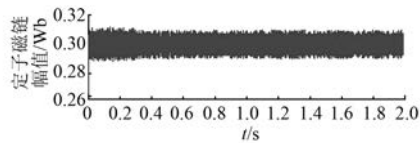


图5 定子磁链幅值

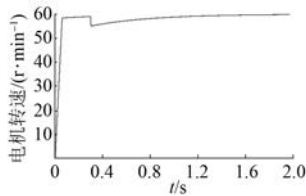


图6 电机转速

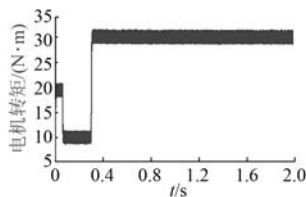


图7 电机转矩

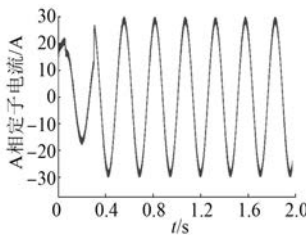


图8 电机 A 相定子电流

在相同仿真条件及开关表、固定电压矢量选择策略^[9](相角位于电压矢量选择区域的角平分线,电压矢量幅值为 $\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$)和双变量预测控制策略控制下,SPMSM DTC 系统转矩和磁链脉动波形分别如图 9~图 14 所示。

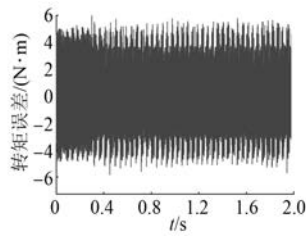


图9 开关表控制下转矩脉动波形

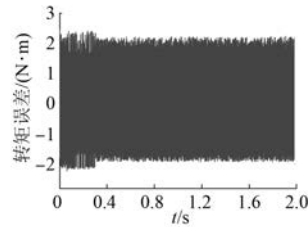


图10 固定电压矢量选择策略下转矩脉动波形

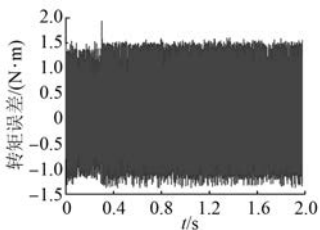


图11 双变量预测控制策略下转矩脉动波形

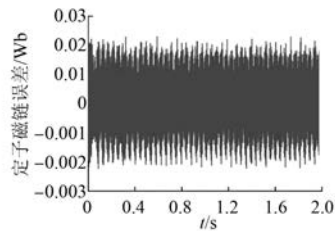


图12 开关表控制下磁链脉动波形

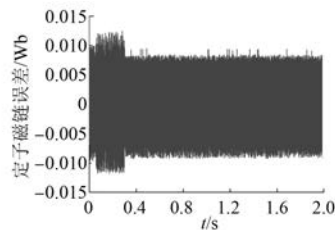


图13 固定电压矢量选择策略下磁链脉动波形

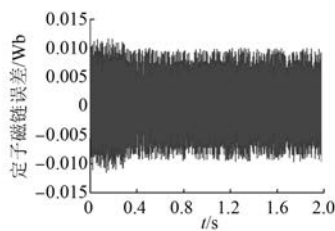


图14 双变量预测控制策略下磁链脉动波形

为了综合评价转矩和磁链控制效果,定义评价函数:

$$m = \sqrt{\left[\frac{\hat{\psi}_s^* - \hat{\psi}_s}{\hat{\psi}_s^*}\right]^2 + \left[\frac{T_e^* - T_e}{T_e^*}\right]^2} \tag{5}$$

在 3 种策略控制下,SPMSM DTC 系统的评价函数波形如图 15~图 17 所示。

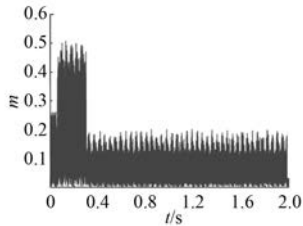


图 15 开关表控制下评价函数波形

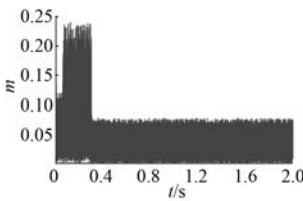


图 16 固定电压矢量选择策略下评价函数波形

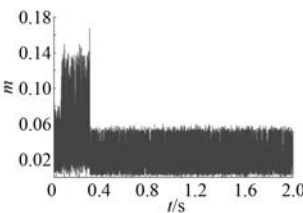


图 17 双变量预测控制策略下评价函数波形

由图 9~图 17 可知,在双变量预测控制策略控制下,SPMSM DTC 系统的转矩和磁链脉动及评价函数均明显小于开关表控制和固定电压矢量选择策略。

为了定量分析 3 种策略的控制效果,定义转矩脉动均方根误差、磁链脉动均方根误差和评价函数平均值作为评价指标,分别如式(6)~式(8)所示:

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \tag{6}$$

式中: n ——样本数量。

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \tag{7}$$

$$m_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n m}{n} \tag{8}$$

3 种策略控制下,SPMSM DTC 系统的转矩和磁链脉动均方根误差及评价函数平均值如表 2 所示。

表 2 转矩和磁链脉动均方根误差与评价函数平均值

策略控制	转矩脉动均方根误差/(N·m)	磁链脉动均方根误差/Wb	评价函数平均值
开关表	2.114 8	0.009 1	0.081 1
固定电压矢量选择策略	1.010 5	0.005 2	0.038 3
双变量预测控制策略	0.784 1	0.005 0	0.032 2

仿真波形和计算结果表明:与开关表和固定电压矢量选择策略相比,双变量预测控制策略控制下 SPMSM DTC 系统的转矩和磁链脉动均方根误差及评价函数平均值均为最小。与开关表相比,转矩脉动均方根误差降低了 62.92%,磁链脉动均方根误差降低了 45.05%,评价函数平均值降低了 60.30%。与固定电压矢量选择策略相比,转矩脉动均方根误差降低了 22.40%,磁链脉动均方根误差降低了 3.85%,评价函数平均值降低了 15.93%。

3 结 语

基于电压矢量幅值和相角为变量的 SPMSM 定子磁链幅值和转矩表达式,本文给出了 9 个不同幅值和相角的备选电压矢量,采用预测控制计算得出施加这些电压矢量的下一时刻磁链和转矩值,建立了基于磁链和转矩误差的目标函数,选择使目标函数最小的电压矢量作为下一时刻施加的电压矢量,采用空间矢量调制技术生成最终施加电压矢量,并通过仿真对比分析了开关表、固定电压矢量选择策略和双变量预测控制策略控制下 SPMSM DTC 系统控制性能,得出如下结论。

(1) 在使用电压矢量幅值和相角双变量预测控制下,SPMSM DTC 系统运行理想,定子磁链轨迹为理想圆,磁链和转矩均符合控制要求,转速跟踪良好,定子电流波形正弦。

(2) 与开关表和固定电压矢量选择策略相

比,双变量预测控制策略控制下 SPMSM DTC 系统的转矩和磁链脉动均方根误差及评价函数平均值均为最小。与开关表相比,转矩脉动均方根误差降低了 62.92%,磁链脉动均方根误差降低了 45.05%,评价函数平均值降低了 60.30%。与固定电压矢量选择策略相比,转矩脉动均方根误差降低了 22.40%,磁链脉动均方根误差降低了 3.85%,评价函数平均值降低了 15.93%。

(3) 本文所提备选电压矢量数目较多,预测控制计算量较大,后期可在备选电压矢量数目和控制性能之间取到合适的均衡。同时,对预测控制模型的简化也将是后期研究的重点。

【参考文献】

- [1] 胡育文,高瑾,杨建飞,等.永磁同步电动机直接转矩控制系统[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [2] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528.
- [3] RAHMAN M F, HAQUE M E, TANG L X. Problems associated with the direct torque control of an interior permanent-magnet synchronous motor drive and their remedies [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 799.
- [4] XU J Q, OUYANG M G, TANG R Y. Direct torque control of permanent magnet synchronous traction motor in electrical vehicle drive [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 94.
- [5] 肖萌,史婷娜,王志强,等.基于多级滞环控制器的永磁同步电机直接转矩控制[J].中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4201.
- [6] 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.
- [7] CASDAEI D, PROFUMO F, SERRA G, et al. FOC and DTC: two variable schemes for induction motors torque control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 779.
- [8] 李耀华,马建.永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域[J].长安大学学报, 2012, 32(1): 95.
- [9] 李耀华,马建.电动汽车用永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择策略[J].电机与控制学报, 2012, 16(4): 43.
- [10] 牛峰,李奎,王尧.永磁同步电机模型预测直接转矩控制[J].电机与控制学报, 2015, 19(12): 60.
- [11] ZHU H, XIAO X, LI Y. Torque ripple reduction of the torque predictive control scheme for permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 871.
- [12] CHO Y, LEE K B, SONG J H, et al. Torque-ripple minimization and fast dynamic scheme for torque predictive control of permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2182.
- [13] GEYER T, PAPAFOOTI G, MORAI M. Model predictive control-Part I: concept, algorithm, and analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1894.
- [14] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, Part 1: maximum torque per ampere operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 1912.
- [15] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, Part 2: field weakening operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 648.
- [16] 刘雪松,刘文生.基于最大转矩电流比控制的永磁同步电机模型预测控制[J].电机与控制应用, 2017, 44(8): 38.
- [17] 徐向前,徐文静,杨士慧.基于预测模型的永磁同步电机直接转矩控制[J].电机与控制应用, 2017, 44(1): 29.
- [18] 包广清,何婷,刘小宝.永磁同步电机有限集模型预测直接转矩控制[J].电机与控制应用, 2018, 45(2): 19.
- [19] 李耀华,师浩浩,孟祥臻.基于预测控制的 SPMSM 直接转矩控制最优电压矢量选择策略[J].电机与控制应用, 2018, 45(6): 21.
- [20] 田朱杰,吴晓新,於峰.计及开关频率优化的永磁同步电机模型预测转矩控制[J].电机与控制应用, 2018, 45(11): 21.

收稿日期: 2018-12-24