

表贴式永磁同步电机直接转矩控制 变角度预测控制*

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

摘要: 基于以电压矢量相角为变量的表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 磁链和转矩方程, 采用预测控制计算出施加不同电压矢量相角的下一时刻磁链和转矩值, 选择使磁链和转矩误差目标函数最小的电压矢量相角作为最优值, 从而确定下一时刻施加的电压矢量。仿真结果表明: 在电压矢量变角度预测下, 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, 定子电流波形为正弦。研究了不同等分电压矢量相角选择区域方式下变角度预测控制系统的控制效果。综合考虑控制效果和计算负担, 变角度预测控制下将相角选择区域四等分比较理想。

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(2018)12-0019-06

Predictive Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Torque Control System Using Voltage Vectors with Variable Angle*

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

Abstract: Based on the expressions of flux and torque of surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) direct torque control (DTC) system with the angle of applying voltage vector as the variable, the values of stator flux and torque at the next sampling point after applying voltage vector with different angle were given. The objective function of flux error and torque error was proposed. The predictive control would select the optimal angle which minimized the objective function. Simulation results showed that the SPMSM DTC system under the control of proposed strategy worked properly. Control performances of SPMSM DTC system were given using different partitioning methods of voltage vector selection area. Considering control performance and calculation burden, quartering the voltage vector selection area was an ideal way.

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

0 引言

基于开关表的永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC) 技术由转矩和定子

磁链幅值误差信号及定子磁链角位置确定, 根据开关表查表选择基本电压矢量, 实现对转矩和磁链的增减控制要求^[1-5]。研究发现开关表选择的电压矢量不能始终同时满足磁链和转矩的控制要求, 从而产生不合理转矩脉动, 进一步得出 PMSM

* 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。

任佳越 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机电控与新能源汽车技术。

DTC 系统电压矢量相角选择区域^[6-8]。凡是相角位于选择区域的电压矢量均可实现对磁链和转矩的正确控制。文献[9]给出一种均分电压矢量选择区域的方案,所选电压矢量位于选择区域的角平分线,电压矢量幅值固定为逆变器非零电压矢量形成的六边形内切圆半径。不同的电压矢量相角对磁链和转矩产生不同的影响。因此,可以将电压矢量相角作为控制变量来提高系统性能。本文基于以电压矢量相角为变量的表贴式永磁同步电机 (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM) 磁链和转矩方程,采用预测控制计算得出施加不同相角电压矢量的下一时刻磁链和转矩值,选择使磁链和转矩误差目标函数最小的相角为施加的电压矢量相角,实现变角度预测控制。研究了不同等分相角选择区域条件下变角度预测控制系统的控制效果,给出了一种比较理想的电压矢量相角选择区域等分方式。

1 SPMSM DTC 变角度预测控制

在定子磁链 x - y 坐标系下,SPMSM DTC 系统电压矢量相角选择区域如图 1 所示^[8]。电压矢量 U_{11} (增加定子磁链,增加转矩) 相角的选择区间为 $(0^\circ, 90^\circ)$; 电压矢量 U_{01} (减小定子磁链,增加转矩) 相角的选择区间为 $(90^\circ, 180^\circ - \delta)$; 电压矢量 U_{00} (减小定子磁链,减小转矩) 相角的选择区间为 $(180^\circ, 270^\circ)$; 电压矢量 U_{10} (增加定子磁链,减小转矩) 相角的选择区间为 $(270^\circ, 360^\circ - \delta)$, 其中 δ 为转矩角。理论上,只要位于选择区域的电压矢量均可满足 DTC 系统对磁链和转矩的增减控制要求。为了选择最优电压矢量,下文分析不同相角电压矢量对定子磁链幅值和转矩的作用^[10-14]。

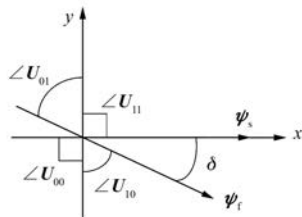


图 1 电压矢量相角选择区域

忽略定子电阻压降,施加电压矢量 Δt 时间后,定子磁链如式(1)所示:

$$\psi_s(k+1) \approx \psi_s(k) + U_s(k) \cdot \Delta t \quad (1)$$

由式(1)可知,对 PMSM 施加电压矢量 Δt 时间后,定子磁链变化如图 2 所示。其中 α 为施加的电压矢量与定子磁链夹角, $\Delta\theta_s$ 为施加电压矢量引起的定子磁链角变化。

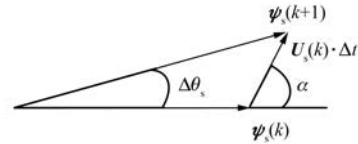


图 2 定子磁链变化

由图 2 可知,忽略转子运动引起的转矩角变化,在电压矢量 U_s 作用下, $(k+1)$ 时刻的定子磁链幅值和转矩角分别如式(2)和式(3)所示,其中 $\hat{\psi}_s(k)$ 、 $\delta(k)$ 和 $\hat{U}_s(k)$ 分别为 k 时刻的定子磁链幅值、转矩角和电压矢量幅值。

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

$$\begin{aligned} \delta(k+1) &\approx \delta(k) + \Delta\delta = \\ &\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q \cos \alpha}} \end{aligned} \quad (3)$$

SPMSM 转矩方程为

$$T_e = \frac{3p \hat{\psi}_s}{2L_d} \psi_t \sin \delta \quad (4)$$

将式(2)、式(3)代入式(4),可得 SPMSM $(k+1)$ 时刻的转矩方程为

$$\begin{aligned} T_e(k+1) &= \frac{3p \psi_t \hat{\psi}_s(k)}{2L_d} \sqrt{1 + q^2 + 2q \cos \alpha} \cdot \\ &\sin \left[\delta(k) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q \cos \alpha}} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

定义 PMSM DTC 系统转矩和磁链误差目标函数为

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e^* - T_e(k+1)}{T_e^*} \right]^2 + \left[\frac{\hat{\psi}_s^* - \hat{\psi}_s(k+1)}{\hat{\psi}_s^*} \right]^2} \quad (6)$$

式中: T_e^* 、 $\hat{\psi}_s^*$ ——系统的参考转矩和定子磁链参考幅值。

由式(6)可知,当施加电压矢量幅值固定时,目标函数值由所施加电压矢量相角 α 唯一决定。

本文令所施加的电压矢量幅值固定,其值为逆变器非零电压矢量形成的六边形内切圆半径 $\sqrt{3}U_{dc}/3$ 。将相角选择区域 $(n+1)$ 等分,令备选电压

矢量位于等分线上,可得 n 个不同相角的备选电压矢量,此时备选电压矢量相角集有 n 个备选相角。

基于电压矢量幅值和选择备选矢量集合内的不同相角,可由式(2)和式(5)预测得出不同相角电压矢量作用下的 SPMSM 定子磁链幅值和转矩。将其代入式(6),可得 n 个不同的目标函数值。选择令目标函数值 g 最小的电压矢量相角作为下一时刻施加的电压矢量相角,则可确定下一时刻施加的电压矢量 $U_s(k+1)$ 。

由上文可知,SPMSM DTC 变角度预测控制如图 3 所示,其中, ϕ 和 τ 分别为磁链和转矩滞环控制信号, θ_s 为定子磁链在精致坐标系下的角位置。

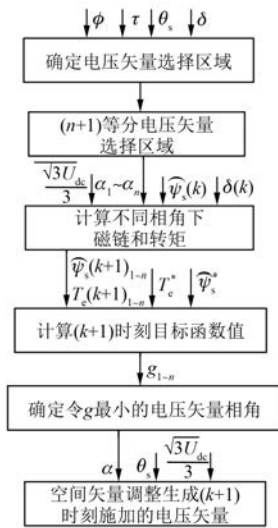


图 3 变角度预测控制

基于 MATLAB/Simulink 建立了 SPMSM DTC 变角度预测控制系统仿真模型。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 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 仿真电机参数

参数	数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
d 轴电感 L_d/H	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
转子磁链 ψ_r/Wb	0.175
极对数 p	4
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.089
粘滞阻尼 $F/(N \cdot m \cdot s)$	0.005

将电压矢量相角选择区域四等分,可得 3 个备选电压矢量,如图 4 所示。

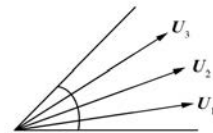


图 4 3 个备选电压矢量

在 3 个备选相角变量预测控制下,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 5~图 9 所示。图 5~图 9 表明,在电压矢量变角度预测控制下,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。

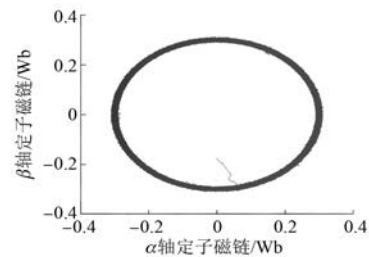


图 5 定子磁链轨迹

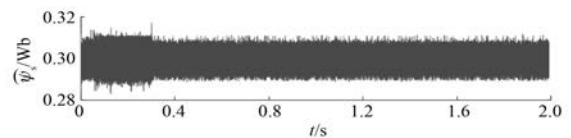


图 6 定子磁链幅值

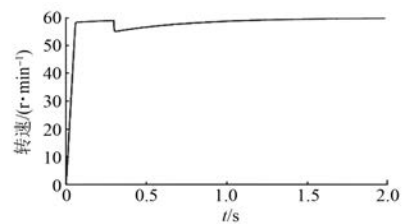


图 7 电机转速

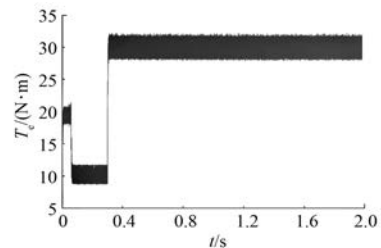


图 8 电机转矩

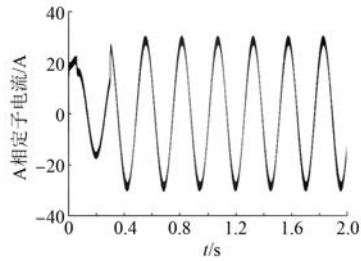


图9 A相定子电流

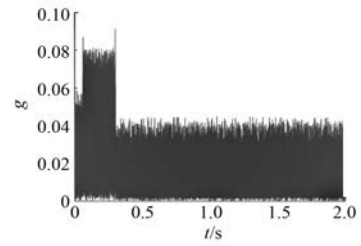


图13 2个备选电压矢量相角下目标函数波形

2 不同相角区域等分方式影响

电压矢量相角选择区域等分数越多, 备选电压矢量相角数量越多, 系统优化效果越好, 但计算负担也越大。下文给出备选电压矢量相角分别为1、2、3个下的目标函数、转矩脉动和磁链脉动波形, 如图10~图18所示。

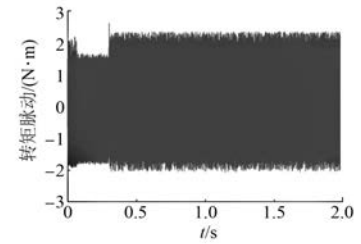


图14 2个备选电压矢量相角下转矩脉动

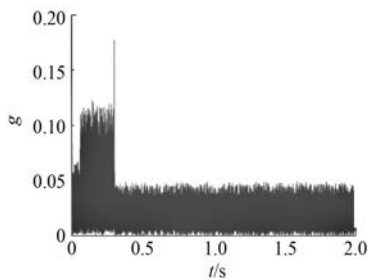


图10 1个备选电压矢量相角下目标函数波形

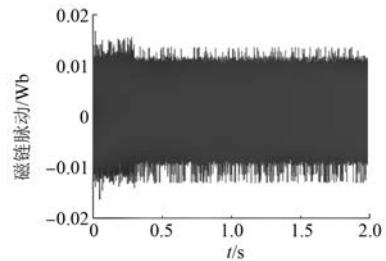


图15 2个备选电压矢量相角下磁链脉动

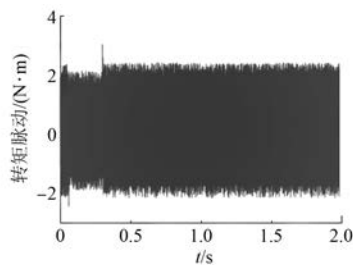


图11 1个备选电压矢量相角下转矩脉动

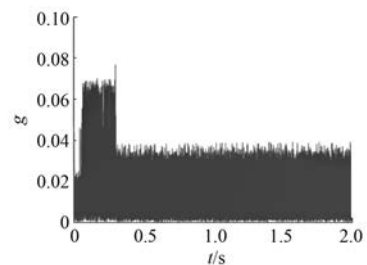


图16 3个备选电压矢量相角下目标函数波形

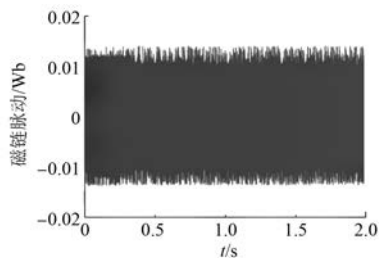


图12 1个备选电压矢量相角下磁链脉动

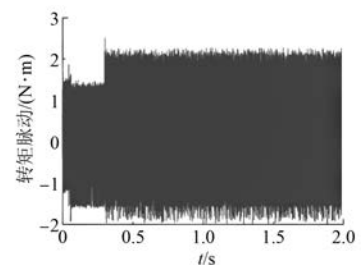


图17 3个备选电压矢量相角下转矩脉动

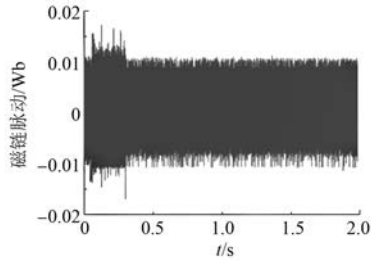


图 18 3 个备选电压矢量相角下磁链脉动

为了定量评价控制效果,使用目标函数平均值、转矩脉动均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和磁链脉动均方根误差作为评价指标,分别如式(7)~式(9)所示,其中 n 为样本数量。

$$g_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n g}{n} \quad (7)$$

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (9)$$

1 个备选电压矢量相角条件下的目标函数平均值、转矩和磁链脉动均方根误差分别为 0.022 4, 1.100 1 N·m 和 0.006 7 Wb。2 个备选电压矢量相角条件下的目标函数平均值、转矩和磁链脉动均方根误差分别为 0.016 7, 1.034 2 N·m 和 0.006 5 Wb。3 个备选电压矢量相角条件下的目标函数平均值、转矩和磁链脉动均方根误差分别为 0.013 7, 0.982 6 N·m 和 0.005 9 Wb。仿真波形和评价指标计算结果表明:随着备选电压矢量相角数量的增多,控制效果变好,但系统计算负担也更大。

在不同备选电压矢量相角数量条件下,SPMSM DTC 变角度预测控制系统目标函数平均值、转矩和磁链脉动均方根误差如表 2 和图 19~图 21 所示。

仿真计算结果表明:当备选电压矢量相角大于 3 以后,目标函数平均值、转矩和磁链脉动均方根误差趋于稳定。综合考虑系统控制效果和计算负担,将相角选择区域四等分比较理想,此时变角

表 2 目标函数平均值、转矩和磁链脉动均方根误差计算结果

备选电压矢量相角数量	目标函数平均值	转矩脉动均方根误差/(N·m)	磁链脉动均方根误差/Wb
1	0.022 4	1.100 1	0.006 7
2	0.016 7	1.034 2	0.006 5
3	0.013 7	0.982 6	0.005 9
4	0.012 3	0.964 9	0.006 0
5	0.011 6	0.960 1	0.005 9
6	0.011 4	0.954 0	0.005 7
7	0.011 0	0.949 8	0.005 7
8	0.010 8	0.941 2	0.005 9
9	0.010 6	0.938 8	0.005 9
10	0.010 4	0.935 7	0.005 9

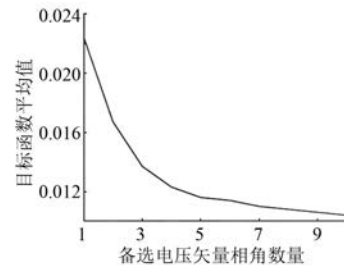


图 19 目标函数平均值

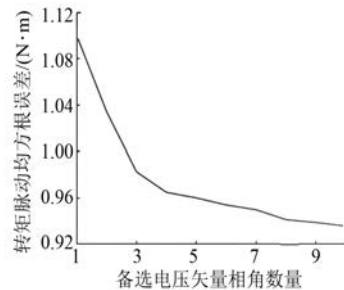


图 20 转矩脉动均方根误差

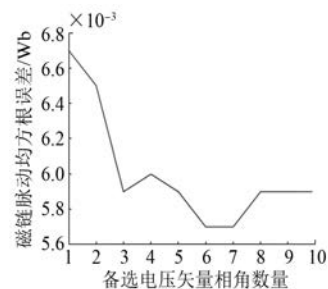


图 21 磁链脉动均方根误差

度预测控制的备选电压矢量相角有 3 个, 具体如下所示:

$$\begin{cases} \angle U_{11} \in \{22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ\} \\ \angle U_{01} \in \left\{112.5^\circ - \frac{\delta}{4}, 135^\circ - \frac{\delta}{2}, 157.5^\circ - \frac{3\delta}{4}\right\} \\ \angle U_{00} \in \{202.5^\circ, 225^\circ, 247.5^\circ\} \\ \angle U_{10} \in \left\{292.5^\circ - \frac{\delta}{4}, 315^\circ - \frac{\delta}{2}, 337.5^\circ - \frac{3\delta}{4}\right\} \end{cases} \quad (10)$$

3 结 语

本文基于以电压矢量相角为变量的 SPMSM 磁链和转矩方程, 采用预测控制计算得出施加不同相角电压矢量的下一时刻磁链和转矩值, 选择使磁链和转矩误差目标函数最小的相角为施加的电压矢量相角, 并比较了相角选择区域不同等分方式下的控制效果, 得出如下结论。

(1) 在本文所提变角度选择策略控制下, 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) 随着备选电压矢量相角数量的增多, 预测控制效果变好, 但计算负担也更大。当备选电压矢量相角数大于 3 以后, 目标函数平均值、转矩和磁链脉动均方根误差趋于稳定。因此, 考虑计算负担和系统控制效果, 变角度预测控制将相角选择区域四等分比较理想。

【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): 528-536.
- [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): 799-809.
- [4] 许家群, 欧阳明高, 唐任远. 电动汽车用永磁同步牵引电动机直接转矩控制 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 94-98.
- [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): 4201-4211.
- [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): 148-152.
- [7] 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, 37(5): 20-23.
- [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): 95-100.
- [9] 李耀华, 刘晶郁. 电动汽车用 PMSM 直接转矩控制电压矢量选择策略 [J]. 电气传动, 2012, 42(6): 1-8.
- [10] ALEXANDROU A D, ADAMOPOULOS N K, KLADAS A G. Development of a constant switching frequency deadbeat predictive control technique for field-oriented synchronous permanent-magnet motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5167-5175.
- [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): 871-877.
- [12] CHO Y, LEE K B, SONG J H. 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): 2182-2190.
- [13] XIA C L, WANG S, GU X, et al. Direct torque control for VSI-PMSM using evaluation factor table [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4571-4583.
- [14] ZHANG Y C, ZHU J G, XU W, et al. A simple method to reduce torque ripple in direct torque-controlled permanent-magnet synchronous motor by using vectors with variable amplitude and angle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(7): 2848-2859.

收稿日期: 2018-07-06