

一种基于开关次数最小的含零电压矢量永磁同步电机直接转矩控制开关表*

李耀华, 曲亚飞, 师浩浩, 孟祥臻, 焦森
(长安大学汽车学院, 陕西西安 710064)

摘要: 介绍了永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)理论,研究了零电压矢量的作用。基于开关次数最小提出了选择零电压矢量的策略,给出了一种新型含零电压矢量开关表。仿真结果表明使用新型开关表PMSM DTC系统能正常驱动。与传统开关表相比,使用新型开关表DTC系统开关次数降低了近56%,进而降低了开关损耗。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; 零电压矢量; 开关表

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)02-0034-06

A Switching Table Based on Minimum Switching Times Using Zero Voltage Vectors in Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Torque Control System*

LI Yaohua, QU Yafei, SHI Haohao, MENG Xiangzhen, JIAO Sen
(School of automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The theory of direct torque control (DTC) in permanent magnet synchronous motor (PMSM) was investigated. The effect of zero voltage vectors for the PMSM DTC drives was analyzed. The strategy of selecting zero voltage vector was proposed based on the minimum switching times, and a new switching table with zero voltage vectors was given. Simulation results showed that the PMSM DTC system could work properly using the new table. Switching times of the DTC system using new switching table were decreased by direct torque control nearly 56% compared to conventional switching table, therefore, switching loss was decreased.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); direct torque control (DTC); zero voltage vector

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有体积小、效率高、转矩平稳等优点,获得了广泛的应用。直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)对电机参数依赖性小,以其快速的转矩响应、优良的动态性能受到广泛关注,是一种高性能的控制策略^[1-2]。早

期研究表明忽略零电压矢量PMSM DTC系统能正常工作。在异步电机DTC中根据所需的电压矢量来推算零电压矢量的作用时间降低转矩脉动^[3]。根据同步电机和异步电机产生转矩增量机理的不同,分析了PMSM系统中的零电压矢量,认为其具有保持电机转矩的功能^[4-9]。文献[10]认为零电压矢量作用于电机后,当电机运行在低速状态时,其引起的转矩变化较小,电机转矩基本

* 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)

作者简介: 李耀华(1980—),男,博士后,副教授,研究方向为电动汽车和电机控制技术。

曲亚飞(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制技术。

不变。文献[11]中详细分析了零电压矢量对转矩脉动和磁链脉动的影响,指出在电机高速运行的情况下,零电压矢量实际是起到减小转矩的作用。文献[12-13]则认为零电压矢量能减小定子磁链幅值和转矩。文献[14]给出了当采用两点式滞环比较器时 PMSM DTC 系统控制转矩不能应用零电压矢量的根本原因,并且提出了一种含零电压矢量开关表的概念。文献[15]指出在一个采样周期内零电压矢量和两个有效电压矢量共同作用减小定子磁链幅值的波动。

本文介绍了 PMSM DTC 理论,研究了零电压矢量的作用,基于开关次数最小提出选择零电压矢量的策略,并给出一种新型含零电压矢量开关表。理论分析和仿真结果表明,提出的选择零电压矢量策略合理利用了零电压矢量,减小了开关动作次数,进而降低开关损耗。

1 PMSM DTC 理论

DTC 系统其基本思想就是通过控制定子磁链来达到控制转矩的目的。PMSM 矢量图如图 1 所示。

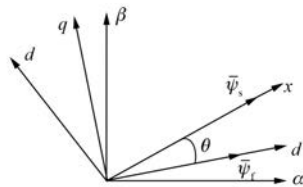


图 1 PMSM 矢量图

图 1 中, $d-q$ 坐标系为与转子同步的旋转坐标系; $x-y$ 坐标系为与定子磁链同步的旋转坐标系,定子磁链的方向为 x 轴的正向。 d 轴与 x 轴之间的夹角为 θ 。在恒定负载稳态下运行, θ 保持恒定;瞬态时, θ 随着定、转子的旋转速度不同而变化。

在转子旋转 $d-q$ 坐标系下, PMSM 电磁转矩如式(1)所示:

$$T_e = \frac{3p |\psi_s|}{4L_d L_q} [2L_q \psi_r \sin \theta - (L_q - L_d) |\psi_s| \sin 2\theta] \quad (1)$$

式中: L_d, L_q —— d, q 轴电感;

p ——电机极对数;

ψ_r, ψ_s ——定子、转子磁链;

θ ——转矩角,定子磁链和转子磁链之间的夹角。

对于表贴式 PMSM, $L_d = L_q$, 式(1)可以简化成式(2):

$$T_e = \frac{3p}{2L_d} |\psi_s| \psi_r \sin \theta \quad (2)$$

在一定条件下保持定子磁链幅值 $|\psi_s|$ 恒定, 电机的转矩只与转矩角有关, 因此, 改变转矩角能够达到迅速控制转矩的目的。可以通过逆变器选择合适的电压矢量控制定子磁链的幅值和旋转速度, 从而直接控制磁链和转矩。

2 零电压矢量的作用

PMSM 定子磁链在静止坐标系中可以表示为

$$\psi_s = \int (U_s - R_s i_s) dt \quad (3)$$

式中: ψ_s ——定子磁链矢量;

U_s ——电压空间矢量;

R_s ——定子电阻;

i_s ——定子电流矢量。

忽略定子电阻上的压降, 式(3)离散化可以写成:

$$\psi_s(n+1) - \psi_s(n) = U_s T_s \quad (4)$$

式中: T_s ——采样时间。

由图 2 可知, 定子磁链幅值变化量为

$$\Delta \psi_s = |\psi_s(n+1)| - |\psi_s(n)| = |U_s| T_s \cos \alpha \quad (5)$$

式中: α ——施加的电压矢量与 x 轴之间的夹角。

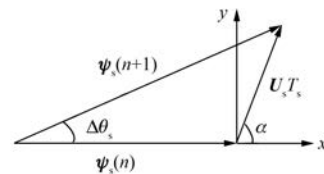


图 2 一个采样时间内定子磁链变化情况

当施加零电压矢量时, $|U_s| = 0$ 。此时, 考虑定子电阻上的压降, 定子磁链幅值有一定程度的降低。

当施加零电压矢量时, 转矩角的变化量 $\Delta \theta$ 如式(6)所示:

$$\Delta \theta = \Delta \theta_s - \Delta \theta_r = -\Delta \theta_r = -\omega T_s \quad (6)$$

由式(6)可知, 施加零电压矢量使转矩角减小, 此时假定定子磁链幅值保持恒定, 由式(2)可知, 转

矩角减小引起转矩降低。式(2)可离散化为

$$\Delta T_e = \frac{3p}{2L_d} \psi_f |\psi_s| \Delta \theta \cos \theta \quad (7)$$

则可得转矩变化率

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = \frac{\Delta \theta \cos \theta}{\sin \theta} \times 100\% = \frac{-\omega T_s \cos \theta}{\sin \theta} \times 100\% \quad (8)$$

可以看出转矩变化率 $\frac{\Delta T_e}{T_e}$ 与电机转速 ω 和转矩角 θ 有关,下面给出转速 ω 从 0~1 000 r/min、转矩角 θ 从 0°~90°时三者的关系图,如图 3~图 5 所示。

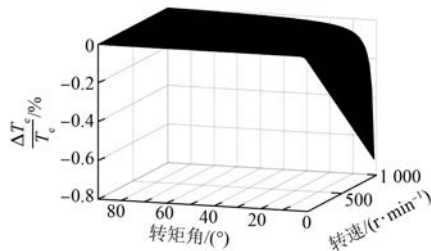


图 3 转矩变化率与转矩角、转速关系

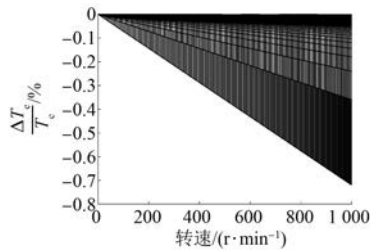


图 4 转矩变化率与转速关系

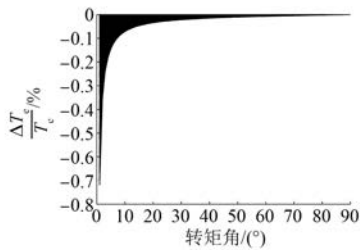


图 5 转矩变化率与转矩角关系

从图 3~图 5 可得,转矩变化率总体幅度很小,随着转速的增加而增加,随转矩角的增加而减小。

由理论分析可知,零电压矢量可减小定子磁链幅值和转矩。

3 DTC 开关表

传统 DTC 开关表如表 1 所示。

表 1 传统 DTC 开关表

φ	τ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
1	0	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
0	1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
0	0	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

表 1 中, φ 和 τ 分别是定子磁链滞环比较器和转矩滞环比较器的结果。当 $\varphi=1$ 时, DTC 系统应增加定子磁链幅值; 当 $\varphi=0$ 时, DTC 系统应减小定子磁链幅值。当 $\tau=1$ 和 $\tau=0$ 时, DTC 系统应分别增加转矩和减小转矩。 $\theta_1 \sim \theta_6$ 是定子磁链所在扇区。 $U_1 (100)$, $U_2 (110)$, $U_3 (010)$, $U_4 (011)$, $U_5 (001)$ 和 $U_6 (101)$ 是逆变器产生的电压矢量。

基于 MATLAB/Simulink 建立离散的 DTC 系统, PMSM 的参数为: $R_s=0.2 \Omega$, $L_d=L_q=0.0085 \text{ H}$, $\Psi_f=0.175 \text{ Wb}$, $p=4$, $J=0.089 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。参考定子磁链幅值为 0.3 Wb, 参考转速为 100 r/min, 1 s 时降低为 50 r/min, 参考转矩为 11 N·m, 采样时间为 $2 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。仿真结果如图 6~图 9 所示。

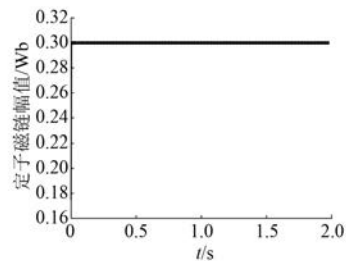


图 6 定子磁链幅值

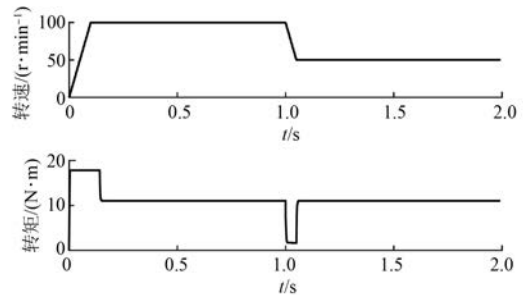


图 7 转速和转矩

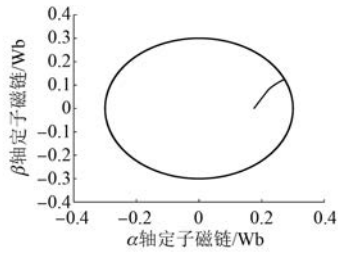


图 8 定子磁链轨迹

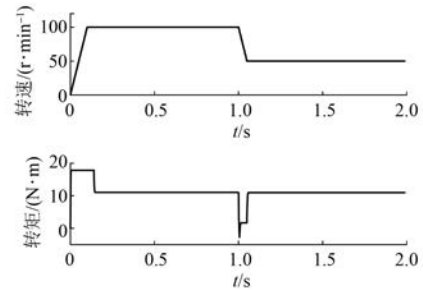


图 11 转速和转矩

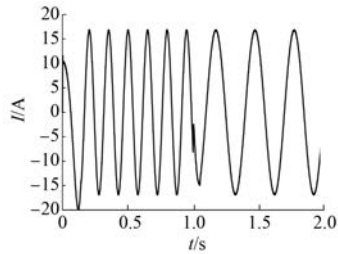


图 9 A 相电流

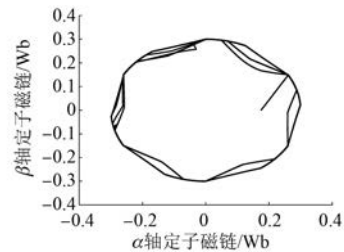


图 12 定子磁链轨迹

由图 6~图 9 可知,定子磁链和转矩满足控制需求,定子磁链轨迹是圆形,电流波形为正弦。

用于感应电机 DTC 的开关表如表 2 所示。

表 2 感应电机 DTC 开关表

φ	τ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
1	0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
0	1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
0	0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0

在同样的仿真条件下使用表 2 作为开关表进行仿真,仿真结果如图 10~图 13 所示。

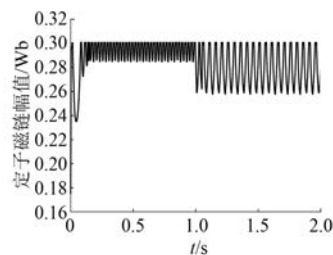


图 10 定子磁链幅值

由图 10 可知,定子磁链幅值不能满足控制要求,当转速降低时,定子磁链幅值波动加剧。由图 11~图 13 可知,转矩控制符合要求,定子磁链圆畸变,电流波形不是正弦,这说明感应电机直接

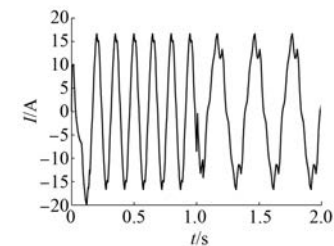


图 13 A 相电流

转矩开关表不能应用于 PMSM DTC 系统中。原因在于磁链调节器输出为 1 时,要求增加定子磁链幅值,转矩调节器输出为 0 时,要求减小电磁转矩,而表 2 选择施加零电压矢量。由前文分析可知,施加零电压同时减小定子磁链幅值和转矩,此时仅能满足转矩调节需求,无法满足磁链调节需求。转速高时,转矩变化率大,施加零电压矢量时间短,对定子磁链影响较小;而转速低时,转矩变化率小,施加零电压矢量时间长,对定子磁链影响较大。

图 14 是磁链滞环比较、转矩滞环比较、电压矢量、定子磁链幅值和电磁转矩仿真波形的局部放大图。由图 14 可知,施加零电压矢量减小定子磁链幅值,缓慢减小电磁转矩,当磁链调节器输出为 1 和转矩调节器输出为 0 时,施加零电压矢量

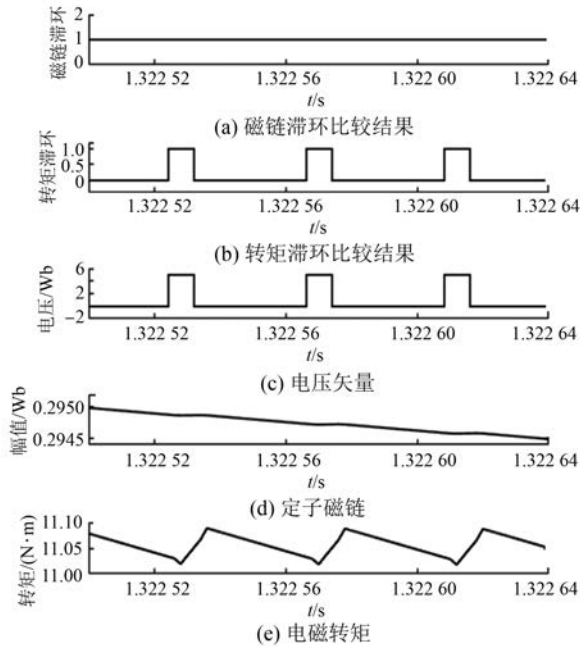


图 14 零电压矢量的作用

仅能满足减小转矩的调节需求,无法满足增加磁链幅值的调节需求。仿真结果证明了理论分析的正确性。

4 新型优化开关表

由于零电压矢量减小定子磁链幅值和转矩,当 $\varphi=0, \tau=0$ 时可以选择零电压矢量同时减小定子磁链幅值和转矩。新型优化开关表如表 3 所示。

表 3 新型优化开关表

φ	τ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
1	0	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
0	1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
0	0	U_x	U_x	U_x	U_x	U_x	U_x

表 3 中, U_x 是逆变器产生的零电压矢量 U_0 (000) 或 U_7 (111)。为了使 DTC 系统的开关次数最小,提出一种选择零电压矢量的策略。

当前要施加的电压矢量为零时,上一个状态施加的电压矢量做开关状态,与两个零电压矢量的开关状态对比,选择从上一状态施加的电压矢量切换到零电压矢量 U_0 或 U_7 时开关动作次数最小的零电压矢量作为当前要施加的零电压矢量。例如,上一个施加的电压矢量为 U_1 (100),根

据上述选择策略, U_x 应为 U_0 (000); 上一个施加的电压矢量为 U_2 (110), 根据上述选择策略, U_x 应为 U_7 (111)。

在同样的仿真条件下使用表 3 作为开关表进行仿真,仿真结果如图 15~图 18 所示。

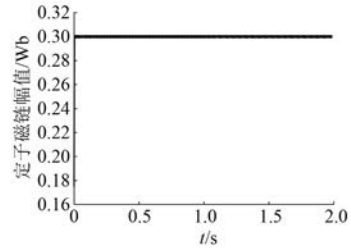


图 15 定子磁链幅值

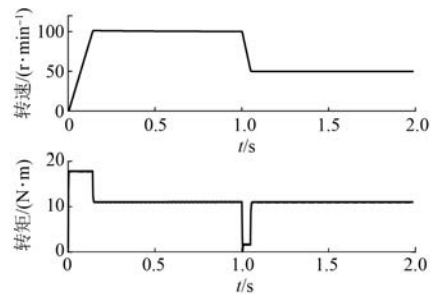


图 16 转速和转矩

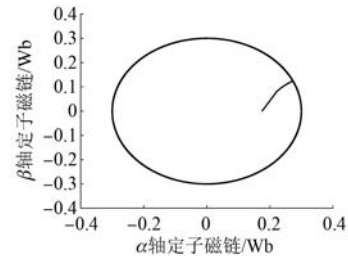


图 17 定子磁链轨迹

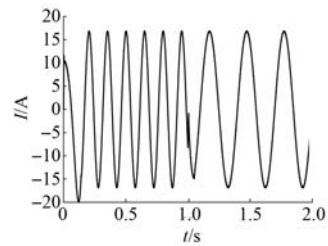


图 18 A 相电流

由图 15~图 18 可得,定子磁链和转矩满足控

制需求,定子磁链轨迹是圆形,电流波形为正弦。仿真结果表明使用新型优化开关表 PMSM DTC 系统能正常驱动,零电压矢量可以应用于 PMSM DTC 系统中。

利用建立的 Simulink 仿真系统进行开关次数分析。参考转速为 100 r/min, 1 s 时降低至 50 r/min; 参考转矩为 11 N·m, 1.5 s 时变为 -11 N·m, 采样时间为 2×10^{-6} s, 仿真时间为 2 s。仿真结果如表 4 所示。

表 4 开关次数结果

开关表	开关次数
表 1	6.76×10^5
表 3	3.01×10^5

由表 4 可知,采用新型优化开关表 DTC 系统的开关次数与表 1 相比,减小了近 56%,进而降低开关损耗。

5 结 语

本文分析了 PMSM DTC 系统中零电压矢量的作用,零电压矢量能减小定子磁链幅值和转矩,因此,当 $\varphi = 0$ 、 $\tau = 0$ 时可以选择零电压矢量以满足控制需求。为使 DTC 系统开关次数最小,提出了一种选择零电压矢量的策略,给出了一种新型优化开关表。仿真结果表明新型优化开关表能满足 DTC 系统的控制要求,并且能减小开关次数,进而降低开关损耗。

【参 考 文 献】

- [1] MOHAND, ZHANG X, FOO G H B. A simple duty cycle control strategy to reduce torque ripples and improve low - speed performance of a three - level inverter fed DTC IPMSM drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2709-2721.
- [2] ZHANG X, FOO G H B. A constant switching frequency - based direct torque control method for interior permanent - magnet synchronous motor drives [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(3): 1445-1456.
- [3] 孙笑辉,张曾科,韩曾晋. 基于直接转矩控制的感应电动机转矩脉动最小化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 110-113.
- [4] 田淳,胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制系统理论及控制方案的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(1): 7-11.
- [5] 贾洪平,贺益康. 永磁同步电机直接转矩控制中零矢量的作用研究[J]. 电气传动, 2006, 36(4): 13-16.
- [6] 卢达,赵光宙,李楠. 包含零矢量的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(9): 1-6.
- [7] 杨建飞,胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制转矩调节器设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 76-81.
- [8] 赵宏革,朱景伟,樊印海. 直接转矩控制系统零电压矢量的调节作用[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36(2): 71-74.
- [9] 雷彦,齐蓉. 永磁同步电动机直接转矩控制零矢量的应用研究[J]. 微特电机, 2008, 36(5): 40-42.
- [10] 高靖凯,林荣文,张润波. 永磁同步电机直接转矩控制的研究及算法改进[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(11): 16-20.
- [11] 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(6): 48-51.
- [12] LI Y H, MA J, LIU J, et al. Study on the use of zero voltage vectors in the PMSM DTC system [C] // Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, Yantai, 2011: 3559-3564.
- [13] 李耀华,刘卫国. 零电压矢量在 PMSM 直接转矩控制系统中的应用[J]. 电力电子技术, 2010, 44(9): 50-51, 62.
- [14] 李耀华,徐淑萍,刘卫国. 一种新颖的永磁同步电动机直接转矩控制策略[J]. 电气传动, 2007, 37(6): 20-23.
- [15] TANG L, ZHONG L, MAHAMN 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 Trans Power Electron, 2004, 19(2): 346-354.

收稿日期: 2017 -05 -03