

基于预测控制的 SPMSM 直接转矩控制最优电压矢量选择策略^{*}

李耀华, 师浩浩, 孟祥臻, 焦 森, 曲亚飞
(长安大学, 陕西 西安 710064)

摘 要: 针对传统开关表实现的表贴式永磁同步电机直接转矩控制中不合理转矩脉动的问题, 提出了最优电压矢量选择策略。依据电压矢量对转矩和磁链的作用规律得到电压矢量选择区间表, 建立了磁链和转矩误差成本函数, 基于预测控制对区间内的电压矢量进行最优选择, 并采用空间矢量调制技术实现。仿真结果表明: 所提最优电压矢量选择策略可完全消除因开关表选择电压矢量不当引起的不合理转矩脉动, 使得转矩平均误差降低 58%、峰值误差降低 67%, 定子磁链幅值均值误差降低 28%、峰值误差降低 53%, 同时由于采用了空间矢量调制技术, 从而使得逆变器开关频率恒定。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 不合理转矩脉动; 最优电压矢量; 预测控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0021-06

Optimum Voltage Vector Selection Strategy for Direct Torque Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Predictive Control^{*}

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

Abstract: The optimal voltage vector selection strategy was proposed for the problem of unreasonable torque ripple in direct torque control of surface permanent magnet synchronous motor realized by traditional switch table. According to the law of voltage vector and flux linkage, the voltage vector selection interval table was obtained, and the cost function of flux linkage and torque error was established. Based on the predictive control, the voltage vector in interval was selected optimally, and achieved by the space vector modulation technique. The simulation results showed that the optimal voltage vector selection strategy proposed can completely eliminate the unreasonable torque ripple caused by the improper selection of the voltage vector of the switch table, the average error of the torque was reduced by 58% and the peak error was reduced by 67%, the average error of the stator flux decreases by 28% and the peak error was reduced by 53%. At the same time, the use of space vector modulation technology makes the inverter switching frequency constant.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM); unreasonable torque ripple; optimal voltage vector; predictive control

0 引 言

应用于表贴式永磁同步电机 (Surface

Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM) 的直接转矩控制具有诸多优点: 控制结构简单、动态响应快、电机参数依赖度较低, 并且不需要实时的

^{*} 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, 研究方向为电机控制技术。

师浩浩 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直接转矩电机控制技术中电压矢量的选择策略。

孟祥臻 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直接转矩电机控制技术中电压矢量的选择策略。

转子位置信息和坐标变换^[1-2]。但是在实际应用中,转矩波动大、磁链波动大、开关频率不恒定等缺点也一直存在。通过逆变器所产生的6个基本电压矢量对定子磁链和转矩的控制是基于传统开关表的控制策略,而传统开关表所选择的基本电压矢量在特定情况下会出现对转矩的控制失效,产生不合理的转矩脉动^[3]。所以,为了提高直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)系统的性能,需研究电压矢量的最优选择策略^[4-8]。

本文首先建立的 SPMSM-DTC 电压矢量的选择区间是基于电压矢量对转矩、磁链的作用规律的。随后又建立了与磁链、转矩的各自误差相关的成本函数,使用预测控制对相应区间内的电压矢量作最优选择。最后通过空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)技术合成所需的电压矢量。Simulink 仿真结果表明,本文所采用的最优电压矢量选择策略可以有效降低转矩脉动,并且可以使逆变器开关频率恒定。

1 电压矢量选择区间

相较于内置式永磁同步电机(Interior Permanent Maqnent Synchronous Motor, IPMSM), SPMSM 的电磁转矩只有励磁转矩项,其大小与定子磁链矢量和转子磁链矢量的交叉积成正比。定义式(1)来表示离散系统中的 SPMSM 电磁转矩,其中 l 为常数。

$$T_e(k) = l \cdot \psi_s(k) \times \psi_r(k) \tag{1}$$

施加电压矢量 Δt 时间后,电磁转矩可用式(2)表示:

$$T_e(k+1) = l \cdot \psi_s(k+1) \times \psi_r(k+1) \tag{2}$$

由于 SPMSM 转子磁链为永磁体,且机械周期相对于电周期很大,忽略转子磁链在 Δt 时间内幅值和角度的变化,则式(3)成立^[9]:

$$\psi_r(k+1) \approx \psi_r(k) \tag{3}$$

忽略定子电阻压降,施加电压矢量 Δt 时间后,定子磁链如式(4)所示:

$$\psi_s(k+1) \approx \psi_s(k) + V_s(k) \cdot \Delta t \tag{4}$$

定义定子磁链矢量 ψ_s 与施加的电压矢量 V_s 之间夹角为 α 。由式(4)可知电压矢量增加或减小定子磁链幅值由 α 决定:当 $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时,电压矢量增加定子磁链幅值;当 $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ 时,电压矢量减小定子磁链幅值。

由式(2)~式(4)可得施加电压矢量 Δt 时间后,SPMSM 电磁转矩如式(5)所示:

$$\begin{aligned} T_e(k+1) &\approx l \cdot \psi_s(k) \cdot \psi_r(k) + \\ &l \cdot V_s(k) \cdot \Delta t \times \psi_r(k) = \\ T_e(k) &+ l \cdot V_s(k) \cdot \Delta t \times \psi_r(k) \end{aligned} \tag{5}$$

由式(1)和式(5)可得,施加电压矢量引起的转矩的变化如式(6)所示:

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_e(k+1) - T_e(k) = \\ &l \cdot V_s(k) \cdot \Delta t \times \psi_r(k) = \\ &l \cdot \Delta t \cdot \widehat{V_s}(k) \cdot \widehat{\psi_r}(k) \cdot \sin \beta \end{aligned} \tag{6}$$

其中, β 为转子磁链矢量 ψ_r 与施加的电压矢量 V_s 之间的夹角。

由式(6)可知,施加的电压矢量增加或减小转矩由 β 决定。当 $0^\circ < \beta < 180^\circ$ 时,电压矢量增加转矩;当 $-180^\circ < \beta < 0^\circ$ 时,电压矢量减小转矩。

由此可得,电压矢量对 SPMSM 定子磁链和转矩的作用规律如下:当 α 在 $(0^\circ, 90^\circ)$ 内,施加电压矢量增加定子磁链和转矩;当 α 在 $(90^\circ, 180^\circ - \delta)$ 内,施加电压矢量减小定子磁链并增加转矩;当 α 在 $(180^\circ, 270^\circ)$ 内,施加电压矢量降低定子磁链和转矩;当 α 在 $(270^\circ, 360^\circ - \delta)$ 内,施加电压矢量增加定子磁链,减小转矩,其中 δ 为定子磁链与转子磁链之间的夹角,即转矩角。

依据上述规律,可得出 SPMSM 直接转矩控制系统电压矢量选择区间,如图 1 所示。区间内的电压矢量对转矩和定子磁链的增减规律如表 1 所示。

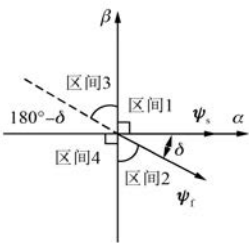


图 1 电压矢量选择区间划分

表 1 区间内电压矢量作用规律

电压矢量区间	定子磁链	转矩
区间 1	↑	↑
区间 2	↑	↓
区间 3	↓	↑
区间 4	↓	↓

2 最优电压矢量选择策略

由式(4)可知,施加电压矢量 Δt 时间后,定

子磁链如图 2 所示。

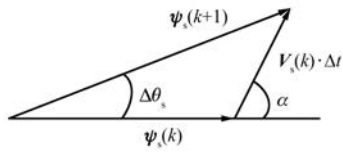


图 2 定子磁链的变化

由图 2 可知,电压矢量 V_s 作用下,第 $(k+1)$ 时刻定子磁链幅值 $\hat{\psi}_s(k+1)$ 和转矩角 $\delta(k+1)$ 如式(7)和式(8)所示:

$$\hat{\psi}_s(k+1) = \hat{\psi}_s(k) \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha},$$

$$q = \hat{V}_s(k) \cdot \Delta t / \hat{\psi}_s(k) \quad (7)$$

$$\delta(k+1) \approx \delta(k) + \Delta\delta = \delta(k) + \arcsin \frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha}} \quad (8)$$

其中, $\hat{\psi}_s(k)$ 、 $\delta(k)$ 和 $\hat{V}_s(k)$ 为第 k 时刻定子磁链幅值、转矩角和电压矢量幅值。

由式(7)、式(8)和 SPMSM 转矩方程可得 $(k+1)$ 时刻电磁转矩如式(9)所示:

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_f}{2L_d} \hat{\psi}_s(k+1) \sin[\delta(k+1)] =$$

$$\frac{3p\psi_f}{2L_d} \hat{\psi}_s(k) \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha} \cdot \sin\left[\delta(k) + \arcsin \frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1 + q^2 + 2q\cos\alpha}}\right] \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可知,在施加电压矢量幅值固定的条件下,SPMSM 第 $(k+1)$ 时刻定子磁链幅值和转矩仅由施加电压矢量与当前定子磁链矢量之间夹角 α 唯一决定,即可通过不同的 α 预测出下一时刻的定子磁链幅值和转矩。

这里定义 SPMSM-DTC 系统转矩和磁链误差成本函数如式(10)所示:

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e^* - T_e(k+1)}{T_e^*}\right]^2 + \left[\frac{\hat{\psi}_s^* - \hat{\psi}_s(k+1)}{\hat{\psi}_s^*}\right]^2} \quad (10)$$

式中: T_e^* ——系统的参考转矩;

$\hat{\psi}_s^*$ ——定子磁链幅值。

由式(10)可知,成本函数 g 是电压矢量与定子磁链夹角 α 的函数,从而可以预测得出施加不

同角度的电压矢量下成本函数的值。

本文提出了一种 SPMSM-DTC 最优电压矢量选择策略,其电压矢量的选择过程如图 3 所示。

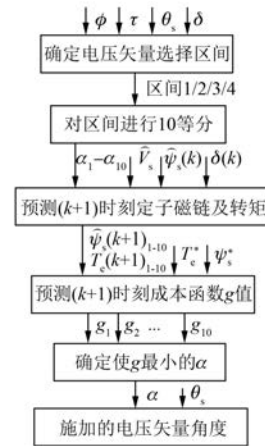


图 3 最优电压矢量预测选择流程

电压矢量选择的具体流程如下:

(1) 基于转矩和磁链滞环比较器的输出以及定子磁链位置和转矩角,确定相应的电压矢量选择区间。

(2) 对选择的区间进行 n 等分,获得下一时刻施加电压矢量的 n 个角度 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ 。在空间矢量调制线性调制范围内,固定施加电压矢量的幅值 $\hat{V}_s$ 。理论上,对区间进行等分时, n 取得越大,计算精度越高,但同时计算复杂度也会增加,实时性也难以保证。在本文中,选取 $n=10$ 。

(3) 根据当前时刻的定子磁链幅值 $\hat{\psi}_s(k)$ 和转矩角 $\delta(k)$,将 10 个不同的 α 分别代入式(7)中和式(9)中,则可预测得出下一时刻的定子磁链幅值 $\hat{\psi}_s(k+1)_1, \dots, \hat{\psi}_s(k+1)_{10}$ 和转矩 $T_e(k+1)_1, \dots, T_e(k+1)_{10}$ 。

(4) 将得出的定子磁链幅值和转矩及参考定子磁链幅值 $\hat{\psi}_s^*$ 和参考转矩 T_e^* 代入式(10),则可预测得出下一时刻施加不同角度的电压矢量下的成本函数 $g_1, \dots, g_{10}$ 。

(5) 选择使评价函数最小的 α 值,并由 α 和定子磁链位置信息确定施加的电压矢量角度。

上述最优电压矢量选择策略所得到的电压矢量的角度在静止坐标系下并非是固定值,可以是 $[0^\circ, 360^\circ]$ 区域内的任意值。电压源逆变器只能生成 6 个不同的相角的非零电压矢量,所以所需的电压矢量需要采用空间矢量调制技术合成。

为了最大程度利用直流母线电压,本文合成电压矢量的幅值为逆变器 6 个非零电压矢量形成的六边形内切圆的半径,幅值保持不变,如图 4 所示。

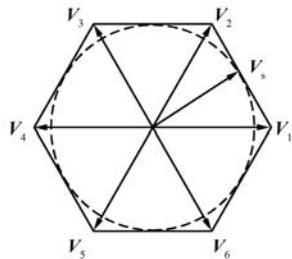


图 4 施加电压矢量幅值

基于预测控制的 SPMSM-DTC 最优电压矢量选择策略系统如图 5 所示。

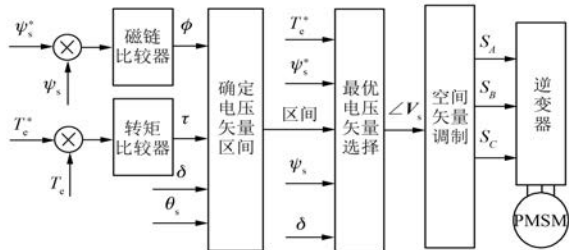


图 5 预测控制 DTC 系统框图

3 建模及仿真

对实现最优电压矢量选择策略的 DTC 系统进行建模仿真:系统采样周期为 $2e-5$ s;参考转速为 60 r/min;参考转矩在 0~0.5 s 为 10 N·m,在 0.5~1 s 为 30 N·m;参考定子磁链幅值为 0.3 Wb;转矩滞环宽度为 0.01 N·m;定子磁链幅值滞环宽度为 0.001 Wb。电机参数如表 2 所示。

表 2 电机参数	
参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.02
dq 轴电感/H	[8.5e-38.5e-3]
转子磁链幅值/Wb	0.175
极数	4

转速、转矩、定子磁链以及电流等仿真结果如图 6~图 11 所示。

从图 6~图 11 中可知,电机转速、转矩、定子磁链以及电流的变化符合预期,仿真结果表明所建立模型以及最优电压矢量选择策略的可行性。

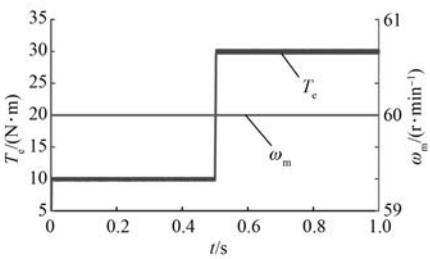


图 6 电机转速和转矩

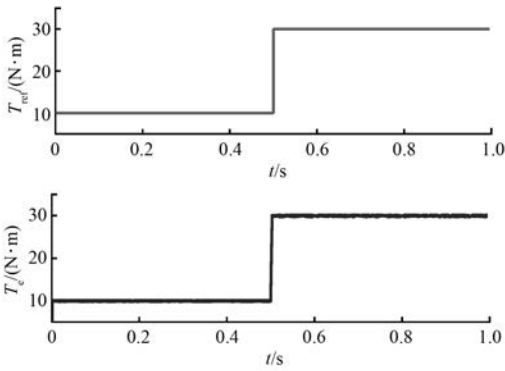


图 7 电机参考转矩与实际转矩

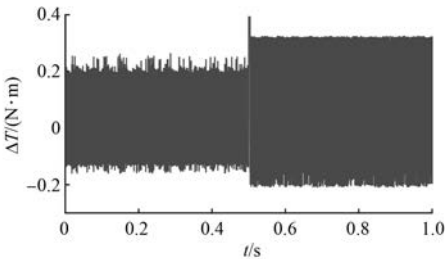


图 8 电机转矩误差

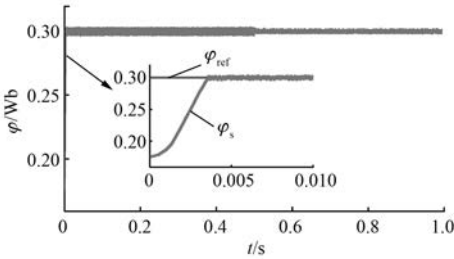


图 9 定子磁链幅值的变化

对最优电压矢量的有效性进行验证,对比最优电压矢量与开关表选择的电压矢量所得到的成本函数式(10)的值, g 值如图 12 所示。最优电压矢量 g 值的平均值为 0.069,开关表选择的电压矢量 g 值的平均值为 0.252。证实了所建立成本函数以及最优电压矢量选择策略的有效性。

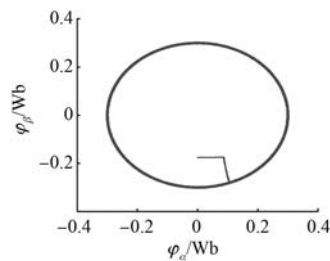


图 10 磁链圆

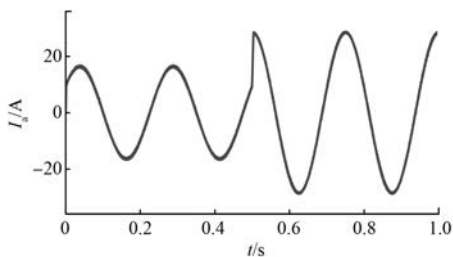


图 11 A 相电流波形

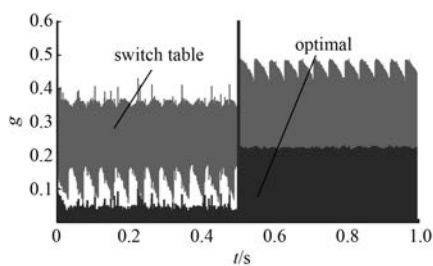


图 12 g 值对比

在 SPMSM 中,传统开关表实现的 DTC 会在转矩角大于 30°时出现不合理转矩脉动^[10]。在 0.5 s 之后转矩角达到 55°,从图 13 中可以看出最优电压矢量选择策略可以有效消除因开关表选择电压矢量不当引起的不合理转矩脉动,并减少转矩误差。

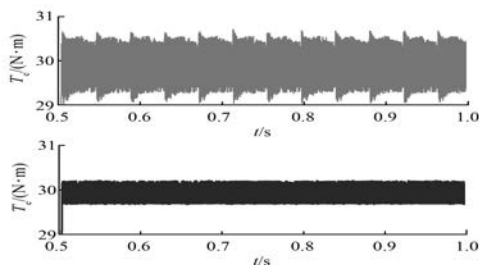


图 13 0.5~1.0 s 时开关表以及最优电压矢量的转矩波形

在同等条件和采样周期下,对开关表 and 最优电压矢量选择两种策略的转矩和定子磁链幅值的平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage

Error, MAPE) 进行对比,结果如表 3 所示。最优电压矢量下转矩误差降低 58.4%,定子磁链误差降低 28.7%。选择 0.6~0.9 s 对转矩及定子磁链误差的峰峰值 (Peak-Peak) 进行对比,结果如表 3 所示,最优电压矢量下转矩峰值误差降低 67%,定子磁链峰值误差降低 53%。说明了最优电压矢量选择策略可以有效地降低转矩和定子磁链误差。

表 3 转矩以及磁链误差对比

评价指标	开关表	最优电压	优化率/%
转矩 MAPE	1.983%	0.824%	58.4
磁链 MAPE	0.630%	0.449%	28.7
转矩 Peak-Peak (0.6~0.9 s)	0.97 N·m	0.32 N·m	67
磁链 Peak-Peak (0.6~0.9 s)	0.004 9 Wb	0.002 3 Wb	53

A 相电压如图 14 所示。开关频率与采样频率一致,保持恒定。

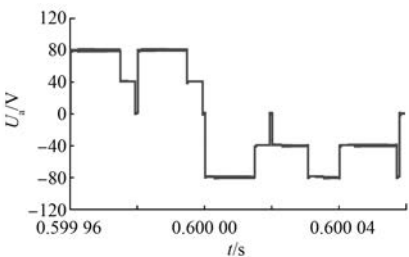


图 14 A 相电压波形 (对中性点)

4 结 语

本文通过对 SPMSM 数学模型进行分析,得到电压矢量对转矩和定子磁链的作用规律;之后根据上述规律制定了新的电压矢量选择区间表,并基于预测控制建立最优电压选择策略对区间内的电压进行优选。Simulink 仿真结果表明最优电压矢量选择策略的可行性以及有效性,与传统开关表策略对比,本文提出的最优化电压选择策略能够有效地消除因开关表选择电压矢量不当引起的不合理转矩脉动,转矩误差降低 50% 以上,定子磁链幅值误差降低 13% 以上,有效地降低转矩和定子磁链幅值误差,并使得开关频率恒定。

【参考文献】

[1] SIAMI M, KHABURI D A, RODRIGUEZ J. Torque ripple reduction of predictive torque control for PMSM

- drives with parameter mismatch [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32 (9): 7160-7168.
- [2] FENG G, LAI C, KAR N C. An analytical solution to optimal stator current design for PMSM torque ripple minimization with minimal machine losses [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (10): 7655-7665.
- [3] 李耀华, 马建, 刘晶郁, 等. 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): 43-49.
- [4] KRISHNAVENI D, SIVAPRAKASAM A, MANIGANDAN T. Optimum voltage vector selection in direct torque controlled PMSM using intelligent controller [C] // International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering, IEEE, 2014: 1-6.
- [5] ZHANG Y, LIU J, YUAN G, et al. An improved model predictive control with duty cycle control for PMSM drives [C] // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, 2016: 1-5.
- [6] 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]. Power Electronics IEEE Transactions on, 2015, 30 (4): 2182-2190.
- [7] 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.
- [8] 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, 2011, 59 (2): 871-877.
- [9] GUPTA N P, GUPTA P. Performance analysis of direct torque control of PMSM drive using SVPWM - inverter [C] // IEEE, India International Conference on Power Electronics, IEEE, 2013: 1-6.
- [10] LI Y H, JIAO S, QU Y F. Study on suppressing unreasonable torque ripple in SPMSM-DTC system [C] // Chinese Control Conference, 2017: 4780-4785.
- 收稿日期: 2017 -12 -04
-
- (上接第 5 页)
- [6] 荀倩, 秦海鸿, 马亚飞, 等. 基于最优转矩控制六相永磁容错电机故障补救策略的仿真研究 [J]. 电源学报, 2015, 13 (1): 28-34.
- [7] 郝振洋, 胡育文, 黄文新, 等. 永磁容错电机最优电流直接控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (6): 46-51.
- [8] BIANCHI N, BOLOGNANI S, PRE M D P. Impact of stator winding of a five-phase permanent-magnet motor on postfault operations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (5): 1978-1987.
- [9] 任元, 孙玉坤, 朱纪洪. 四相永磁容错电机的 SVPWM 控制 [J]. 航空学报, 2009, 30 (8): 1490-1496.
- [10] 司宾强, 吉敬华, 朱纪洪, 等. 四相永磁容错电机的两种容错控制方法 [J]. 控制与决策, 2013 (7): 1007-1012.
- [11] 赵品志, 杨贵杰, 李勇. 五相永磁同步电动机单相开路故障的容错控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (24): 68-76.
- [12] RYU H M, KIM J W, SUI S K. Synchronous-frame current control of multiphase synchronous motor under asymmetric fault condition due to open phases [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42 (4): 1062-1070.
- [13] 吴一丰, 邓智泉, 王宇, 等. 六相永磁容错磁通切换电机及其单相故障的容错控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (3): 71-79.
- [14] 谢德娥, 王宇, 邓智泉. 考虑反电动势 2 次谐波的容错型磁通切换电机开路及短路故障控制策略 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (14): 130-138.
- [15] 王霞, 朱景伟, 曹林柏, 等. 双绕组永磁容错电机矢量控制及其容错策略分析 [J]. 电机与控制应用, 2015, 42 (2): 21-25.
- [16] 李小庆, 朱景伟, 孙军浩, 等. 双绕组永磁容错电机矢量控制系统研究 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (5): 26-34.
- [17] 郝振洋, 胡育文, 沈天珉. 永磁容错电机的直接转矩控制策略 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (3): 180-188.
- [18] 白洪芬, 朱景伟, 秦俊峰. 永磁同步电机开路故障容错补偿控制 [J]. 交通运输工程学报, 2016, 16 (6): 55-62.
- [19] 蒋家强, 曹建福. 永磁同步电机矢量控制及其仿真研究 [J]. 电气开关, 2011, 49 (4): 51-53.
- 收稿日期: 2017 -12 -04