

# 基于虚拟电压矢量的磁场定向控制策略研究

李超男<sup>1</sup>, 关新<sup>2</sup>, 于占洋<sup>2</sup>, 吕安楠<sup>2</sup>, 李岩<sup>1\*</sup>

(1. 沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

## Research on Field Orientation Control Strategy Based on Virtual Voltage Vector

LI Chaonan<sup>1</sup>, GUAN Xin<sup>2</sup>, YU Zhanyang<sup>2</sup>, LV Annan<sup>2</sup>, LI Yan<sup>1\*</sup>

(1. National Engineering Research Center for REPM Electrical Machines, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Aiming at the harmonic problem of stator phase current in the vector control system of a dual three-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM), a magnetic field oriented control strategy based on the space vector pulse width modulation (SVPWM) algorithm with the maximum four-vector is proposed on the basis of using a conventional two-vector SVPWM algorithm. Secondly, to solve the problem of large computation and complex design of the SVPWM algorithm with maximum four vectors, an improved magnetic field oriented control strategy based on the SVPWM algorithm with virtual voltage vector is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed improved control algorithm strategy is verified by MATLAB/Simulink simulation platform.

**Key words:** dual three-phase permanent magnet synchronous motor; space vector pulse width modulation (SVPWM); virtual voltage vector; field orientation control strategy

**摘要:** 针对双三相永磁同步电机(PMSM)矢量控制系统中定子相电流的谐波问题,在采用传统两矢量空间矢量脉宽调制算法的基础上,提出基于最大四矢量的空间矢量脉宽调制算法的磁场定向控制策略。其次,针对最大四矢量的空间矢量脉宽调制算法计算量大,设计复杂的问题,又提出了基于虚拟电压矢量的空间矢量脉宽调制算法的改进型磁场定向控制策略。最后,通过 MATLAB/Simulink 仿真平台,验证所提出的改进型控制算法策略的有效性。

**关键词:** 双三相永磁同步电机; 空间矢量脉宽调制; 虚拟

电压矢量; 磁场定向控制策略

## 0 引言

多相电机驱动系统相较于三相电机驱动系统,具有额定功率更大、转矩脉动更低、容错性能更好的优点<sup>[1-6]</sup>。多相永磁同步电机凭借其效率高、响应速度快以及发生故障之后无需改变外部硬件结构就可以进行容错运行等诸多优势<sup>[7]</sup>,广泛应用于电力系统<sup>[8]</sup>、航空航天<sup>[9]</sup>和船舶推进系统<sup>[10-12]</sup>等要求严格的场合。在多相电机驱动控制系统控制策略的研究中,更加致力于设计尽可能消除低次谐波分量的算法,以降低电机的损耗<sup>[13]</sup>。其中,在双三相永磁同步电机磁场定向控制系统中,空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法的多相化推广是较为广泛的控制策略之一<sup>[14]</sup>。

文献[15]提出了六矢量 SVPWM 控制算法,用来控制五相永磁同步电机系统,通过在两个平面选取不同的基本电压矢量进行基波与三次谐波电压分量的合成,实现了对三次谐波电流的闭环控制。文献[16]为了降低双三相永磁同步电动机的谐波电流,提出了一种基于矢量空间分解方法的空间矢量脉宽调制技术,电机的分析和控制在三个二维正交子空间中完成。文献[17]采用一种新提出的基于 48 扇区矢量空间分解的 SVPWM 技术对六相非对称异步电动机进行控制,可以在很大程度上减少不必要的定子电流。文献[18]推导了六相非对称异步电动机驱动的

基金项目: 营口市企业博士双创计划项目(200072413)

Yingkou City Enterprise Doctors Entrepreneurship and Innovation Program Project (200072413)

新型 SVPWM 开关序列,减少了开关损耗。文献 [19]提出了一种基于集成电压矢量的 SVPWM 方法,使具有源中性点钳位的五电平逆变器的直流链路与共模电压脉动实现最小化。文献 [20]结合多模式 SVPWM 策略的特点,提出基于  $q$  轴电流偏差的磁场定向校正策略,此策略适应于双三相感应电机低开关频率的条件。

传统的双三相 SVPWM 调制算法策略的核心思想是采取基波子平面两个邻近最大幅值的电压矢量对参考电压进行合成,因此也被称为两矢量 SVPWM 算法。但是双三相电机数学模型是一个多维系统,这种方法只考虑了保证基波电压具有较高的正弦性,并没有考虑如何抑制谐波电压,从而使输出的定子电流具有大量谐波,增大了电机损耗。因为双三相 PMSM 的机电能量转换只与基波子空间上的电流矢量有关,在谐波子空间上的电流只产生谐波损耗,因此,SVPWM 算法电压矢量选取的标准为:在一个开关周期内,在基波子空间内合成的电压矢量最大,并且在谐波子空间内合成的电压矢量最小。四矢量 SVPWM 算法就是在两矢量 SVPWM 算法的基础上增加两个基本电压矢量,通过增加的电压矢量来抵消在谐波子空间上形成的电压作用效果。

由于不对称双三相永磁同步电机在结构上消除了 6 次转矩波动,在抑制转矩波动上有着更大的优势,本文以其为研究对象,制定四矢量 SVPWM 算法策略。首先采用矢量空间解耦方法 (VSD) 对双三相永磁同步电机数学模型进行降阶处理;然后设计最大四矢量 SVPWM 算法策略;最后,针对最大四矢量 SVPWM 算法策略计算量大,设计复杂的问题,对其进行简化,设计基于虚拟电压矢量的四矢量 SVPWM 算法策略,使控制系统依旧具有良好的稳态性能。

## 1 电机数学模型

双三相永磁同步电机数学模型在自然坐标系下是一个复杂高耦合的多变量系统,文中采用基于空间矢量解耦 (VSD) 建模的方法将自然坐标系下的数学方程分解到三个互相正交的子平面上,即基波 ( $\alpha-\beta$ ) 子平面、谐波 ( $x-y$ ) 子平面、零序 ( $o1-o2$ ) 子平面。

其中,基波和  $12k\pm 1(k=1,2,3,\dots)$  次谐波被

映射到  $\alpha-\beta$  子平面,这是定、转子之间产生机电能量转换的子平面; $6k\pm 1(k=1,3,5,\dots)$  次谐波被映射到  $x-y$  子平面上,这个子平面与电机的机电能量转换无关; $6k\pm 3(k=1,3,5,\dots)$  次谐波分量都被映射到  $o1-o2$  子平面上,且不参与电机的机电能量转换,属于零序分量。

经过 VSD 坐标变换计算,得出同步旋转坐标系下的双三相永磁同步电机的  $d-q$  子平面电压方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_d \\ \mathbf{u}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e L_q i_q \\ \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$x-y$  子平面电压方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_x \\ \mathbf{u}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_z & 0 \\ 0 & L_z \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = 3p_n i_q [i_d(L_d - L_q) + \psi_f] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}_d, \mathbf{u}_q, \mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y$  分别为  $d-q$  和  $x-y$  子平面的定子电压; $i_d, i_q, i_x, i_y$  分别为  $d-q$  和  $x-y$  子平面的定子电流; $L_d, L_q$  分别为同步旋转坐标系下的电感; $L_z$  为漏感; $\omega_e$  为电角速度; $R$  为定子电阻; $\psi_f$  为永磁体在每一相绕组中产生的磁链幅值; $T_e$  为电磁转矩; $p_n$  为极对数。

式(1)、(2)、(3)是双三相永磁同步电机实现完全解耦的数学模型,可以采用与三相永磁同步电机控制系统相同的控制策略。

## 2 四矢量 SVPWM 调制算法

### 2.1 最大四矢量 SVPWM 调制算法策略

定义  $\alpha-\beta$  子平面最外侧电压矢量为大矢量  $\mathbf{v}_{\max}$ ,由外及最内侧分别为中大矢量  $\mathbf{v}_{\text{midL}}$ 、中小矢量  $\mathbf{v}_{\text{midS}}$ 、小矢量  $\mathbf{v}_{\min}$ , $U_{\text{dc}}$  为直流母线电压,它们的幅值关系为

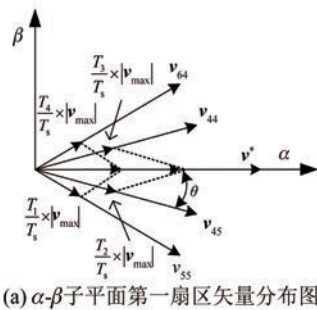
$$\begin{cases} |\mathbf{v}_{\max}| = \frac{\sqrt{2}(\sqrt{3} + 1)}{6} U_{\text{dc}} \\ |\mathbf{v}_{\text{midL}}| = \frac{\sqrt{2}}{3} U_{\text{dc}} \\ |\mathbf{v}_{\text{midS}}| = \frac{1}{3} U_{\text{dc}} \\ |\mathbf{v}_{\min}| = \frac{\sqrt{2}(\sqrt{3} - 1)}{6} U_{\text{dc}} \end{cases} \quad (4)$$

为了尽可能最大限度利用直流母线电压, 选取  $\alpha$ - $\beta$  子平面最外侧的 12 个幅值最大矢量作为基本矢量合成参考电压。这些基本矢量对应  $x$ - $y$  子平面最小幅值的电压矢量, 通过求解如式 (5) 所示线性方程组来获得各个矢量的作用时间。

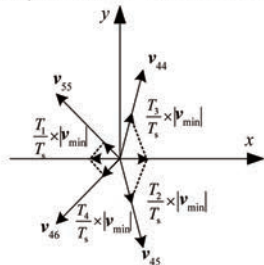
$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha^1 & v_\alpha^2 & v_\alpha^3 & v_\alpha^4 & v_\alpha^5 \\ v_\beta^1 & v_\beta^2 & v_\beta^3 & v_\beta^4 & v_\beta^5 \\ v_x^1 & v_x^2 & v_x^3 & v_x^4 & v_x^5 \\ v_y^1 & v_y^2 & v_y^3 & v_y^4 & v_y^5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot T_s \quad (5)$$

式中:  $t_k$  是作用在第  $k$  个电压矢量上的时间,  $k = 1, 2, 3, 4$ ;  $t_0$  为零矢量作用时间;  $v_\alpha^k, v_\beta^k, v_x^k, v_y^k$  分别是第  $k$  个电压矢量在  $\alpha$  轴、 $\beta$  轴、 $x$  轴、 $y$  轴上的投影,  $k = 1, 2, \dots, 5$ ;  $v_\alpha^*, v_\beta^*$  分别是参考电压矢量在  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴上的投影;  $T_s$  是采样周期。

以参考电压矢量在第一扇区为例, 如图 1 所示, 采用邻近四个大矢量作为基本电压矢量, 通过分配不同的作用时间合成  $\alpha$ - $\beta$  子平面参考电压矢量  $v^*$ , 同时满足在  $x$ - $y$  平面上合成矢量幅值最小的要求。



(a)  $\alpha$ - $\beta$  子平面第一扇区矢量分布图



(b)  $x$ - $y$  子平面第一扇区矢量分布图

图 1 第一扇区空间矢量分布图

Fig. 1 Space vector distribution of the first sector

假设四个基本矢量  $v_{55}, v_{45}, v_{44}, v_{64}$  以及零矢量  $v_0$  的作用时间分别为  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_0$ , 则表达式为

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| \cdot T_s \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta\right) \\ T_2 = \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| \cdot T_s \cdot m \\ T_3 = \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| \cdot T_s \cdot n \\ T_4 = \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}-1)}{2\sqrt{2}U_{dc}} |v^*| \cdot T_s \cdot \sin\theta \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 - T_3 - T_4 \\ m = \left[ \sin\theta + \sqrt{3} \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta\right) \right] \\ n = \left[ \sqrt{3} \sin\theta + \sin\left(\frac{\pi}{6} - \theta\right) \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $|v^*|$  为参考电压幅值;  $\theta$  为参考电压  $v^*$  与扇区中相位较滞后电压矢量的夹角。

在不同扇区上的基本电压矢量对应作用时间如表 1 所示。

表 1 电压矢量的分配

Tab. 1 Distribution of voltage vectors

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
$T_{01}$	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
$T_1$	55	45	44	64	66	26	22	32	33	13	11	51
$T_2$	45	44	64	66	26	22	32	33	13	11	51	55
$T_{02}$	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
$T_3$	44	64	66	26	22	32	33	13	11	51	55	45
$T_4$	64	66	26	22	32	33	13	11	51	55	45	44
$T_{01}$	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

基于 VSD 坐标变换的双三相永磁同步电机矢量控制系统结构框图如图 2 所示, 其中主要包括  $\alpha$ - $\beta$  平面电流调节器与 SVPWM 算法等几个部分。

## 2.2 基于虚拟矢量的 SVPWM 算法策略

$\alpha$ - $\beta$  子平面上的同一相位上的大矢量与中大矢量在  $x$ - $y$  平面上是相位相反的状态, 即可通过分配同一相位的矢量作用时间, 合成新的虚拟电压矢量, 类似于两矢量调制算法。此方法可以在简化计算的同时保留最大四矢量调制算法更好抑制谐波的优点。

以第一扇区为例, 如图 3 所示为基于虚拟矢量的  $\alpha$ - $\beta$  子平面四矢量合成关系。



### 3 仿真验证

为了验证本文提出的基于虚拟电压矢量的四矢量 SVPWM 算法策略,在 MATLAB/Simulink 平台搭建了系统的仿真模型,电机参数如表 3 所示。

表 3 电机参数

Tab. 3 Electric machine parameter

参数名称	参数值
定子电阻 $R/\Omega$	1.4
定子电感 $L_d, L_q/\text{mH}$	8.8
磁链 $\psi_f/\text{Wb}$	0.68
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.015
极对数 $n_p$	3

给定转速为  $\omega_m = 50 \text{ rad/s}$ ,在仿真运行到 0.1 s 时,突加负载转矩  $T_L = 50 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,仿真结果如图 4~7 所示。

图 4 给出了分别采用两矢量与四矢量 SVPWM 算法的电机 A、U 相电流波形结果。

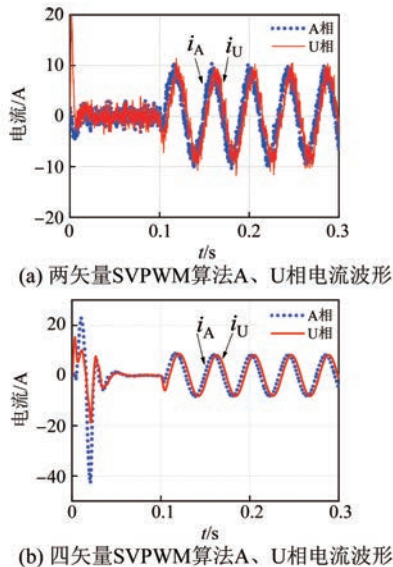


图 4 两种调制算法的相电流比较

Fig. 4 Comparison of phase currents of two modulation algorithms

从波形的平滑程度可以看出,四矢量调制算法的控制效果明显优于两矢量调制算法,可以有效降低谐波,减少系统的损耗。

图 5~7 给出了采用最大四矢量算法与采用基于虚拟电压矢量的四矢量算法的控制系统仿真结果,包括转矩、定子相电流等,并进行对比分析。

图 5 给出了采用两种控制方式的电机电磁转矩的变化趋势,电机起动时的最大转矩分别为

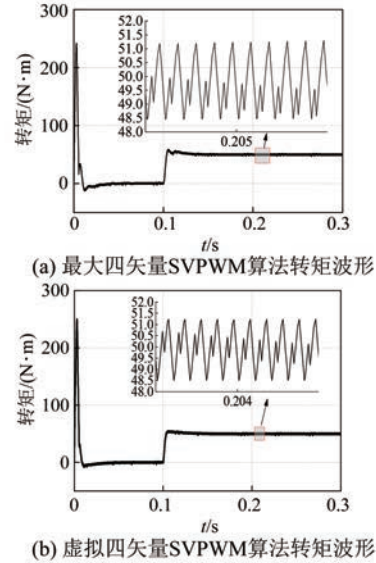


图 5 两种四矢量调制算法的转矩比较

Fig. 5 Torques comparison of two four-vector modulation algorithms

240  $\text{N}\cdot\text{m}$  与 250  $\text{N}\cdot\text{m}$ ,前者在电机起动初期,转矩有细微波动,之后在 0.1 s 时,电磁转矩从 0 上升到 50  $\text{N}\cdot\text{m}$ ,进入平稳运行阶段,转矩脉动分别为 3% 与 2.8%。

图 6 和图 7 分别给出了采用两种控制方式时,A、U 相电流的区别以及 A 相电流的 FFT 分析。

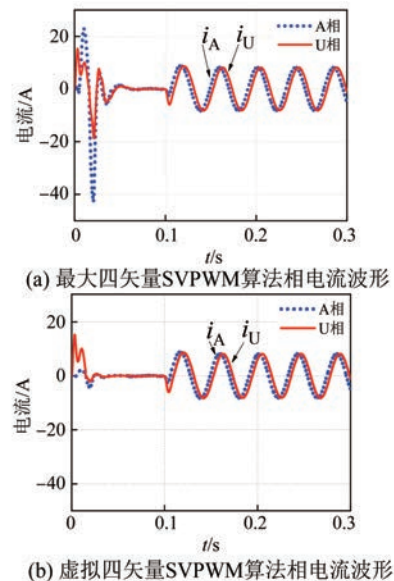


图 6 两种四矢量调制算法的相电流比较

Fig. 6 Phase currents comparison of two four-vector modulation algorithms

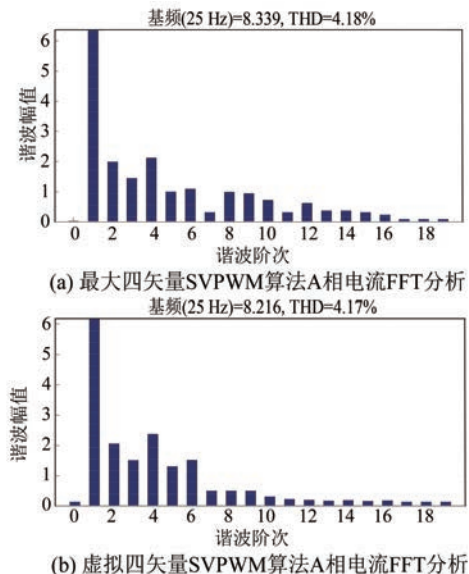


图 7 两种四矢量调制算法 A 相电流 FFT 分析  
Fig. 7 FFT analysis of phase A current with two four-vector modulation algorithms

电机起动时刻,由于转速为零,反电动势为零,电压都作用在阻抗上,所以系统有较大的起动电流,系统在稳定运行阶段,二者的相电流波形都呈正弦且平滑状态。

在仿真时间为 0.25 s 开始的一个周期内对 A 相电流做 FFT 分析。从图 7 可以看出,采用最大四矢量算法控制时,定子电流基波幅值为 8.339 A, THD=4.18%,采用基于虚拟矢量的四矢量算法控制时,定子电流基波幅值为 8.216 A, THD=4.17%,二者在数值方面相差很小。但是由于在一个周期内,每个功率器件只动作一次,无法保证一个周期之内的高低电平一直呈完全对称状态,所以相电流会产生偶次谐波。

## 4 结语

本文针对在采用磁场定向控制策略的双三相永磁同步电机控制系统中,使用两矢量 SVPWM 调制技术时定子电流存在大量谐波的情况,提出了最大四矢量 SVPWM 算法策略。由于最大四矢量 SVPWM 算法策略存在计算量大、设计复杂的问题,又提出了基于虚拟电压矢量的四矢量 SVPWM 算法策略。仿真结果表明,基于虚拟电压矢量的四矢量 SVPWM 算法策略与最大四矢量 SVPWM 算法策略的作用效果几乎相同,对定子电流谐波有着同样良好的抑制效果。

## 参考文献

- [ 1 ] 朱强. 双三相永磁同步电机控制系统的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.  
ZHU Q. Research on control system of double three-phase permanent magnet synchronous motor [ D ]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [ 2 ] LIU C, LUO Y X. A flux constrained predictive control for a six-phase PMSM motor with lower complexity [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5081-5093.
- [ 3 ] PRIYANKA C P, NIYHIN S N, JAGDANAND G. Thermal analysis of multiphase induction motor for electric vehicle applications [ C ] // 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Electric Aircraft Technologies Symposium, 2022.
- [ 4 ] WANG S, IMAI K J, DOKI S J. A novel decoupling control scheme for non-salient multi-three-phase synchronous machines based on multi-stator model [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 886-896.
- [ 5 ] 张倩茹, 王爽. 一种双三相永磁同步电机的多矢量模型预测转矩控制 [ J ]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 29-34.  
ZHANG Q R, WANG S. Multi-vector model predictive torque control for a dual three-phase permanent magnet synchronous motor [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 29-34.
- [ 6 ] 邸琪深, 张志锋. 双三相永磁同步电机合成电压矢量直接转矩控制 [ J ]. 微电机, 2022, 55(4): 39-45.  
DI Q S, ZHANG Z F. Dual three-phase permanent magnet synchronous motor synthesis voltage vector direct torque control [ J ]. Micromotors, 2022, 55(4): 39-45.
- [ 7 ] 王厚军. 多相永磁同步电机磁场解析建模与容错性能分析 [ J ]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 60-67.  
WANG H J. Magnetic field analytical modeling and fault tolerance analysis of multiphase permanent magnet synchronous motor [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(10): 60-67.
- [ 8 ] IGOR B, JORG K, HANS G H, et al. Operational availability and performance analysis of the multi-drive multi-motor electric propulsion system of an

- icebreaker gas tanker for arctic [ C ] // 2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2019.
- [ 9 ] WANG L, ALEKSANDROV S, TANG Y, et al. Fault-tolerant electric drive and space-phasor modulation of flux-switching permanent magnet machine for aerospace application [ J ]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(8): 1416-1424.
- [ 10 ] 隗宇, 桂栋. 一种船舶电力推进系统十五相电机矢量控制方法 [ J ]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2022, 45(5): 15-22.
- KUI Y, GUI D. The utility model relates to a 15-phase motor vector control method for Marine electric propulsion system [ J ]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2022, 45(5): 15-22.
- [ 11 ] HASOUN M, AFIA A E, KHAFALLAH M. Performance comparison of two SVPWM strategies based vector space decomposition controlled dual three-phase PMSM for electric ship propulsion [ C ] // 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2019.
- [ 12 ] GABER M, EL-BANNA S H, HAMAD M S, et al. Studying the effect of using multi-phases switched reluctance motor to reduce the torque ripple for ship propulsion system [ C ] // 2020 IEEE PES/IAS Power Africa, 2020.
- [ 13 ] WANG Y, SONG W X, RUAN Z H, et. al. Current harmonic suppression technology for dual three-phase permanent magnet synchronous motor [ C ] // 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2019.
- [ 14 ] 袁雷. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真 [ M ]. 1 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- YUAN L. Modern permanent magnet synchronous motor control principle and MATLAB simulation [ M ]. 1st ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2016.
- [ 15 ] 宗兆伦. 基于谐波电流注入的五相永磁同步电机控制策略研究 [ D ]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- ZONG Z L. Research on control strategy of five-phase permanent magnet synchronous motor based on harmonic current injection [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [ 16 ] HASOUN M, AFIA A E, CHIKH K, et al. A PWM strategy for dual three-phase PMSM using 12-sector vector space decomposition for electric ship propulsion [ C ] // 2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE), 2019.
- [ 17 ] ANKUR D, ARCHANA N. A six phase two level VSI-fed six phase asymmetrical induction motor using 48-sector vector space decomposition based SVPWM [ C ] // 2021 International Conference for Emerging Technology, 2021.
- [ 18 ] SHAIKH M S, RAKESH M. A new switching sequences of SVPWM for six-phase induction motor with features of reduced switching losses [ J ]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(2): 100-107.
- [ 19 ] HALABI L M, HAKAMI S S, LEE K B. Integrated voltage vector-based SVPWM for reliability and performance enhancement of five-level HANPC inverters [ C ] // 2023 IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023.
- [ 20 ] 王琛琛, 王堃, 游小杰, 等. 低开关频率下双三相感应电机矢量控制策略 [ J ]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1732-1741.
- WANG C C, WANG K, YOU X J, et al. Vector control strategy of two-three-phase induction motor at low switching frequency [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1732-1741.

---

收稿日期:2023-06-19

收到修改稿日期:2023-07-28

作者简介:

李超男(1998-),女,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制, Mmlicn@126.com;

\*通信作者:李岩(1962-),男,博士,教授,研究方向为变压器、永磁电机以及工程电磁场, eeliyan@126.com。

