

# 改进虚拟空间矢量法的PMSM模型预测控制策略

万劭琦<sup>1</sup>,汪波<sup>2</sup>,关文卿<sup>2</sup>,陈静波<sup>2</sup>,吕从鑫<sup>1</sup>,董海鹰<sup>1</sup>

(1.兰州交通大学 新能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730070;

2.兰州万里航空机电责任有限公司,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**在航空机电伺服系统中对机电作动器的传统控制大多采用两电平逆变器与PID控制,无法实现对永磁同步电机更高精度控制,针对以上问题与空间矢量调制算法难以解决中点电压平衡的问题,提出了一种基于改进虚拟空间矢量法的模型预测控制方法,并设计了对应的控制策略。通过模型预测控制提高对永磁同步电机的控制响应速度与控制精度,采用输出更趋于正弦波的中点钳位型(NPC)三电平逆变器,利用改进的虚拟空间矢量法(VSVPWM)构建了一种更接近矢量圆的正十二边形虚拟空间矢量图。仿真分析结果表明,改进方法可以实现永磁同步电机低转矩脉动下的稳定运行,同时对中点电压平衡问题有良好控制效果。

**关键词:**三电平逆变器;中点电位;模型预测控制;虚拟电压矢量

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25229

## PMSM Model Predictive Control Strategy Based on Improved Virtual Space Vector Method

WAN Shaoqi<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, GUAN Wenqing<sup>2</sup>, CHEN Jingbo<sup>2</sup>, LÜ Congxin<sup>1</sup>, DONG Haiying<sup>1</sup>

(1. College of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Lanzhou Wanli Airlines Electromechanical Limited Liability Company, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** The traditional control of electromechanical actuator in aviation electromechanical servo system mostly adopts two-level inverter and PID control, which can not achieve higher precision control of permanent magnet synchronous motor. In view of the above problems and the difficulty of space vector modulation algorithm to solve the problem of neutral point voltage balance, a model predictive control method based on improved virtual space vector method was proposed, and the corresponding control strategy was designed. The model predictive control was used to improve the control response speed and control accuracy of the permanent magnet synchronous motor. The neutral point clamped (NPC) three-level inverter with more sinusoidal output was used. The improved virtual space vector pulse width modulation (VSVPWM) was used to construct a dodecagon virtual space vector diagram closer to the vector circle. The simulation results show that the improved method can realize the stable operation of permanent magnet synchronous motor under low torque ripple, and has a good control effect on the midpoint voltage balance problem.

**Key words:** three-level inverter; midpoint potential; model predictive control; virtual voltage vector

机电伺服系统在航空航天领域的应用越来越广泛<sup>[1-2]</sup>,机电作动器是机电伺服系统的执行机构,相比传统的液压作动器,机电作动器具有更高效、集成度更高、更易维护的特点。随着航空机电伺服系统的发展,永磁同步电机因其具有高效率、高功率密度、高控制精度等优点,成为其

中的重要组成部分<sup>[3-4]</sup>。而永磁同步电机的控制策略对于机电作动系统的性能和可靠性具有至关重要的作用。因此,如何更精确稳定地控制永磁同步电机已成为机电伺服系统研究的热点之一<sup>[5-7]</sup>。

在几种多电平结构中,三电平中点钳位(neu-

**基金项目:**甘肃省科技重大专项(21ZD4GA005)

**作者简介:**万劭琦(1998—),男,硕士研究生,Email:wanshaoqi2021@163.com

**通讯作者:**董海鹰(1966—),男,博士,教授,博士生导师,Email:hydong@mail.lzjtu.cn



反作用,中矢量会使中点电压升高,而零矢量与大矢量对中点电压无作用。

### 1.2 传统虚拟空间矢量

虚拟空间矢量图如图3所示,其中虚拟零矢量  $V_0$  由原来的空间矢量  $ppp,ooo$  与  $nnn$  组成,作用期间中点电压不受影响;虚拟小矢量 ( $VS_1, VS_2, VS_3, VS_4, VS_5, VS_6$ ) 由一对中点电压影响相反的正、负小矢量组成,由于采样周期  $T$  很短,可认为1个采样周期内该虚拟小矢量对中点电压无影响,具体虚拟小矢量如下:

$$VS_1 = \frac{1}{2} (poo + onn) \quad (1)$$

由表1可知单个中矢量会对中点电压造成影响,因此虚拟中矢量 ( $VM_1, VM_2, VM_3, VM_4, VM_5, VM_6$ ) 由中矢量与相邻正小矢量组成,在1个采样周期对中点电压无影响,即  $i_a + i_b + i_c = 0$ ,具体虚拟中矢量如下:

$$VM_1 = \frac{1}{3} (onn + pon + ppo) \quad (2)$$

虚拟大矢量 ( $VL_1, VL_2, VL_3, VL_4, VL_5, VL_6$ ) 对中点电压无影响,等于原来的大矢量,即

$$VL_1 = pnn \quad (3)$$

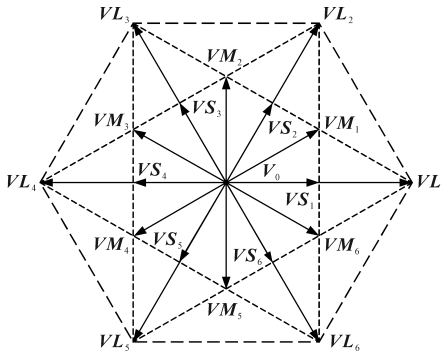


图3 虚拟空间矢量图

Fig.3 Virtual space vector diagram

## 2 改进虚拟空间矢量的模型预测控制策略

### 2.1 模型预测控制

模型预测算法的基本原理是依据当前状态对未来一段时间响应进行预测,取控制序列的第一项作为下一时刻的控制量,再经过滚动优化和反馈校正使预测的响应向着设定的目标接近。具体是将相关变量代入价值函数中计算来完成,然后比较得出有限集中误差最小的变量,使得控制值逐渐接近参考值。

#### 2.1.1 预测模型

模型预测控制性能严重依赖被控对象的数学模型,被控对象参数失配或其他未建模的动态都会影响性能<sup>[23]</sup>。本文以永磁同步电机为对象,在同步旋转  $d-q$  坐标系下其连续域数学模型可以表示为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt} (L_d i_d + \Psi_f) - \omega_r (L_q i_q) \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt} (L_q i_q) - \omega_r (L_d i_d + \Psi_f) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_d, u_q$  分别为  $d, q$  轴输出电压;  $i_d, i_q$  分别为  $d, q$  轴输出电流;  $\Psi_f$  为永磁体磁链;  $R$  为定子电阻;  $\omega_r$  为转子角速度。

输出电流  $i_d, i_q$  利用前向欧拉离散化方法可近似表示为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} \approx \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T_c} \\ \frac{di_q}{dt} \approx \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T_c} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $i_d(k+1), i_q(k+1)$  分别为  $k+1$  时刻  $d, q$  轴输出电流;  $i_d(k), i_q(k)$  分别为  $k$  时刻  $d, q$  轴输出电流;  $T_c$  为输出电流的控制周期。

将式(5)代入式(4),整理可得:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = (1 - \frac{RT_c}{L_d}) i_d(k) + \frac{\omega_r L_q T_c}{L_d} i_q(k) + \frac{T_c}{L_d} u_d(k) \\ i_q(k+1) = -\frac{\omega_r L_d T_c}{L_q} i_d(k) + (1 - \frac{RT_c}{L_q}) i_q(k) + \frac{T_c}{L_q} u_q(k) - \frac{\omega_r \Psi_f T_c}{L_q} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $u_d(k), u_q(k)$  分别为  $k$  时刻空间电压矢量在  $d, q$  轴上的分量。

通过式(6),  $k$  时刻可以计算任意空间电压矢量作用下  $k+1$  时刻输出电流预测值。

#### 2.1.2 有限集模型预测控制

对于传统虚拟空间矢量算法,有限集模型预测算法是对有限集内所有电压矢量进行滚动优化后,选择出对应价值函数最小的电压矢量输出,每次滚动即对有限集中21个电压矢量进行计算,传统模型预测控制算法如图4所示。

预测控制方案按以下步骤进行:

第1步:采样  $k$  时刻的三相输出电流  $i_{abc}(k)$  和

逆变器上、下电容电压  $U_{up}(k), U_{down}(k)$ , 并将输出电流  $i_{abc}(k)$  进行  $abc/dq$  变换得到  $i_d(k), i_q(k)$ ;

第2步: 将21个传统虚拟空间矢量作为电压控制集, 在  $k$  时刻将控制集中每一个电压矢量的  $u_d(k), u_q(k)$  与  $i_d(k), i_q(k)$  代入预测模型式(6), 得到所有有限集中电压矢量对应的  $k+1$  时刻预测电流  $i_d(k+1), i_q(k+1)$ ;

第3步: 将  $i_d(k+1), i_q(k+1)$  与参考电流  $i_d^*(k+1), i_q^*(k+1)$  以及中点上、下电容电压代入价值函数中, 经过计算选取价值函数值最小的基本电压矢量作为最优矢量, 并将其对应的开关序列作用于逆变器。

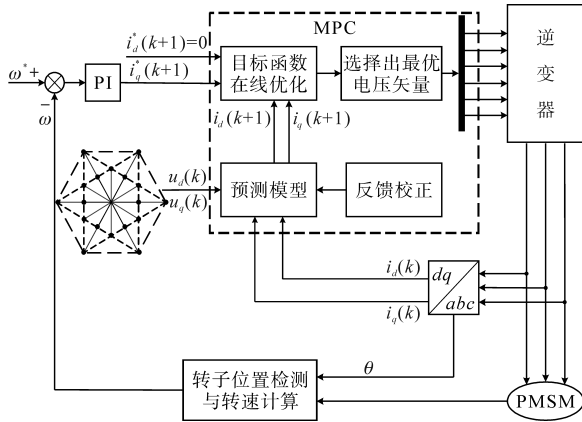


图4 传统模型预测控制算法框图  
Fig.4 Block diagram of traditional model predictive control algorithm

## 2.2 改进虚拟空间矢量法

### 2.2.1 改进虚拟空间矢量法构成

为了适应模型预测控制下对电机的精确控制, 对传统虚拟空间矢量法进行改进, 本文通过合成虚拟矢量构建了更接近圆形的虚拟空间矢量图, 虚拟空间矢量图如图5所示, 改进的虚拟空间矢量由以下5部分矢量组成:

1) 零矢量  $V_0$  不变, 由原本的零矢量组成。

2) 虚拟小矢量由两部分组成, 第1部分与传统虚拟小矢量相同, 由成对的正、负小矢量构成 ( $VS_1, VS_2, VS_3, VS_4, VS_5, VS_6$ ), 正、负小矢量同时作用来抵消对中性点电压的影响, 具体的虚拟小矢量如下式:

$$VS_1 = \frac{1}{2} (poo + onn) \quad (7)$$

3) 第2部分虚拟小矢量 ( $VM_1, VM_2, VM_3, VM_4, VM_5, VM_6$ ) 在传统虚拟中矢量的合成基础上消除对中性点电压的影响, 同时加入了零矢量对虚拟小矢量的作用时间进行调整, 为使目标矢量成为更接近圆的虚拟矢量图, 对中小矢量系数进行

调整, 零矢量系数作为满足时间约束计算得出。具体虚拟小矢量如下:

$$VM_1 = \frac{\sqrt{3}}{6} (pon + ppo + onn) + (1 - \frac{\sqrt{3}}{2}) V_0 \quad (8)$$

4) 虚拟大矢量也由两部分组成, 第1部分由中矢量与相邻大矢量构成, 牺牲了由中矢量对中性点电压所产生的影响, 构成更接近矢量圆的正十二边形空间矢量。具体的虚拟大矢量如下:

$$VL_1 = \frac{1}{3} (pon + ppn + pnn) \quad (9)$$

5) 第2部分大矢量在传统虚拟大矢量的基础上加入零矢量, 对作用时间进行调整并改变对应系数, 从而与第1部分虚拟大矢量模值相同, 其对中性点电压无影响。具体的虚拟大矢量如下:

$$VX_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} pnn + (1 - \frac{\sqrt{3}}{2}) V_0 \quad (10)$$

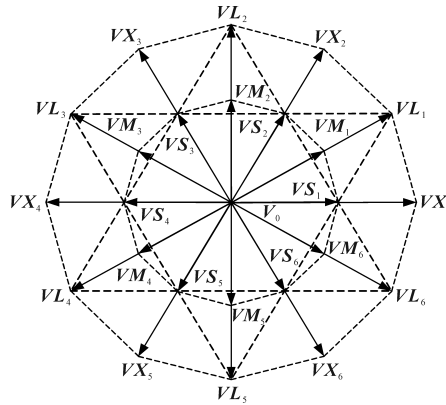


图5 改进的虚拟空间矢量图

Fig.5 Improved virtual space vector diagram

改进后虚拟空间矢量牺牲对少数虚拟大矢量中性点电压的平衡, 但构成更接近矢量圆的正十二边形空间矢量图, 更利于模型预测控制下对电机的精确控制。

### 2.2.2 改进虚拟空间矢量法的中点平衡控制

定义中性点电压为

$$U_{np} = U_{up} - U_{down} \quad (11)$$

图6为中点电压电路分析图。设  $i_0$  所示方向为正向, 当中点电流  $i_0$  为正值时, 电容  $C_1$  充电, 电压  $U_{up}$  增大, 电容  $C_2$  放电, 电压  $U_{down}$  减小, 中点电位  $U_{np} = U_{up} - U_{down} > 0$ ; 当中点电流  $i_0$  为负值时, 电容  $C_1$  放电, 电压  $U_{up}$  减小, 电容  $C_2$  充电, 电压  $U_{down}$  增大, 中点电压  $U_{np} = U_{up} - U_{down} < 0$ 。

平衡方法即依据正、负小矢量对中性点电压的作用互逆的原理, 在每个采样周期中对虚拟小矢量  $VS_1$  内正、负小矢量作用时间进行调节。

一个虚拟小矢量即一对儿正、负小矢量,其总作用时间为一个采样周期。

当  $U_{mp} > 0$  时,增加虚拟小矢量内负小矢量的作用时间,即增加对下电容的充电时间以降低中点电压。当  $U_{mp} < 0$  时,增加虚拟小矢量内正小矢量的作用时间,即增加对上电容的充电时间。

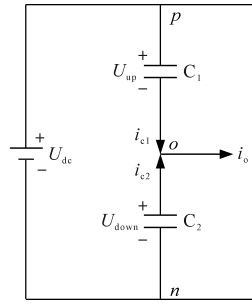


图6 中点电压电路分析图

Fig.6 Analysis diagram of midpoint voltage circuit

### 2.2.3 改进虚拟空间矢量法的模型预测控制

改进算法将电压矢量个数从21个增加至27个,构成更适合电机控制的正十二边形矢量图。同时在模型预测控制中取消了权重系数对电流跟随与中点电压控制的权重,先对电流进行预测控制,然后再调整正、负小矢量对中点电压进行控制。

改进的模型预测控制系统框图如图7所示。预测控制方案前两步与传统算法基本一致(见2.1.2小节),区别在于有限集内电压矢量不同,同时对第3步进行调整:将  $i_d(k+1)$  和  $i_q(k+1)$ 、参考电流  $i_d^*(k+1)$  和  $i_q^*(k+1)$  代入价值函数中,经过计算选取价值函数值最小的基本电压矢量作为最优矢量,然后对虚拟矢量类型进行判断,为虚拟小矢量则继续对中点电压进行判断,按照  $U_{mp}$  的正、负对虚拟小矢量中正、负小矢量对儿的作用时间进行再分配,并将对应的开关序列作用于逆变器。价值函数设置如下:

$$T = [i_d(k+1) - i_d^*(k+1)]^2 + [i_q(k+1) - i_q^*(k+1)]^2 \quad (12)$$

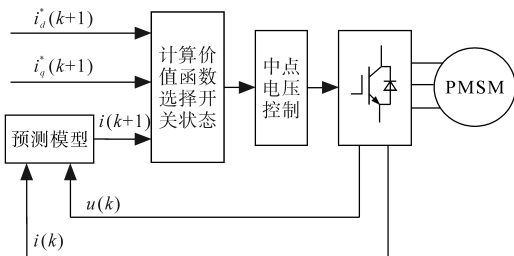


图7 改进模型预测控制系统框图

Fig.7 Block diagram of improved model predictive control system

## 3 算例分析

为验证本文所提算法的正确性和有效性,基于改进虚拟空间矢量法的模型预测控制,对三电平NPC逆变器与永磁同步电机进行了Matlab仿真实验对比分析,其中三相永磁同步电机采用  $i_d=0$  控制。仿真参数为:控制频率  $T_c=100$  kHz,直流侧电压  $U_{dc}=270$  V,直流侧上、下电容  $C=4\ 700$   $\mu$ F,电机额定转速  $n=955$  r/min,定子  $d, q$  轴电感  $L_d=L_q=0.395$  mH,定子电阻  $R=0.048\ 5$   $\Omega$ ,永磁体磁链  $\Psi_f=0.119\ 4$  Wb。

仿真均设置为在电机空载稳定运行后,即在0.25 s时刻进行负载突变,由  $0\ \text{N}\cdot\text{m}$  变为  $5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。图8与图9给出了在仿真参数下三相电流与三相电压的输出波形。可以看出,在负载突变过程中,电压保持稳定,电流可以准确跟随目标,证明了改进算法的动态性能。

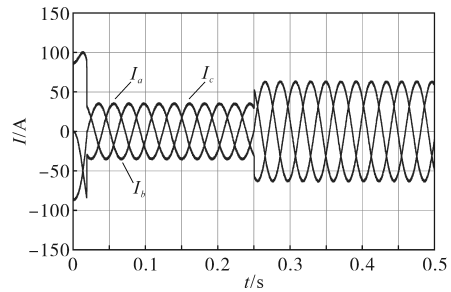


图8 三相电流输出波形

Fig.8 Three-phase current output waveforms

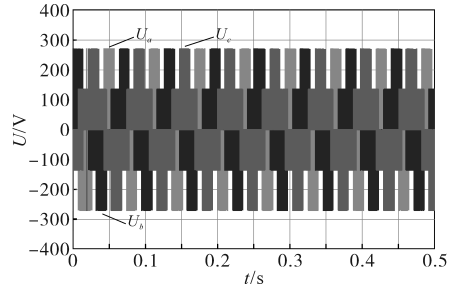


图9 三相电压输出波形

Fig.9 Three-phase voltage output waveforms

图10a、图10b分别给出了传统算法与改进算法的中点电压控制效果图。可以看出,传统算法在负载突变前、后中点电压差绝对值稳定在0.25 V以内,改进算法则稳定在0.15 V以内,即最终上、下电容电压稳定在  $135 \pm 0.075$  V,证明了改进算法中虚拟矢量构成的合理性与中点平衡控制的有效性。

图11a、图11b给出了传统算法与改进算法下永磁同步电机转速波形。可以看出,在模型预测

控制方法下两种算法均有较快的响应速度,电机转速均稳定在 100 rad/s,在负载突变后转速均略有偏差。

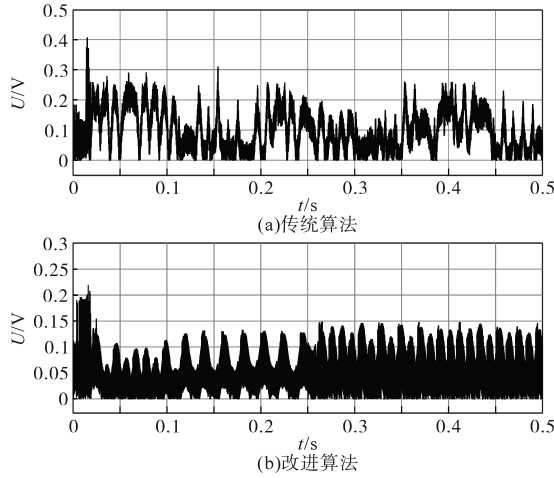


图10 中点电压绝对值波形图

Fig.10 Waveforms of absolute midpoint voltage

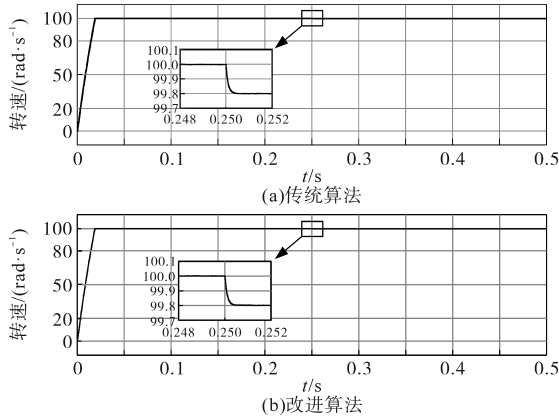


图11 电机转速波形图

Fig.11 Waveforms of motor speed

图 12a、图 12b 所示为传统算法与改进算法的电机转矩波形图。两种算法下电机转矩均在电机稳定运转后保持稳定,无较大转矩脉动,且在负载突变后迅速跟随目标并保持稳定。对比可知改进算法下电机转矩更为稳定,且波形中毛刺更少,证明了改进算法对电机控制的有效性。

图 13、图 14 分别给出了传统算法与改进算法下电机定子  $d$ 、 $q$  轴电流的波形图。在模型预测算法下  $q$  轴电流在负载突变后与转矩一致,迅速跟随目标并保持稳定。对比可知,在改进算法下电机  $d$ 、 $q$  轴电流均比传统算法更为稳定,其中,传统算法下电机  $d$  轴电流可保持在  $\pm 1$  A 以内,而改进算法下可保持在  $\pm 0.75$  A 以内;传统算法下电机  $q$  轴电流可保持在 61.8~64.1 A 之间,而改进算法下可保持在 62.2~63.8 A 之间,证明了改进算法对电机  $d$ 、 $q$  轴电流控制效果的有效性与稳定性。

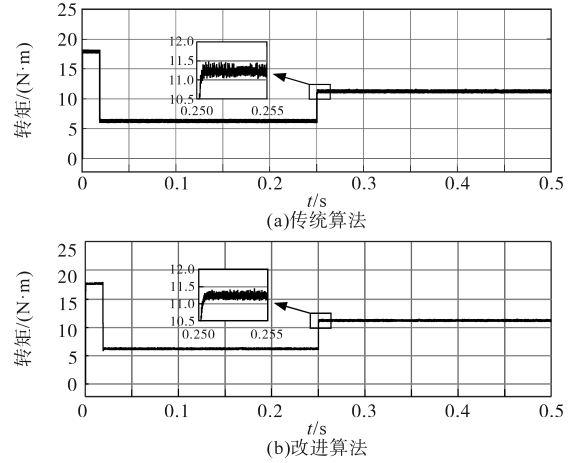


图12 电机转矩波形图

Fig.12 Waveforms of motor torque

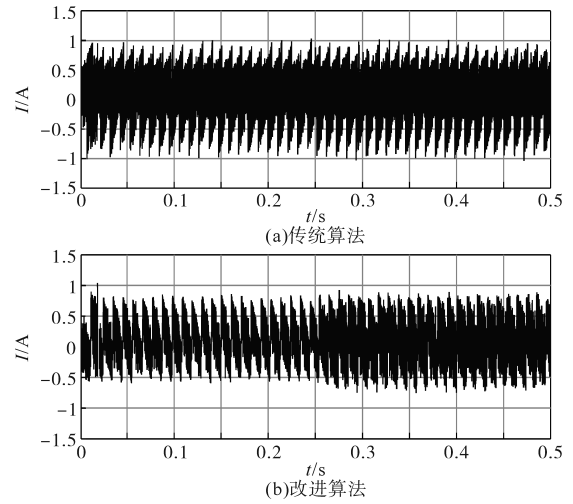


图13 电机d轴电流波形图

Fig.13 Waveforms of motor  $d$ -axis current

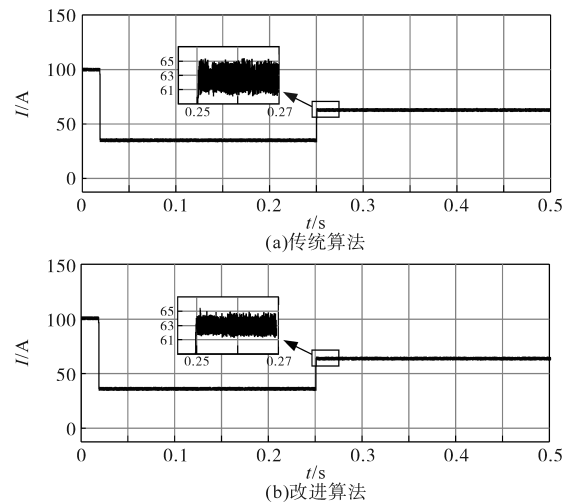


图14 电机q轴电流波形图

Fig.14 Waveforms of motor  $q$ -axis current

## 4 结论

本文提出了一种基于模型预测控制的改进

虚拟空间矢量算法,构造出一种更贴近矢量圆的正十二边形空间矢量图,相比于传统的虚拟空间矢量算法,通过理论分析与仿真验证,可以得出以下结论:

1)改进算法对于模型预测控制更加适用,从传统算法可选择的21个空间矢量增加至27个,且构成正十二边形空间矢量图贴近矢量圆,更适用于永磁同步电机精确控制。

2)改进算法保留了传统控制的优点,可以实现对永磁同步电机稳定运行与中点电压控制,且在控制下对电机定子 $d, q$ 轴电流控制精度更高,同时在负载突变后转矩脉动更低。

3)改进算法牺牲了对少数虚拟大矢量中点电压的控制,但仍能保证中点电压的稳定。

#### 参考文献

- [1] 刘春强,骆光照,涂文聪. 航空机电作动永磁同步电机自抗扰控制研究综述[J]. 电气工程学报, 2021, 16(4): 12-24.  
LIU Chunqiang, LUO Guangzhao, TU Wencong. Survey on active disturbance rejection control of permanent magnet synchronous motor for aviation electro-mechanical actuator[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(4): 12-24.
- [2] 李世晓,杜锦华,龙云. 基于一维卷积神经网络的机电作动器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 62-73.  
LI Shixiao, DU Jinhua, LONG Yun. Fault diagnosis of electro-mechanical actuators based on one-dimensional convolutional neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 62-73.
- [3] 张卓然,于立,李进才,等. 飞机电气化背景下的先进航空电机系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 622-634.  
ZHANG Zhuoran, YU Li, LI Jincan, et al. Key technologies of advanced aircraft electronic machine tools systems for aviation electrification[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(5): 622-634.
- [4] DEMIR Y, AYDIN M. A novel dual three-phase permanent magnet synchronous motor with asymmetric stator winding[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1-5.
- [5] 付兴贺,陈锐,董婷,等. 考虑参数不确定的永磁同步电机MTPA控制综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 796-808.  
FU Xinghe, CHEN Rui, DONG Ting, et al. Review of MTPA control of permanent magnet synchronous motor considering parameter uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 796-808.
- [6] 谷鑫,鲁金月,王志强,等. 基于无差拍电流预测控制的永磁同步电机谐波电流抑制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6345-6356.  
GU Xin, LU Jinyue, WANG Zhiqiang, et al. Harmonic current suppression strategy for permanent magnet synchronous motor based on deadbeat current prediction control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6345-6356.
- [7] 甘醇,曲荣海,石昊晨,等. 宽调速永磁同步电机全域高效运行控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2496-2512.  
GAN Chun, QU Ronghai, SHI Haochen, et al. Review of high-efficiency control strategy for permanent magnet synchronous motors under wide speed range[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2496-2512.
- [8] 刘春喜,田宝奇,刘志乐,等. NPC型三电平并网逆变器自适应模型预测控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 143-151.  
LIU Chunxi, TIAN Baoqi, LIU Zhile, et al. Adaptive model predictive control for NPC-type three-level grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1): 143-151.
- [9] 耿后来,高宁,吴卫民. 三电平逆变器中点电位偏移机理分析与平衡方法研究[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 50-58.  
GENG Houlai, GAO Ning, WU Weimin. Theoretical analysis and control strategy of neutral point voltage balance for three-level grid-tied inverter[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 50-58.
- [10] 宋琳,聂子玲,叶伟伟,等. 基于前馈解耦控制的有源中点钳位五电平模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1910-1920.  
SONG Lin, NIE Ziling, YE Weiwei, et al. Research on model predictive control of ANPC-5L permanent magnet synchronous motor based on feedforward decoupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1910-1920.
- [11] 胡文华,郭嘉敏. 七开关十五电平逆变器调制策略及功率均衡方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3700-3709.  
HU Wenhua, GUO Jiamin. Modulation strategy and power balance method of seven-switch fifteen-level inverter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3700-3709.
- [12] 葛兴来,张晓华,岳岩. 低载波比下三电平NPC逆变器同步SVPWM算法[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(9): 24-32.  
GE Xinglai, ZHANG Xiaohua, YUE Yan. Comparative study on synchronized space vector PWM for three-level neutral point clamped VSI under low carrier ratio[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(9): 24-32.
- [13] 胡存刚,胡军,张云雷,等. 三电平ANPC变换器SVPWM优化控制方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(6): 32-41.  
HU Cungang, HU Jun, ZHANG Yunlei, et al. Optimization control for three-level active neutral-point-clamped converter using SVPWM[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(6): 32-41.
- [14] 曹以龙,郭茂,杨兴武,等. 基于双调制波的MMC载波调制策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(6): 112-115, 118.  
CAO Yilong, GUO Mao, YANG Xingwu, et al. MMC carrier modulation strategy based on dual modulation wave[J]. Power Electronics, 2021, 55(6): 112-115, 118.
- [15] RATHORE R, HOLTZ H, BOLLER T. Generalized optimal

- pulse-width modulation of multilevel inverters for low-switching-frequency control of medium-voltage high-power industrial AC drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10):4215-4224.
- [16] 杨帆,赵希梅,金鸿雁,等.基于无参数PMSM的自适应有限集模型预测控制[J].中国电机工程学报,2023,43(22):8935-8944.  
YANG Fan, ZHAO Ximei, JIN Hongyan, et al. Parameter-free adaptive finite control set model predictive control for PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22):8935-8944.
- [17] 张树林,康劲松,盛业哲.一种无权重系数的三电平NPC逆变器低共模电压FCS-MPC算法[J].中国电机工程学报,2023,43(19):7614-7626.  
ZHANG Shulin, KANG Jinsong, SHENG Yezhe. A low common mode voltage FCS-MPC scheme for three-level NPC inverter without weighting factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19):7614-7626.
- [18] KARAMANAKOS P, GEYER T. Guidelines for the design of finite control set model predictive controllers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7):7434-7450.
- [19] 闫涵,吕建国,丁金勇,等.非理想电网下NPC三电平逆变器多目标模型预测控制方法研究[J].电气工程学报,2019,14(3):23-32.  
YAN Han, LÜ Jianguo, DING Jinyong, et al. Research on the multi-target grid-connected control method of NPC three-level inverter based on model prediction under non-ideal grid conditions[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(3):23-32.
- [20] 吴琪,胡存刚,张云雷,等.三电平ANPC变换器快速模型预测控制策略研究[J].电力电子技术,2020,54(4):103-106.  
WU Qi, HU Cungang, ZHANG Yunlei, et al. Research on fast model predictive control strategy for three-level ANPC converter[J]. Power Electronics, 2020, 54(4):103-106.
- [21] 吴可丽,夏长亮,张云,等.二极管钳位型三电平逆变器共模电压抑制[J].电工技术学报,2015,30(24):110-117,170.  
WU Keli, XIA Changliang, ZHANG Yun, et al. Common-mode voltage suppression for neutral-point-clamped three-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24):110-117, 170.
- [22] OIKONOMOU N, GUTSCHER C, KARAMANAKOS P, et al. Model predictive pulse pattern control for the five-level active neutral-point-clamped inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(6):2583-2592.
- [23] BROSCHE A, HANKE S, WALLSCHEID O, et al. Data-driven recursive least squares estimation for model predictive current control of permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2):2179-2190.
- 收稿日期:2023-07-10  
修改稿日期:2023-10-16

(上接第7页)

- development of the petrochemical and chemical industry in China under the goal of "double carbon"[J]. Chemical Industry, 2022, 40(1):1-11.
- [12] ANDRZEJ W, DARIUSZ G. General color rendering index as a criterion of quality of light sources assessment applied in European commission regulations implementing directive 2009/125/EC(EKODESIGN)[J]. Proceedings of Electrotechnical Institute Prace Instytutu Elektrotechniki, 2024, 61(267):121-144.
- [13] 卢智斌,陈信勇.欧盟空调ERP能效新法规草案解读及季节能效优化探讨[J].环境技术,2021,39(6):235-239.  
LU Zhibin, CHEN Xinyong. Discussion on the draft of the new regulations of the EU air conditioning ERP energy efficiency and discussion on seasonal energy efficiency[J]. Environmental Technology, 2021, 39(6):235-239.
- [14] 王春武,陈实,柴青,等.调速电气传动系统能效标准的现状及发展趋势[J].电气传动,2022,52(5):3-7.  
WANG Chunwu, CHEN Shi, CHAI Qing, et al. Current situation and development trend of energy efficiency standard of adjustable speed electrical power drive systems[J]. Electric Drive, 2022, 52(5):3-7.
- [15] KHALID M R, KHAN I A, HAMEED S, et al. A comprehensive review on structural topologies, power levels, energy storage systems, and standards for electric vehicle charging stations and their impacts on grid[J]. IEEE Access, 2021, 9:128069-128094.
- [16] 张运洲,张宁,代红才,等.中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J].中国电力,2021,54(3):1-11.  
ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system[J]. Electric Power, 2021, 54(3):1-11.
- [17] 邹振耀,周亚鹏.欧盟电池和废电池法规解读[J].上海轻工业,2024(2):63-65.  
ZOU Zhenyao, ZHOU Yapeng. Interpretation of the EU regulation on batteries and waste batteries[J]. Shanghai Light Industry, 2024(2):63-65.
- [18] 刘川槐,朱睿,王伟,等.大型火电机组轴流式送风机降速节能优化改造研究与实施[J].节能技术,2022,40(4):356-361.  
LIU Chuanhuai, ZHU Rui, WANG Wei, et al. Research and implementation of speed reduction and energy saving optimization for axial flow blower of large thermal power unit[J]. Energy Conservation Technology, 2022, 40(4):356-361.
- [19] 司念朋,李焘,宗艺晶,等.电子电气产品可再生资源回收利用综述[J].质量与安全检验检测,2021,31(6):32-36.  
SI Nianpeng, LI Tao, ZONG Yijing, et al. Review on utilization of renewable resources from electronic and electrical products [J]. Quality Safety Inspection and Testing, 2021, 31(6):32-36.
- 收稿日期:2023-09-12  
修改稿日期:2023-11-09