

永磁同步电机低复杂度三矢量模型 预测电流控制

王震¹, 安辉¹, 邓文宇², 高慧², 于勇波³, 胡显光⁴, 安跃军^{1*}

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110159;

3. 沈阳中北真空技术有限公司, 辽宁 沈阳 110159;

4. 沈阳中北真空设备有限公司, 辽宁 沈阳 110159)

Low-Complexity Three-Vector Model Predictive Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motors

WANG Zhen¹, AN Hui¹, DENG Wenyu², GAO Hui²,

YU Yongbo³, HU Xian'guang⁴, AN Yuejun^{1*}

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110159, China;

3. Shenyang North China Vacuum Technology Co., Ltd., Shenyang 110159, China;

4. Shenyang North China Vacuum Equipment Co., Ltd., Shenyang 110159, China)

Abstract: [Objective] To address computational complexity issues in traditional three-vector model predictive current control (TV-MPCC) for permanent magnet synchronous motor (PMSM), a low-complexity TV-MPCC (LCTV-MPCC) method based on improved voltage vector selection and calculation is proposed. [Methods] Firstly, a discrete current prediction model for PMSM was established based on the forward Euler method, and three candidate vectors were selected using an adjacent effective voltage vector screening method to narrow down the voltage vector selection range. Then, the value function was calculated to determine the optimal voltage vector combinations, and their corresponding virtual action time was calculated. The desired voltage vector was synthesized using two virtual voltage vectors and their action time. Based on the duration of virtual voltage vector action time, the actual voltage vectors and their action time required for synthesizing the desired voltage vector were further determined. Finally, the inverter switching sequence output was generated according to the principle of minimum switching frequency. [Results] To verify the effectiveness of

the proposed method, a comparative analysis was conducted through simulations and experiments. The results showed that the proposed LCTV-MPCC method achieved comparable steady-state performance to the TV-MPCC method, with nearly identical speed and current fluctuations under both control methods. In terms of calculation efficiency, the proposed LCTV-MPCC method reduced the average calculation time per cycle from 54.3 μ s to 37.6 μ s, which was a reduction of 30.76% compared to TV-MPCC. Additionally, the number of voltage vector iterations decreased from 6 to 3, representing a 50% reduction. The proposed method effectively reduced the computational burden compared to traditional control methods. [Conclusion] The LCTV-MPCC method proposed in this study effectively addresses the computational complexity issue of the TV-MPCC method by modifying the candidate voltage vector set and the calculation method for actual voltage vector action time. This method reduces average cycle runtime of the system, maintains fixed switching frequency, and ensures unchanged steady-state control performance of motors.

Key words: permanent magnet synchronous motor; model predictive current control; low complexity; three-vector; optimal voltage vector

基金项目: 辽宁省“揭榜挂帅”科技计划项目 (2023JH1/11100010)

Liaoning Province Open Bidding for Selecting the Best Candidates Science and Technology Program Project (2023JH1/11100010)

摘要:【目的】为解决永磁同步电机(PMSM)传统三矢量模型预测电流控制(TV-MPCC)的计算复杂性问题,提出了一种基于改进电压矢量选择和计算方法的低复杂度三矢量模型预测电流控制(LCTV-MPCC)方法。【方法】首先,基于前向欧拉法建立PMSM离散化电流预测模型,通过相邻有效电压矢量筛选方法确定三个候选矢量,缩小电压矢量选择范围。然后,计算价值函数以确定最优电压矢量组合,并计算出各自对应的虚拟作用时间。通过两个虚拟电压矢量及其作用时间合成期望电压矢量,根据虚拟电压矢量作用时间的大小关系,进一步确定合成期望电压矢量所需要的实际作用电压矢量及其作用时间。最后,按最小开关频率原则生成逆变器开关序列输出。【结果】为验证所提方法的有效性,通过仿真和试验进行对比分析。结果表明,所提LCTV-MPCC方法与TV-MPCC方法在稳态性能方面近似,两种控制方法的转速波动和电流波动基本一致;在计算效率方面,相较于TV-MPCC方法,所提LCTV-MPCC方法的单个周期平均计算时间由54.3 μs 缩短至37.6 μs ,减小了30.76%;电压矢量的迭代次数由6次缩减为3次,减少了50%,所提方法能够有效降低了传统控制方法的计算负担。【结论】本文所提LCTV-MPCC方法通过改变候选电压矢量集和实际电压矢量作用时间计算方法,有效解决了TV-MPCC方法计算复杂的问题,能够减少系统周期平均运行时间,同时固定开关频率,保持电机稳态控制性能不变。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测电流控制; 低复杂度; 三矢量; 最优电压矢量

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因其具有结构简单、体积小和功率密度高等优点^[1-2],现已广泛应用于电动汽车、航空航天以及高精度伺服控制等领域^[3-4]。在现代控制领域内,PMSM传统控制方法主要有磁场定向控制(Field-Oriented Control, FOC)和直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)两种^[5]。FOC通过坐标变换将定子电流变换为两相正交电流,实现了励磁电流和转矩电流的解耦,从而达到类似直流电机的控制效果^[6]。但FOC在实现过程中需经过多次坐标变换,且速度环和电流环都使用比例积分(Proportional Integral, PI)控制器,需要调节多个参数,整定过程繁琐。DTC摒弃了FOC解耦的思想,省去了FOC

中坐标变换的复杂步骤,将转矩直接作为被控量,实现了电机的快速动态响应,鲁棒性强,但其存在转矩脉动大的缺点^[7-8]。

在这两种传统控制方法的基础上,一些学者提出了先进控制方法并将其应用于高性能PMSM驱动系统。其中,模型预测控制方法具有稳态性能好,动态响应快等优点^[9]。有限集模型预测控制(Finite-Control-Set Model Predictive Control, FCS-MPC)具有控制灵活、概念直观和考虑非线性约束等优点而被广泛应用^[10-11]。相较于FOC, FCS-MPC无需整定参数,动态性能更优;相较于DTC, FCS-MPC能获取更加准确的电压矢量,具有更好的稳态性能^[12-13]。传统FCS-MPC可分为模型预测转矩控制和模型预测电流控制(Model Predictive Current Control, MPCC)。相较于模型预测转矩控制,MPCC的价值函数中仅存在电流值,无需复杂的权重系数调整工作,实现更容易^[14]。然而传统MPCC中候选电压矢量数量有限,且最佳电压矢量作用时间存在延迟,导致系统稳态电流脉动较大。为改善此问题,研究人员提出增加备选电压矢量数量、价值函数优化以及延迟预测等一系列解决办法^[15-16]。增加备选电压矢量数量主要有双矢量和三矢量两种方法。在单个周期内双矢量MPCC通过两个电压矢量合成期望电压矢量,能够改变合成电压矢量的幅值,但不能改变合成电压矢量的方向^[17-18]。三矢量MPCC在每个控制周期作用三个电压矢量,合成电压矢量的幅值和方向皆可改变,但随着备选电压矢量的增多,该方法的计算负担也增大^[17]。因此,在当前的研究领域中,如何在保证动态响应迅速且稳态性能稳定的同时,尽可能地降低计算负荷,已成为一个备受瞩目的焦点。

文献[21]采用相位相反的基本电压矢量合成虚拟零电压矢量来抑制共模电压,通过额外构造12个虚拟非零电压矢量增加电压矢量集降低了转矩脉动和磁链脉动,但由于增加了迭代次数,计算量也相应增大。文献[22]通过比较参考电压矢量电流斜率和基本电压矢量电流斜率来选择作用电压矢量,无需价值函数,减小了计算量。文献[23]对成本函数优化计算采用动态事件触发机制降低周期执行时间,提高了系统实时性能。文献[24]针对矢量集过多,计算量大的问题,提

出了一种相邻电压矢量的优化方法,将控制及候选电压矢量控制在 11 个,实现了控制性能和开关损耗的动态调节。文献[25]首先计算出参考电压矢量,并判断其所在扇区,通过计算该扇区相邻的电压矢量与参考电压矢量的差值,选取最优电压矢量,然后从最优电压矢量相邻的两个矢量中选择次优电压矢量。文献[26]重新构建电压矢量选择表,按照参考电压矢量所在扇区的变化情况,选择扇区内相邻的两个电压矢量作为有效电压矢量。文献[27]将扇区重新划分为 18 份,增加备用电压矢量,采用四阶 Runge-Kutta 离散化电流方程,提高了计算精度。文献[28]提出了一种通过比较多矢量价值函数的大小来选择最优电压矢量和次优电压矢量的方法。文献[29]增加多个虚拟电压矢量提高备选电压矢量数量,减小了电流波动。

上述方法确保了系统的稳态性能,但对于计算量的减小十分有限。因此,本文提出一种低复杂度三矢量模型预测电流控制 (Low-Complexity Three-Vector MPCC, LCTV-MPCC) 方法。首先,通过构建新的电压矢量选择表,减少电压矢量迭代次数;其次,通过价值函数进行排序,选出有效电压矢量;最后,基于电流误差最小原则得到电压矢量最佳作用时间。结果表明,所提控制方法能够有效削减算法的计算工作量和固定开关频率。

1 PMSM 数学模型

本文以表贴式 PMSM 为研究对象,其在 d - q 坐标系下的电压方程为^[30]

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为定子电压和定子电流的 d 、 q 轴分量; L_d 、 L_q 分别为定子电感的 d 、 q 轴分量,表贴式 PMSM 中 d 、 q 轴电感相等,即 $L_d = L_q = L$; R 为定子电阻; ω_e 为转子电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

对式(1)采用前向欧拉离散化,得到下一时刻的定子 d 、 q 轴电流预测值 $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$ 如式(2)所示^[30]:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L}\right) i_d(k) + T_s \omega_e(k) L i_q(k) + \frac{T_s}{L} u_d(k) \\ i_q(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L}\right) i_q(k) - T_s \omega_e(k) L i_d(k) + \frac{T_s}{L} u_q(k) - \frac{T_s \omega_e(k) \psi_f}{L} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_s 为控制周期。

本文选择两电平逆变器供电,逆变器等效电路及电压矢量示意图如图 1 所示。两电平逆变器共有六个桥臂,上下为一组共三组,产生六个有效电压矢量以及两个零电压矢量。

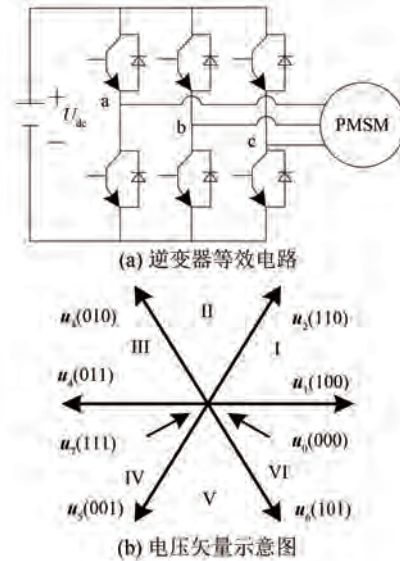


图 1 逆变器等效电路及电压矢量示意图

Fig. 1 Equivalent circuit of inverter and schematic diagram of voltage vectors

2 传统 MPCC

2.1 单矢量 MPCC

MPCC 通过引入模型预测控制器替代 FOC 中电流环 PI 控制器,仅在速度环保留一个 PI 控制器,从而大大简化了参数调整的过程。传统单矢量 MPCC 通过式(2)得到各基本电压矢量作用下的 d 、 q 轴电流预测值,将预测值代入式(3)所示的价值函数^[20]中,选择使价值函数最小的电压矢量作为最优电压矢量,并将其开关序列输出给逆变器。

$$g = [i_d^* - i_d(k+1)]^2 + [i_q^* - i_q(k+1)]^2 \quad (3)$$

式中: i_d^* 、 i_q^* 分别为定子 d 、 q 轴电流期望值。

2.2 三矢量 MPCC

三矢量 MPCC (Three-Vector MPCC, TV-MPCC) 借助价值函数全面筛选六个基本有效电压矢量, 从中选出使价值函数降至最低及次低的两个电压矢量, 分别标记为最优电压矢量 u_{opt} 、次优电压矢量 u_{sub} ; 然后, 将 u_{opt} 和 u_{sub} 与零电压矢量 u_0 相结合, 合成虚拟电压矢量 u_{out} 。假定 u_1 和 u_3 分别为 u_{opt} 和 u_{sub} , 则得到的 u_{out} 如图 2 所示。该方法合成的虚拟电压矢量幅值和方向都可变, 但这种传统方法计算复杂, 电压矢量迭代次数多, 且开关频率不固定, 开关损耗高。

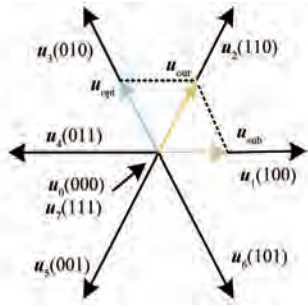


图 2 TV-MPCC 电压矢量选择示意图

Fig. 2 Schematic diagram of voltage vector selection for TV-MPCC

3 LCTV-MPCC

本文所提 LCTV-MPCC 系统框图如图 3 所示。该方法基于三个非相邻有效电压矢量筛选, 通过价值函数评估最优矢量组合并计算虚拟作用时间, 合成期望电压矢量, 根据时间关系推导实际电压矢量及其作用时间, 最终生成最优开关序列输出。

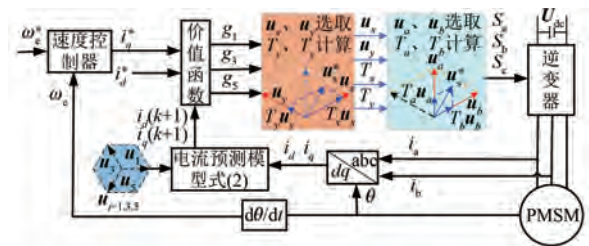


图 3 LCTV-MPCC 系统框图

Fig. 3 Block diagram of LCTV-MPCC system

3.1 实际电压矢量的选取

LCTV-MPCC 期望电压矢量位置的关系如图

4 所示。图 4 中, $x, y=1, 3, 5$; 当 $x+y=6$ 时, $m=1$; 反之, $m=2$ 。

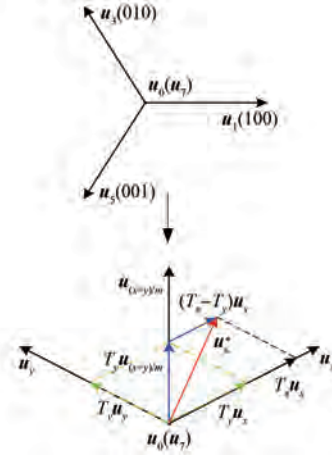


图 4 LCTV-MPCC 期望电压矢量位置关系图

Fig. 4 Position relationship of desired voltage vectors in LCTV-MPCC

假设当前时刻期望电压矢量 u_s^* 位于图 4 中所示位置, u_s^* 由实际作用电压矢量 $u_{(x+y)/m}$ 、 u_x 和 u_0 合成。同时可认为 u_s^* 由 u_x 、 u_y 和 u_0 在一个采样周期内分别作用 T_x 、 T_y 和 $T_s - T_x - T_y$ 来虚拟合成。该过程亦可等效为 u_x 、 u_y 首先合成 $u_{(x+y)/m}$, 其次由 $u_{(x+y)/m}$ 、 u_x 和 u_0 分别作用 T_y 、 $T_x - T_y$ 和 $T_s - T_x$ 来合成 u_s^* , 因此可通过 u_x 、 u_y 和 u_0 虚拟合成 u_s^* 从而获取实际电压矢量及其作用时间。具体步骤如下。

(1) 选取 3 个非相邻的基本有效电压矢量 u_1 、 u_3 和 u_5 , 将其分别代入式 (2) 和式 (3) 得到各自对应的价值函数值, 选取其中价值函数值较小的两个基本电压矢量 u_x 和 u_y , 并利用 u_x 、 u_y 虚拟合成 u_s^* , 从而得到 u_x 、 u_y 的虚拟作用时间 T_x 、 T_y 。

(2) 通过 T_x 、 T_y 的大小判断出实际作用电压矢量。若 $T_x > T_y$, 则 u_s^* 的实际有效电压矢量为 $u_{(x+y)/m}$ 、 u_x ; 反之, 则 u_s^* 的实际有效电压矢量为 $u_{(x+y)/m}$ 、 u_y 。

(3) 通过 T_x 、 T_y 得到实际作用电压矢量的作用时间并将其开关序列输出给逆变器。

3.2 实际电压矢量作用时间的计算

定义 d 、 q 轴电流误差如式 (4) 所示:

$$\begin{cases} E_{dj} = i_d^* - i_{dj}(k+1) \\ E_{qj} = i_q^* - i_{qj}(k+1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{dj} 、 E_{qj} 分别为 u_j 作用下的定子 d 、 q 轴电流

误差值, $j=x, y, 0$; $i_{dj}(k+1)$ 、 $i_{qj}(k+1)$ 分别为 $\mathbf{u}_j$ 作用下 $k+1$ 时刻的定子 d 、 q 轴电流预测值。

根据电流无差拍原理可得:

$$\begin{cases} T_x E_{dx} + T_y E_{dy} + (T_s - T_x - T_y) E_{d0} = 0 \\ T_x E_{qx} + T_y E_{qy} + (T_s - T_x - T_y) E_{q0} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可得 T_x 、 T_y 为

$$\begin{cases} T_x = \frac{E_{dy} \times E_{q0} - E_{d0} \times E_{qy}}{N} \times T_s \\ T_y = \frac{E_{d0} \times E_{qx} - E_{dx} \times E_{q0}}{N} \times T_s \end{cases} \quad (6)$$

$$N = E_{d0} \times E_{qx} - E_{dx} \times E_{q0} - E_{d0} \times E_{qy} + E_{dy} \times E_{q0} + E_{dx} \times E_{qy} - E_{dy} \times E_{qx} \quad (7)$$

首先, $\mathbf{u}_x$ 、 $\mathbf{u}_y$ 作用 T_y 合成 $T_y \mathbf{u}_{(x+y)/m}$; 然后, 由 $T_y \mathbf{u}_{(x+y)/m}$ 、 $(T_x - T_y) \mathbf{u}_x$ 和 $(T_s - T_x) \mathbf{u}_0$ 合成 $\mathbf{u}_s^*$ 。由此可得到实际作用电压矢量 $\mathbf{u}_a$ 、 $\mathbf{u}_b$ 和 $\mathbf{u}_0$ 的作用时间 T_a 、 T_b 和 T_0 分别为

$$\begin{cases} T_a = |T_x - T_y| \\ T_b = \min\{T_x, T_y\} \\ T_0 = T_s - T_a - T_b \end{cases} \quad (8)$$

TV-MPCC 在一个周期内作用的电压矢量由价值函数决定, 三个基本电压矢量之间没有关联性, 且一个周期内的开关频率不固定。本文所提方法首先得到 $\mathbf{u}_x$ 、 $\mathbf{u}_y$ 虚拟合成 $\mathbf{u}_s^*$ 时的作用时间 T_x 、 T_y , 其次根据 T_x 、 T_y 得到实际合成 $\mathbf{u}_s^*$ 的电压矢量 $\mathbf{u}_a$ 、 $\mathbf{u}_b$ 。其中, $\mathbf{u}_a$ 对应逆变器的上桥臂三个开关为两通一断; $\mathbf{u}_b$ 则在 $\mathbf{u}_a$ 的基础上将上桥臂的某一导通开关关断, 为两断一通。因此从 $\mathbf{u}_a$ 变换到 $\mathbf{u}_b$ 和从 $\mathbf{u}_b$ 变换到 $\mathbf{u}_0$ 都只需切换两次开关, 为实现开关频率的固定提供了可能。

本文采用在一个采样周期内按 $\mathbf{u}_a$ 、 $\mathbf{u}_b$ 和 $\mathbf{u}_0$ 的顺序作用的方式, 以 $\mathbf{u}_1$ 、 $\mathbf{u}_2$ 和 $\mathbf{u}_0$ 为例, 假设其对应作用时间分别为 t_1 、 t_2 和 t_3 。在当前周期开始时 $\mathbf{u}_2$ 首先作用, 此时上桥臂开关管状态为两通一断, 到达 t_2 时刻后, 上桥臂开关切换 1 次, 切换到 $\mathbf{u}_1$ 作用, 作用 t_1 时间后, 上桥臂开关再次切换 1 次, $\mathbf{u}_0$ 开始作用, 直至该采样周期结束, 此后重复上述过程, 从而实现了逆变器开关频率的固定。

4 仿真分析

为了验证本文所提 LCTV-MPCC 方法的有效性, 对 TV-MPCC 和 LCTV-MPCC 两种控制方法的

稳态性能和动态性能进行对比分析。仿真中, 转速环 PI 控制器参数相同, 两种控制方法的采样频率均为 10 kHz。PMSM 的性能参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 性能参数

Tab. 1 Performance parameters of PMSM

参数名称	参数值
额定功率/W	400
额定电压/V	220
额定电流/A	2.8
额定转速/(r · min ⁻¹)	3 000
额定转矩/(N · m)	1.27
电机极对数	5
定子电阻/Ω	0.27
定子电感/mH	0.56
永磁体磁链/Wb	0.038

对 TV-MPCC 和 LCTV-MPCC 两种控制方法的稳态性能进行分析, 选择电机额定转速的 20% 和 70% 作为性能测试转速。PMSM 在额定负载条件下分别以 600 r/min 和 2 100 r/min 运行, 达到稳态时的转速、电流波形如图 5~图 8 所示。

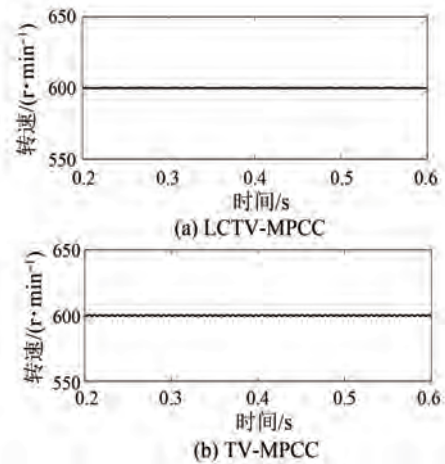


图 5 两种控制方法下 600 r/min 时的转速波形

Fig. 5 Speed waveforms at 600 r/min using two control methods

由图 5 和图 6 可以看出, 相较于 TV-MPCC, 本文所提 LCTV-MPCC 在两种转速下的转速波动基本相同, 波形平稳。由图 7 和图 8 可以看出, 在同一转速下, 两种控制方法的 d 、 q 轴电流波形非常接近, 均无较大波动。可见两种控制方法均具有良好的稳态性能。

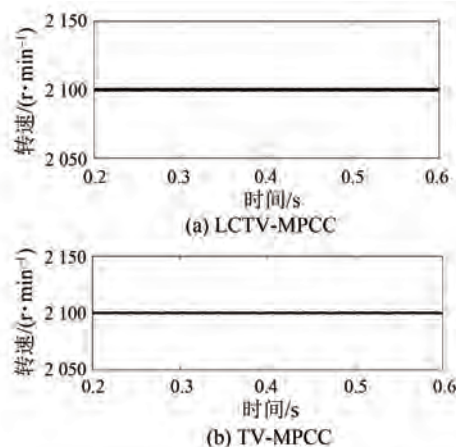


图 6 两种控制方法下 2 100 r/min 时的转速波形
Fig. 6 Speed waveforms at 2 100 r/min using two control methods

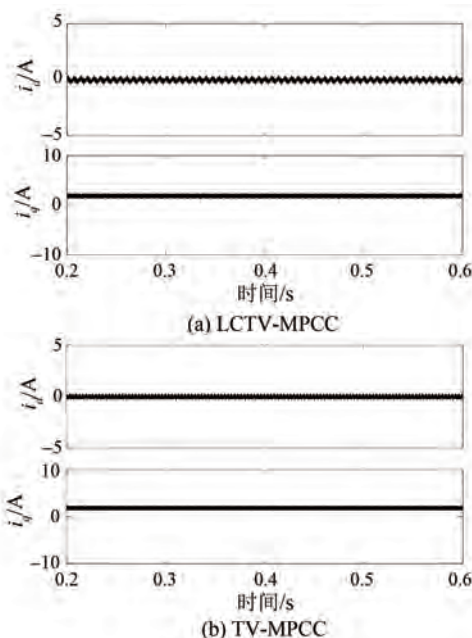


图 7 两种控制方法下 600 r/min 时的电流波形
Fig. 7 Current waveforms at 600 r/min using two control methods

为了更深入地对比两种控制方法的稳态性能,对定子电流总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 进行分析,其结果如图 9 和图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知,两种控制方法的 THD 均集中在 2%~4% 范围内,相同转速下,两种控制方法的 THD 差别很小。

对两种控制方法的动态性能进行分析。设置工况 1 为 PMSM 在额定负载条件下起动,0.2 s 时

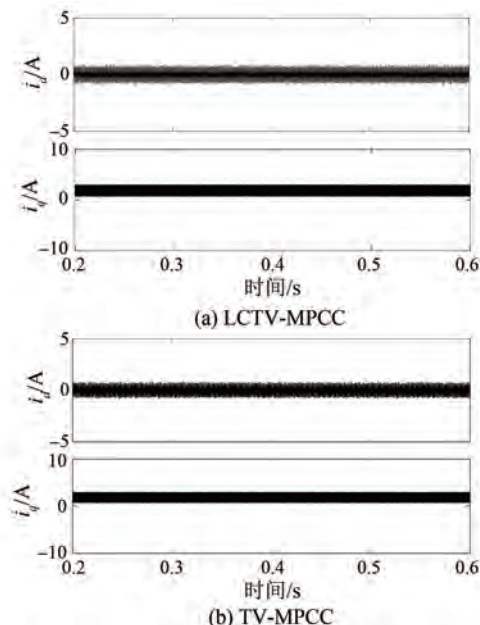


图 8 两种控制方法下 2 100 r/min 时的电流波形
Fig. 8 Current waveforms at 2 100 r/min using two control methods

转速由 600 r/min 突增至 2 100 r/min。工况 1 下两种控制方法的转速和电流仿真波形如图 11~图 13 所示。

由图 11 可以看出,两种控制方法在转速突变时产生的转速波动几乎相同。由图 12 和图 13 可以看出,转速突变时两种控制方法的电流波形发生突变,但都能迅速收敛到给定值。

设置工况 2 为 PMSM 在额定负载条件下起动,0.15 s 时转矩由 0 突增至 1.27 N·m,0.3 s 时转速由 600 r/min 突增至 2 100 r/min,0.45 s 时转矩由 1.27 N·m 突减至 0。工况 2 下两种控制方法的转速和电流仿真波形如图 14~图 16 所示。

由图 14 可以看出,两种控制方法在转速变化和转矩变化时的转速波动几乎相同。由图 15 和图 16 可以看出,转速及转矩突变时电流均发生突变,但都能快速收敛到给定值。综上可知,LCTV-MPCC 和 TV-MPCC 具有相似的稳态和动态性能。

对 TV-MPCC 和 LCTV-MPCC 两种控制方法的算法复杂度及开关频率进行对比。设置 PMSM 在额定负载下以 1 000 r/min 运行,仿真结果如表 2 所示。

TV-MPCC、LCTV-MPCC 在 1 000 个采样周期的平均计算时间分别为 54.3 μ s、37.6 μ s,相较于 TV-MPCC,所提 LCTV-MPCC 仅需迭代 3 个候选

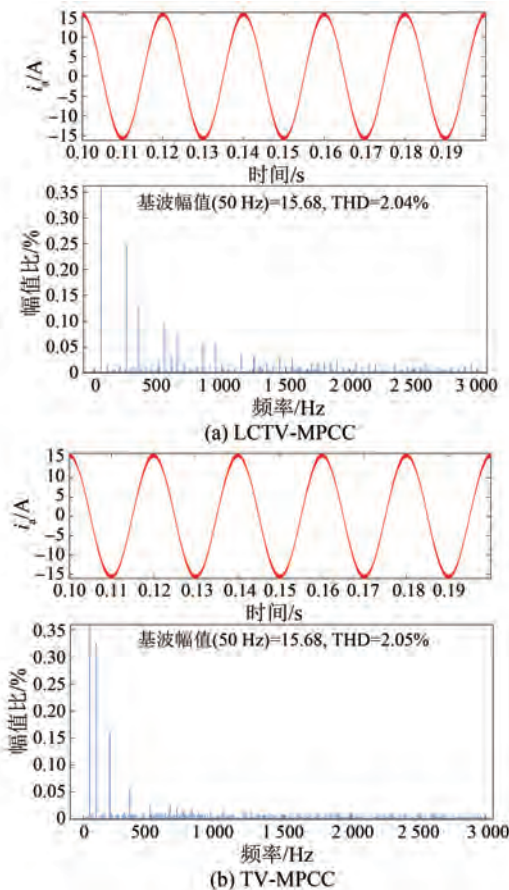


图9 两种控制方法在 600 r/min 时相电流波形及 THD 分析

Fig. 9 Phase current waveforms and THD analysis at 600 r/min using two control methods

电压矢量,其计算复杂度明显降低,计算时间减少了 30.76%。TV-MPCC 没有限制电压矢量的选择范围,导致开关频率和计算复杂度较高,而 LCTV-MPCC 通过构造新的电压矢量选择表约束 u_1 、 u_2 和 u_0 之间的关系,限定了开关切换次数,固定了开关频率。

表 2 两种控制方法对比

Tab. 2 Comparison of two control methods

参数名称	TV-MPCC	LCTV-MPCC
迭代次数	6	3
运行时间/ μs	54.3	37.6
开关频率	高且不固定	低且固定

5 试验验证

搭建 PMSM 试验测试平台,验证理论分析的准确性。试验装置如图 17 所示,主要组件包括被

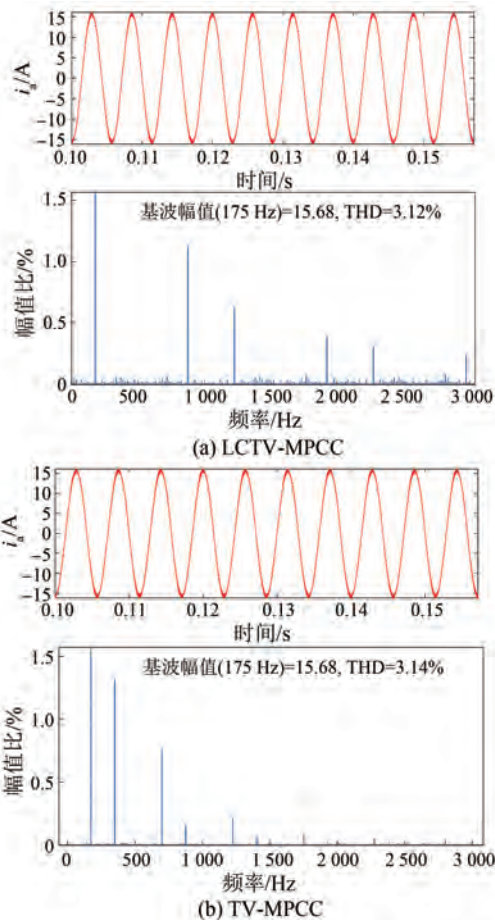


图10 两种控制方法在 2100 r/min 时相电流波形及 THD 分析

Fig. 10 Phase current waveforms and THD analysis at 2100 r/min using two control methods

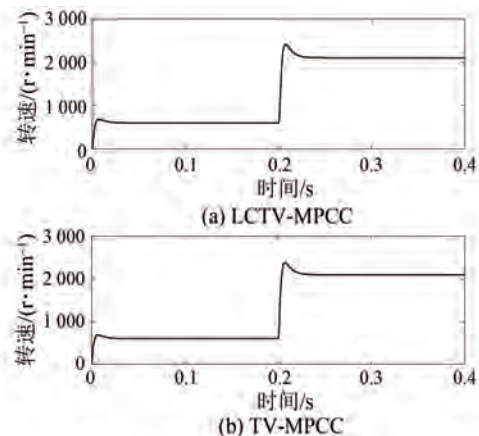


图11 工况 1 下两种控制方法的转速波形

Fig. 11 Speed waveforms using two control methods under condition 1

试 PMSM、控制器、驱动器、上位机、电源以及磁粉制动器。

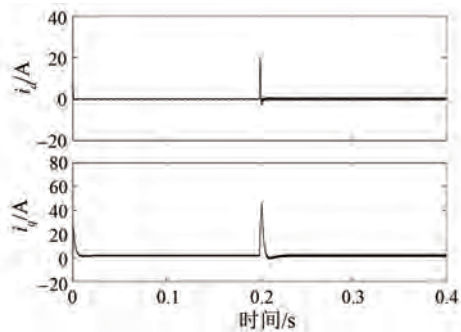


图 12 工况 1 下 TV-MPCC 的电流波形
Fig. 12 Current waveforms using TV-MPCC under condition 1

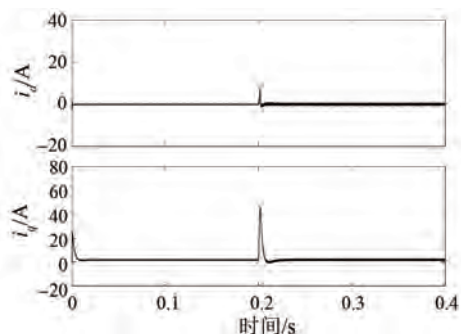


图 13 工况 1 下 LCTV-MPCC 的电流波形
Fig. 13 Current waveforms using LCTV-MPCC under condition 1

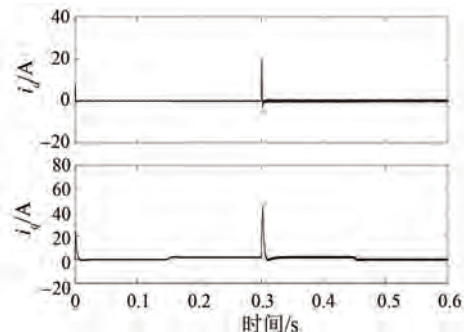


图 15 工况 2 下 TV-MPCC 的电流波形
Fig. 15 Current waveforms using TV-MPCC under condition 2

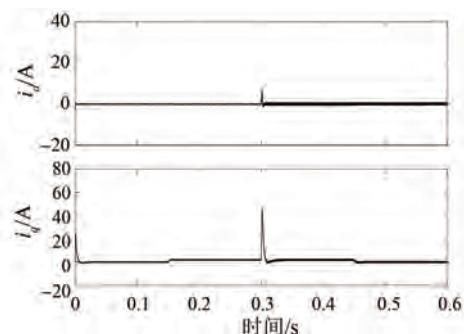


图 16 工况 2 下 LCTV-MPCC 的电流波形
Fig. 16 Current waveforms using LCTV-MPCC under condition 2

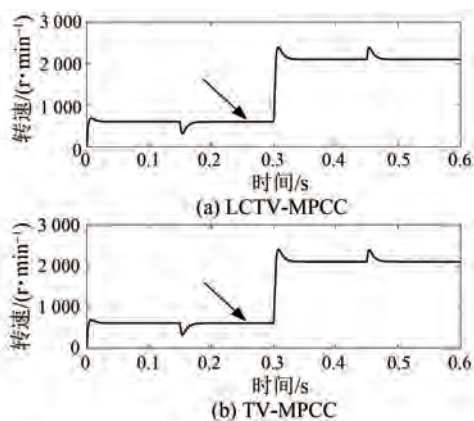


图 14 工况 2 下两种控制方法的转速波形
Fig. 14 Speed waveforms using two control methods under condition 2

为验证本文所提出 LCTV-MPCC 的有效性, 对比了 TV-MPCC 和 LCTV-MPCC 两种控制方法的空载稳态、负载稳态、恒定转速负载渐变动态响应以及恒定负载转速突变动态响应试验波形。试验中, 转速环 PI 控制器参数相同, 两种控制方法的采样频率均为 10 kHz。试验结果如图 18~图

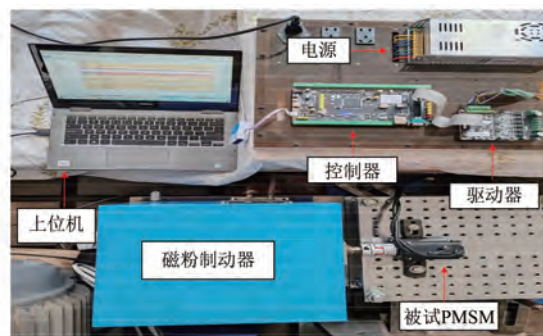


图 17 试验装置
Fig. 17 Experimental setup

25 所示。

图 18 和图 19 为两种控制方法下 PMSM 在空载, 给定转速为 2 100 r/min 时的稳态试验波形。结果表明空载时在两种控制方法下, 电机的转速和 q 轴电流均能很好地跟随给定值。

图 20 和图 21 为两种控制方法下 PMSM 在额定负载, 转速为 2 100 r/min 时的稳态试验波形。结果表明负载时在两种控制方法下, 电机的实际转速和 q 轴电流均能很好地跟随给定值。

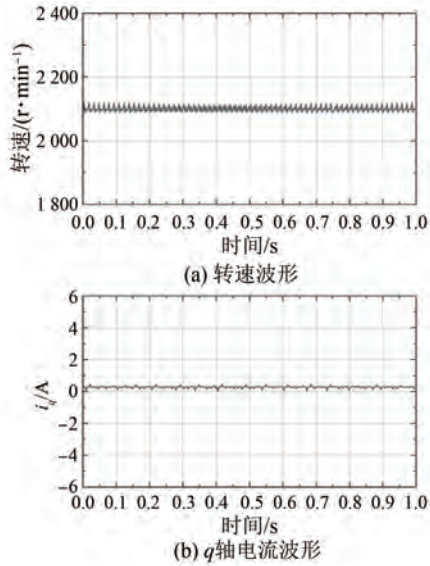


图 18 TV-MPCC 的空载稳态试验波形
Fig. 18 No-load steady-state test waveforms using TV-MPCC

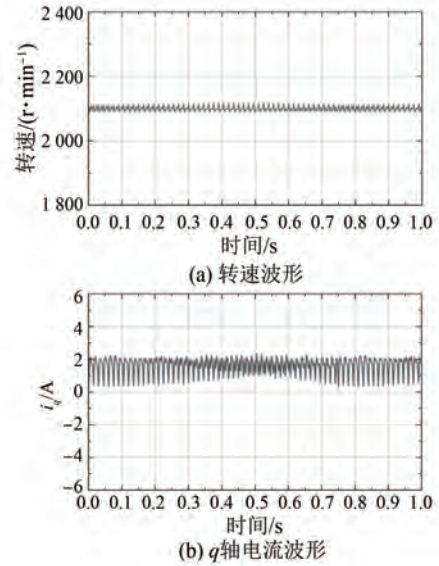


图 20 TV-MPCC 的负载稳态试验波形
Fig. 20 Load steady-state test waveforms using TV-MPCC

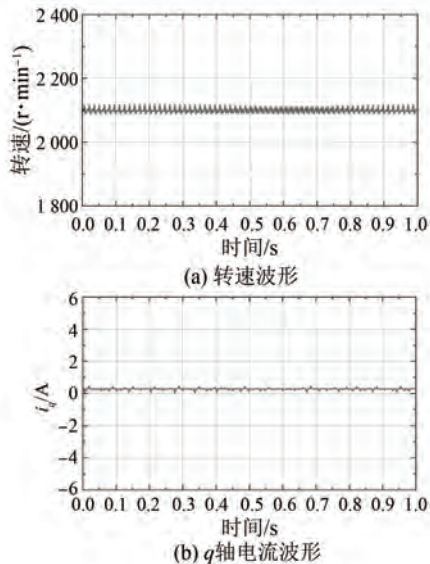


图 19 LCTV-MPCC 的空载稳态试验波形
Fig. 19 No-load steady-state test waveforms using LCTV-MPCC

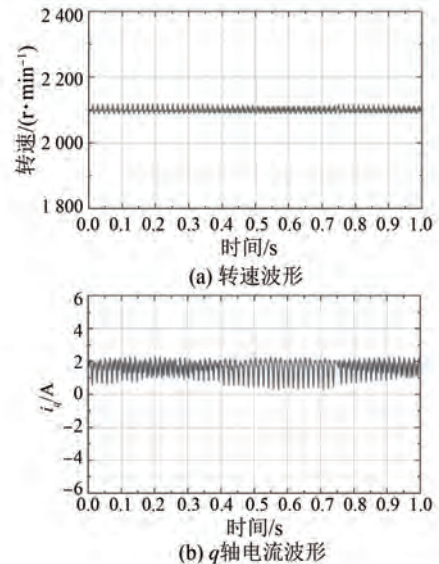


图 21 LCTV-MPCC 的负载稳态试验波形
Fig. 21 Load steady-state test waveforms using LCTV-MPCC

图 22 和图 23 为两种控制方法下 PMSM 在额定负载, 给定转速由 2 100 r/min 突变为 600 r/min 时的动态响应试验波形。结果表明转速突变时在两种控制方法下, 电机的实际转速都能快速地跟随给定转速, q 轴电流能在 100 ms 内快速收敛到给定值, 具有良好的动态性能。

图 24 和图 25 为两种控制方法下 PMSM 在恒

定转速 600 r/min, 负载由 0.5 N·m 逐渐提升为额定负载时的动态响应试验波形。结果表明负载渐变时两种控制方法下, 电机转速都能够很好地跟随给定值。

通过仿真和试验对比可知, 所提 LCTV-MPCC 方法具有与 TV-MPCC 方法相似的稳态和动态性能, 并且能够改善系统的计算负担。

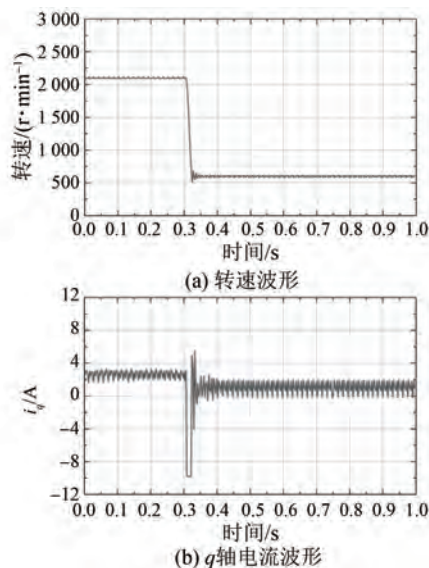


图 22 TV-MPCC 的转速突变动态响应试验波形
Fig. 22 Dynamic response test waveforms using TV-MPCC under sudden speed change

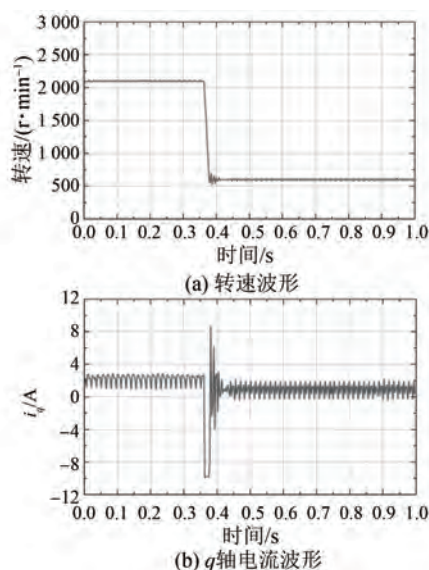


图 23 LCTV-MPCC 的转速突变动态响应试验波形
Fig. 23 Dynamic response test waveforms using LCTV-MPCC under sudden speed change

6 结语

本文提出了一种基于优化电压矢量选择的 LCTV-MPCC 方法。所提方法能够解决 TV-MPCC 方法中计算量大的问题,同时固定了开关频率。就本文的样例而言,该方法将电压矢量的迭代次数由 6 次缩减为 3 次,迭代次数减少了 50%;无需对所有基本电压矢量进行计算,避免了使用价值

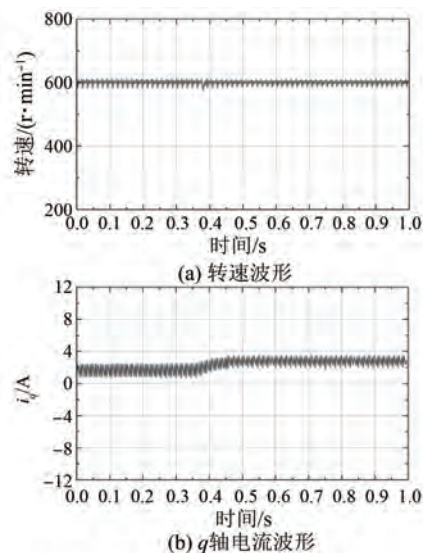


图 24 TV-MPCC 的负载渐变动态响应试验波形
Fig. 24 Dynamic response test waveforms using TV-MPCC under gradual load change

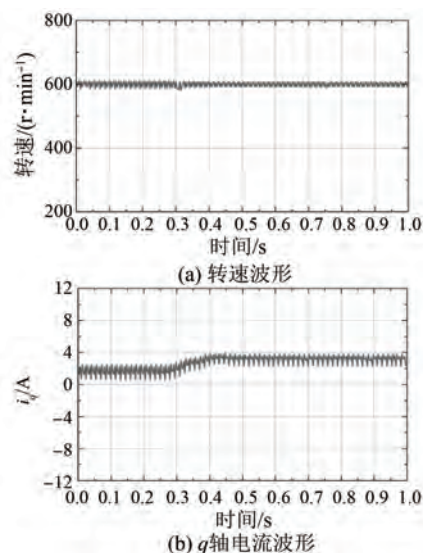


图 25 LCTV-MPCC 的负载渐变动态响应试验波形
Fig. 25 Dynamic response test waveforms using LCTV-MPCC under gradual load change

函数遍历寻优,单个周期平均计算时间由 54.3 μs 缩短至 37.6 μs ,计算时间减小了 30.76%。仿真和试验结果表明,相较于 TV-MPCC,所提 LCTV-MPCC 方法能有效降低控制算法的复杂度,在减小系统计算负担的同时依然能够很好地保证系统优良的稳态和动态性能。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

王震进行了方案设计、内容总结与论文撰写,安辉进行了论文结构确定,邓文字提供了测试条件,高慧、于勇波和胡显光协助了试验测试,安跃军参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary, and paper writing were carried out by Wang Zhen. The structure of the paper is determined by An Hui. The test conditions was provided by Deng Wenyu. The experimental testing was assisted by Gao Hui, Yu Yongbo and Hu Xian'guang. The manuscript was reviewed and revised by An Yuejun. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] HU M M, YANG F, LIU Y, et al. Finite control set model-free predictive current control of a permanent magnet synchronous motor [J]. *Energies*, 2022, 15 (3): 1045.
- [2] 田艳丰, 李欢, 张冉, 等. 预测控制与滑模控制结合的永磁同步电机控制[J]. *微特电机*, 2024, 52 (4): 55-59.
- TIAN Y F, LI H, ZHANG R, et al. Permanent magnet synchronous motor control combining predictive control and sliding mode control [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2024, 52(4): 55 -59.
- [3] 朱永丽, 易鹏, 王晶晶. 伺服驱动系统机电耦合动力学特性研究[J]. *机械设计与制造*, 2022, (9): 71-76+82.
- ZHU Y L, YI P, WANG J J. Electromechanical coupling dynamic characteristics of servo system based on incremental harmonic balance method [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022, (9): 71-76+82.
- [4] 颜学龙, 谢刚, 孙天夫, 等. 基于模型预测控制的永磁同步电机电流控制技术综述[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(9): 1-11.
- YAN X L, XIE G, SUN T F, et al. Review of current

control technology of permanent magnet synchronous motor based on model predictive control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(9): 1-11.

- [5] DAN H B, ZENG P, XIONG W J, et al. Model predictive control-based direct torque control for matrix converter-fed induction motor with reduced torque ripple [J]. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2021, 5(2): 90-99.
- [6] 李敏, 李林林, 周俊鹏. 基于改进型滑模变结构的永磁同步电机的无位置传感器矢量控制[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(2): 22-33.
- LI M, LI L L, ZHOU J P. Sensorless vector control of PMSM based on improved sliding mode with variable structure [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(2): 22-33.
- [7] 赵帅, 于海生. 基于自适应模糊控制的异步电动机 DTC 方法[J]. *青岛大学学报(工程技术版)*, 2015, 30(1): 12-17.
- ZHAO S, YU H S. Induction motor DTC strategy based on adaptive fuzzy control [J]. *Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition)*, 2015, 30(1): 12-17.
- [8] 鲍旭聪, 王晓琳, 彭旭衡, 等. 高速电机驱动关键技术研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42 (18): 6856-6871.
- BAB X C, WANG X L, PENG X H, et al. Review of key technologies of high-speed motor drive [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42 (18): 6856-6871.
- [9] VALENCIA D F, TARVIRDILU-ASL R, GARCIA C, et al. A review of predictive control techniques for switched reluctance machine drives [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 36(2): 1313-1322.
- [10] PENG J Y, YAO M. Overview of predictive control technology for permanent magnet synchronous motor systems [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13 (10): 6255.
- [11] SUN Z, DENG Y T, WANG J L, et al. Finite control set model-free predictive current control of PMSM with two voltage vectors based on ultralocal model [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(1): 776- 788.
- [12] SHAHID M B, JIN W D, ABBASI M A, et al. Model predictive control for energy efficient AC motor

- drives: An overview [J]. IET Electric Power Applications, 2024, 18(12): 1894-1920.
- [13] LI T, SUN X D, LEI G, et al. Finite-control-set model predictive control of permanent magnet synchronous motor drive systems-an overview [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2087-2105.
- [14] WANG J X, YANG H, LIU Y B, et al. Low-cost multistep FCS-MPCC for PMSM drives using a DC link single current sensor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 11034-11044.
- [15] 吴迪, 王影, 周渊深, 等. 模型预测控制在永磁同步电机系统中的应用综述[J]. 防爆电机, 2021, 56(6): 1-6.
- WU D, WANG Y, ZHOU Y S, et al. Application overview of model prediction control in PMSM system [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2021, 56(6): 1-6.
- [16] 苏晓杨, 兰志勇, 蔡兵兵. 永磁同步电机模型预测电流控制比较研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 7-13.
- SU X Y, LAN Z Y, CAI B B. A comparative research of model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(10): 7-13.
- [17] 常勇, 包广清, 杨梅, 等. 模型预测控制在永磁同步电机系统中的应用发展综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 11-17.
- CHANG Y, BAO G Q, YANG M, et al. Application and development of model predictive control in permanent magnet synchronous motor system [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(8): 11-17.
- [18] HUANG Z, WEI Q, XIAO X C, et al. Enhanced dual-vector model predictive control for PMSM drives using the optimal vector selection principle [J]. Energies, 2023, 16(22): 7482.
- [19] SUN X D, LI T, ZHU Z, et al. Speed sensorless model predictive current control based on finite position set for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2743-2752.
- [20] NI K, GAN C, PENG G J, et al. Power-compensated triple-vector model predictive direct power control strategy for nonredundant fault-tolerant rectifiers [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(4): 3803-3814.
- [21] 李耀华, 邓益志, 童瑞齐, 等. 永磁同步电机低共模电压和低复杂度无差拍预测控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 19-28.
- LI Y H, DENG Y Z, TONG R Q, et al. Deadbeat predictive control with low common-mode voltage and low complexity for PMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(10): 19-28.
- [22] 安一凡, 储剑波, 唐旭. 基于参考电流斜率的永磁同步电机三矢量模型预测电流控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 22-29+73.
- AN Y F, CHU J B, TANG X. Three-vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on reference current slope [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 22-29+73.
- [23] 李耀华, 王孝宇, 张勇, 等. 永磁同步电机多步模型预测电流控制成本函数优化计算研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(5): 17-25.
- LI Y H, WANG X Y, ZHANG Y, et al. Cost function optimization calculation for multi-step model predictive current control of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(5): 17-25.
- [24] 王德顺, 王开毅, 吕广宪, 等. 基于拓展矢量集的永磁同步电机模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 9-16.
- WANG D S, WANG K Y, LV G X, et al. Model predictive control of permanent magnet synchronous motor based on extended vector set [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 9-16.
- [25] 杨狂彪, 陈鼎新, 石坚. 低复杂度永磁同步电机双矢量模型预测控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 87-96.
- YANG K B, CHEN D X, SHI J. Low complexity dual vector model predictive control strategy for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 87-96.
- [26] 陈荣, 舒胡平, 翟凯森. 低复杂度永磁同步电机三矢量固定开关频率模型预测电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3710-3722.
- CHEN R, SHU H P, ZHAI K M. Low-complexity three-vector model predictive current control with

- fixed switching frequency for PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3710-3722.
- [27] 周立, 尚治博, 周越鹏, 等. 永磁同步电机低复杂度双矢量预测电流控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 63-72.
- ZHOU L, SHANG Z B, ZHOU Y P, et al. Low complexity dual-vector predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 63-72.
- [28] 陈荣, 翟凯森, 舒胡平. 永磁同步电机双矢量固定开关频率模型预测控制研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3812-3823.
- CHEN R, ZHAI K M, SHU H P. Predictive control of dual vector fixed switching frequency model for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3812-3823.
- [29] 陈卓易, 邱建琪, 金孟加. 永磁同步电机有限集无参数模型预测控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(1): 19-26.
- CHEN Z Y, QIU J Q, JIN M J. Finite control set nonparametric model predictive control for permanent magnet synchronous machines [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(1): 19-26.
- [30] 谢云辉, 郑常宝, 胡存刚, 等. 永磁同步电机模型预测的优化控制策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(7): 39-42.
- XIE Y H, ZHENG C B, HU C G, et al. Optimization of model prediction control for permanent magnet synchronous motor [J]. Power Electronics, 2019, 53(7): 39-42.

收稿日期:2024-12-27

收到修改稿日期:2025-02-27

作者简介:

王 震(1996-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机设计及其控制,Wzhen709@163.com;

* 通信作者:安跃军(1962-),男,博士,教授,研究方向为特种电机及其控制,anyj_dq@sut.edu.cn。