

低复杂度永磁同步电机双矢量模型预测控制策略

杨狂彪, 陈鼎新, 石 坚*

(广州大学 机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

Low Complexity Dual Vector Model Predictive Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor

YANG Kuangbiao, CHEN Dingxin, SHI Jian*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to solve the problems of large computation and current fluctuations in the model predictive current control of permanent magnet synchronous motor, a low complexity dual vector model predictive voltage control strategy is proposed. This method predicts and evaluates three non-adjacent effective voltage vectors only through cost functions, and two adjacent optimal effective voltage vectors can be determined accurately and quickly based on the relationship between the values of three cost functions, without traversing all the voltage vectors. The optimal and effective voltage vector selection can reduce the prediction calculation, and the dq axis voltage difference action time calculation method is introduced to calculate the optimal effective voltage vector action time in order to reduce the calculation. The simulation results show that compared to the duty cycle strategy and the traditional dual vector model predictive current control strategy, the proposed control strategy can effectively reduce the computational complexity and current fluctuation and improve the torque ripple on the basis of ensuring the steady-state and dynamic performance of the system.

Key words: permanent magnet synchronous motor; model predictive control; cost function; low complexity; dq axis voltage difference

摘 要: 针对永磁同步电机模型预测电流控制中计算量大和电流波动问题,提出了一种低复杂度双矢量模型预测电压控制策略。该方法无需遍历所有的电压矢量,仅通过代价函数预测和评估三个不相邻的有效电压矢量,根据三个代价函数值的关系,即可精确快速地确定两个相邻最优有效电压矢量。最优有效的电压矢量选择可以

减少预测计算量,同时引入 dq 轴电压差作用时间计算方法,计算最优有效电压矢量作用时间,以降低计算量。仿真结果表明,相较于占空比策略和传统双矢量模型预测电流控制策略,所提控制策略在保证系统稳态和动态性能的基础上,降低了计算复杂度和电流波动,改善了转矩脉动。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测控制; 代价函数; 低复杂度; dq 轴电压差

0 引言

永磁同步电机因其结构简单,控制便捷,效率高优点被广泛应用于伺服控制系统中。随着电子器件的快速发展,许多计算量较大的控制算法也逐渐被应用到电机控制领域。由于现代微处理器计算能力的提高,模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)已成为磁场定向控制和直接转矩控制的主要竞争对手。MPC 的优点是概念直观、动态响应快以及不同约束组合灵活^[1-4]。利用电压源逆变器的离散特性,有限控制集 MPC(Finite Control Set Model Predictive Control, FCS-MPC)的工作原理是运用适当的电压矢量,使预定义的代价函数最小化^[5-7]。传统的 FCS-MPC 在一个控制周期内采用单个电压矢量。由于有源电压矢量的幅值和相位角是固定的,因此不可避免地降低了电路的工作性能。此外,遍历所有可能的电压矢量也不可避免地增加了计算量^[8-9]。

许多研究试图解决 FCS-MPC 中存在的上述问题。为了提高稳态性能,引入了一种扩展控制集的模型预测转矩控制(Model Predictive Torque Control, MPTC)方法来最小化转矩脉动^[10-12],利用有效电压矢量合成的虚拟电压矢量来扩展控制

基金项目: 国家自然科学基金(51507097)

National Natural Science Foundation of China (51507097)

集。另一种通过划分基本扇区来产生更多无谐波的候选电压矢量^[13-14],以提高五相永磁电机的运行性能。文献[15-16]中通过增加虚拟电压矢量或候选电压矢量来提高运算性能,但同时也增加了算法的复杂度。文献[17-18]提出了基于占空比的MPC方法,在一个控制周期内,将有效电压矢量与零电压矢量相结合。但由于相位角是固定的,这两种方法都不能达到满意的工作性能。文献[19-20]提出了一种广义的基于两矢量的MPTC方法,该方法通过将电压矢量松弛组合为两个任意电压矢量,获得了较好的工作性能,但由于存在大量不同的电压矢量组合,使得对最优电压矢量的确定十分复杂。

基于以上研究,本文提出了一种双矢量低复杂度模型预测控制策略。此策略避免了遍历所有可能的电压矢量。只有三次代价函数预测计算^[21]。根据三个代价函数值的关系确定两个最优有效电压矢量,利用 dq 轴电压差的作用时间计算方法^[22],计算出两个最优有效电压矢量的作用时间。因此,可以降低计算量和电流波动,改善转矩脉动。

1 传统模型预测电流控制

1.1 永磁同步电机数学模型

本文以表贴式永磁同步电机为研究对象,由两电平三相逆变器提供电机驱动电压。在同步旋转坐标系($d-q$)下,表贴式永磁同步电机定子电流的交直轴分量分别为

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

式中: i_d, i_q 分别为电机 d, q 轴电流分量; L_d, L_q 分别为电机 d, q 轴电感; u_d, u_q 分别为电机 d, q 轴电压分量; R_s 为电机定子电阻; ω_e 为转子的电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

为计算下一个采样时刻的电流预测值,用欧拉法可近似得到离散 d, q 轴预测电流分别为

$$\begin{cases} i_d^{k+1} = i_d^k + \frac{T_s}{L_d} (u_d^k - i_d^k R_s + \omega_e^k L_q i_q^k) \\ i_q^{k+1} = i_q^k + \frac{T_s}{L_q} (u_q^k - i_q^k R_s + E_q) \end{cases} \quad (2)$$

$$E_q = -\omega_e^k L_d i_d^k - \omega_e^k \psi_f \quad (3)$$

式中: i_d^{k+1}, i_q^{k+1} 分别为下一时刻的 d, q 轴预测电流; i_d^k, i_q^k 分别为当前时刻的 d, q 轴电流值; T_s 为采样周期; u_d^k, u_q^k 分别为当前时刻的 d, q 轴电压值; ω_e^k 为当前时刻的电角速度; E_q 为当前时刻的交轴反电动势。

1.2 占空比模型预测电流控制

占空比模型预测电流控制是在传统有限集模型预测电流控制的基础上引入占空比控制,即计算被代价函数选择出的最优电压矢量的作用时间,让最优电压矢量只作用采样周期的一部分,其余时间由零电压矢量作用。

1.3 双矢量模型预测电流控制

双矢量模型预测电流控制是在传统有限集模型预测电流控制选择出最优电压矢量 u_{opt1} 的基础上,再进行一次电压矢量选择来确定第2个最优电压矢量 u_{opt2} 。在选择 u_{opt2} 时,将最优电压矢量 u_{opt1} 和6种有效电压矢量分别组合,采用 q 轴电流无差拍,计算出预先分配每个组合中两个电压矢量的作用时间,根据式(2)得到预测电流,然后依次代入式(4),选择出代价函数值最小的组合,即可确定第2个最优电压矢量 u_{opt2} 。

$$g = |i_d^* - i_d^{k+1}| + |i_q^* - i_q^{k+1}| \quad (4)$$

式中: i_d^* 和 i_q^* 分别为 d 轴和 q 轴的电流参考值。

2 低复杂度双矢量模型预测电压控制

传统占空比模型预测电流控制和双矢量模型预测电流控制的代价函数均以电流误差为基准,需经式(4)将电压矢量转化为 d, q 轴电流,然后代入代价函数,计算量较大。本文所提的低复杂度双矢量模型预测控制策略是在双矢量控制原理的基础上,将式(2)和(3)代入式(4)中,得到以电压误差为基准的代价函数,如式(5)所示。直接用候选的电压矢量与参考电压矢量进行比较,减小了计算量,同时通过高效电压矢量快速选择出所需的两个相邻最优有效电压矢量,无需遍历所有电压矢量,然后引入 dq 轴电压差的作用时间计算方法,计算最优有效电压矢量作用时间,去控制合成期望电压矢量的幅值大小,以降低计算量。

$$g = |u_d^* - u_d| + |u_q^* - u_q| \quad (5)$$

式中: u_d^* 和 u_q^* 分别为 d 轴和 q 轴的电压参考值。

所提的低复杂度双矢量模型预测控制策略结构框图如图 1 所示。

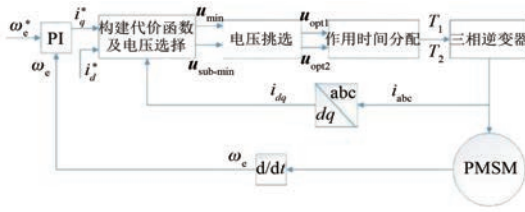


图 1 系统控制框图

Fig. 1 System Control Block Diagram

2.1 最优有效电压矢量的选择

最优有效电压矢量的选择方法无需遍历所有电压矢量,而仅需遍历三个矢量,分别是 $u_1 = [1 \ 0 \ 0]$ 、 $u_3 = [0 \ 1 \ 0]$ 和 $u_5 = [0 \ 0 \ 1]$ 。通过遍历这三个电压得到这三个电压矢量对应的代价函数值 g_1 、 g_3 和 g_5 。根据代价函数 g_1 、 g_3 和 g_5 的大小关系选出代价函数值最小的对应电压矢量 $u_{\min}$ 和代价函数值次小的对应电压矢量 $u_{\text{sub-min}}$ 。 $u_{\min}$ 和 $u_{\text{sub-min}}$ 的选定如表 1 所示。

表 1 $u_{\min}$ 和 $u_{\text{sub-min}}$ 的选定

Tab. 1 Selection of $u_{\min}$ and $u_{\text{sub-min}}$

代价函数值	$u_{\min}$	$u_{\text{sub-min}}$
$g_1 < g_3 < g_5$	u_1	u_3
$g_1 < g_5 < g_3$	u_1	u_5
$g_3 < g_1 < g_5$	u_3	u_1
$g_3 < g_5 < g_1$	u_3	u_5
$g_5 < g_1 < g_3$	u_5	u_1
$g_5 < g_3 < g_1$	u_5	u_3

两个相邻最优有效电压矢量 u_{opt1} 和 u_{opt2} 是由 $u_{\min}$ 和 $u_{\text{sub-min}}$ 的位置决定的。 u_{opt1} 和 u_{opt2} 的选定方法如表 2 所示。

表 2 相邻最优电压选定方法

Tab. 2 Adjacent optimal voltage selection method

$u_{\min}$	$u_{\text{sub-min}}$	u_{opt1}	u_{opt2}
u_1	u_3	u_1	u_2
u_1	u_5	u_1	u_6
u_3	u_1	u_3	u_2
u_3	u_5	u_3	u_4
u_5	u_1	u_5	u_6
u_5	u_3	u_5	u_4

两个最优有效电压矢量的选择过程如图 2 所示。假定 $u_{\min}$ 是 u_1 ,则最优化的期望电压在扇区 1 或者扇区 6 中, u_{opt1} 就等于 u_1 ; u_{opt2} 的值取决于 $u_{\text{sub-min}}$ 的位置,如果 u_3 是 $u_{\text{sub-min}}$,那么 u_{opt2} 就等于 u_2 ;如果 u_5 是 $u_{\text{sub-min}}$,那么 u_{opt2} 就等于 u_6 。

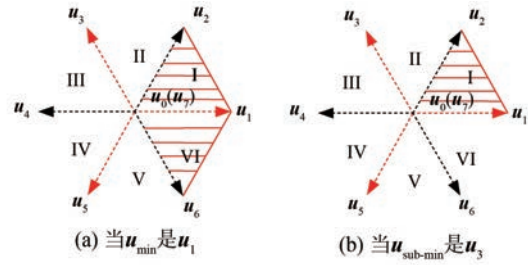


图 2 电压矢量选择过程

Fig. 2 Voltage vector selection process

两个相邻最优有效电压矢量 u_{opt1} 和 u_{opt2} 经过三次代价函数预测计算挑选得到,可以高效地选择相邻电压矢量的所有组合,减小计算量。

2.2 电压矢量作用时间的计算

在计算电压矢量的作用时间时,要求作用时间必须恒为正值,所选取的最优有效电压矢量在一个周期内实际作用效果如图 3 所示。

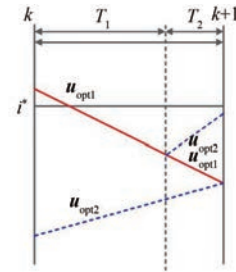


图 3 有效电压矢量作用图

Fig. 3 Effective voltage vector action diagram

在理想最优有效电压作用下, d 、 q 轴的电压误差为零,但实际应用中,电压误差不可能为零。因此每个最优有效电压矢量产生的 d 、 q 轴电压误差分别为

$$E_d(u_{\text{opt1}}) = |u_d^* - u_d^p(u_{\text{opt1}})| \quad (6)$$

$$E_q(u_{\text{opt1}}) = |u_q^* - u_q^p(u_{\text{opt1}})| \quad (7)$$

$$E_d(u_{\text{opt2}}) = |u_d^* - u_d^p(u_{\text{opt2}})| \quad (8)$$

$$E_q(u_{\text{opt2}}) = |u_q^* - u_q^p(u_{\text{opt2}})| \quad (9)$$

综合考虑 d 、 q 轴的电压误差,可建立计算持续时间的方程如下:

$$T_1[E_d(u_{\text{opt1}}) + E_q(u_{\text{opt1}})] + T_2[E_d(u_{\text{opt2}}) + E_q(u_{\text{opt2}})] = \delta \quad (10)$$

$$T_1 + T_2 = T_s \quad (11)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为 u_{opt1} 和 u_{opt2} 的持续时间; δ 是一个变量,表示一个控制周期后的 d 、 q 轴的电压误差。

联立式(10)和(11),解得

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\delta - [E_d(\mathbf{u}_{opt1}) + E_q(\mathbf{u}_{opt1})]T_s}{D} \\ T_2 = \frac{[E_d(\mathbf{u}_{opt2}) + E_q(\mathbf{u}_{opt2})]T_s - \delta}{D} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $D = E_d(\mathbf{u}_{opt1}) + E_q(\mathbf{u}_{opt1}) - E_d(\mathbf{u}_{opt2}) - E_q(\mathbf{u}_{opt2})$ 。

可见 T_1 和 T_2 的大小与变量 δ 有关,所以为了保证 T_1 和 T_2 的值同时大于零,必须对 δ 的大小进行分析。由于中间变量 D 的表达式中不包含变量 δ ,所以可从中间变量 D 的表达式入手,分两种情况讨论。

第一种是 D 大于零的情况,此时满足: $E_d(\mathbf{u}_{opt1}) + E_q(\mathbf{u}_{opt1}) > E_d(\mathbf{u}_{opt2}) + E_q(\mathbf{u}_{opt2})$ 。

此时若要保证 T_1 和 T_2 都大于零,则 δ 的取值范围为

$$\begin{cases} \delta > [E_d(\mathbf{u}_{opt2}) + E_q(\mathbf{u}_{opt2})]T_s \\ \delta < [E_d(\mathbf{u}_{opt1}) + E_q(\mathbf{u}_{opt1})]T_s \end{cases} \quad (13)$$

第二种是 D 小于零的情况,此时满足: $E_d(\mathbf{u}_{opt1}) + E_q(\mathbf{u}_{opt1}) < E_d(\mathbf{u}_{opt2}) + E_q(\mathbf{u}_{opt2})$ 。

此时若要保证 T_1 和 T_2 都大于零,则 δ 的取值范围为

$$\begin{cases} \delta > [E_d(\mathbf{u}_{opt1}) + E_q(\mathbf{u}_{opt1})]T_s \\ \delta < [E_d(\mathbf{u}_{opt2}) + E_q(\mathbf{u}_{opt2})]T_s \end{cases} \quad (14)$$

综上, δ 的取值范围为

$$g_{\min}T_s < \delta < g_{\max}T_s \quad (15)$$

式中: $g_{\min}$ 和 $g_{\max}$ 分别为两个最优电压矢量对应的电压差型代价函数的最小值和最大值。

选择合适的 δ 之后,电压矢量的持续时间就恒大于零,经多次验证,变量 δ 取值为

$$\delta = \frac{g_{opt1} + g_{opt2}}{2g_{opt1}g_{opt2}}T_s \quad (16)$$

式中: g_{opt1} 和 g_{opt2} 分别为最优电压矢量 $\mathbf{u}_{opt1}$ 和 $\mathbf{u}_{opt2}$ 对应的电压差型代价函数值。

2.3 三种控制策略对比分析

根据上述控制原理,对占空比、双矢量以及低复杂度双矢量三种控制策略在矢量数目、预测次数、电压矢量选择范围及矢量作用时间计算方法等方面进行对比分析,其结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出占空比控制策略需要经过 6 次在线电流预测,在 6 个有效电压矢量中选择一个最优电压矢量,但选择的电压矢量只能在

基本电压矢量方向上,有局限性。而双矢量控制策略需要在线进行 12 次预测,在选择出第一个最优电压矢量 $\mathbf{u}_{opt1}$ 的基础上,再进行一次电压矢量选择来确定第 2 个最优电压矢量 $\mathbf{u}_{opt2}$,虽然电压矢量选择时方向和幅值是任意的,但两个有效矢量作用时间的计算是采用 q 轴电流无差拍方法,计算量较大。低复杂度双矢量策略选择电压矢量方向任意,幅值任意,相比于双矢量控制策略,在线预测次数仅为 3 次,即可选择出 2 个最优有效电压矢量,同时代价函数采用以电压误差为基准,不需要进行电流预测,并采用基于 dq 轴电压误差方法计算电压矢量作用时间,极大地减小了计算量。

表 3 三种控制策略比较

Tab. 3 Comparison of three control strategies

参数名称	占空比	双矢量	低复杂度双矢量
有效电压矢量数目	1	2	2
预测次数	6	12	3
电压矢量选择范围	固定方向和幅值	任意方向和幅值	任意方向和幅值
矢量作用时间计算方法	q 轴电流无差拍	q 轴电流无差拍	基于 dq 轴电压误差

3 仿真分析

为了验证本文所提策略的有效性,基于 Matlab/Simulink 平台构建了永磁同步电机低复杂度双矢量模型预测控制系统的离散仿真模型。分别对占空比控制策略、双矢量控制策略和本文所提的低复杂度双矢量控制策略,在空载启动、突加负载运行以及转速突增三种情况下进行仿真。仿真中,采样频率均为 10 kHz,采用定步长计算,使用 ode4 求解算法。使用的永磁同步电机的参数如表 4 所示。

表 4 永磁同步电机参数

Tab. 4 Parameters of permanent magnet synchronous motor

参数名称	参数值
额定电压 U_{dc}/V	200
电机极对数 P_n	4
定子电阻 R_s/Ω	0.985
定子电感 L/mH	8.5
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.195 7
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.001 2
摩擦因数 $B/(kg \cdot m \cdot s^{-1})$	0.000 492 4
额定转速 $(r \cdot min^{-1})$	2 000

对仿真系统做空载起动时的测试。永磁同步电机以给定转速为 800 r/min 空载起动,对动态响应速度, dq 轴电流波动进行分析。空载起动到达稳定后,三种控制策略下对应的 i_d 和 i_q 电流仿真结果分别如图 4 和图 5 所示。

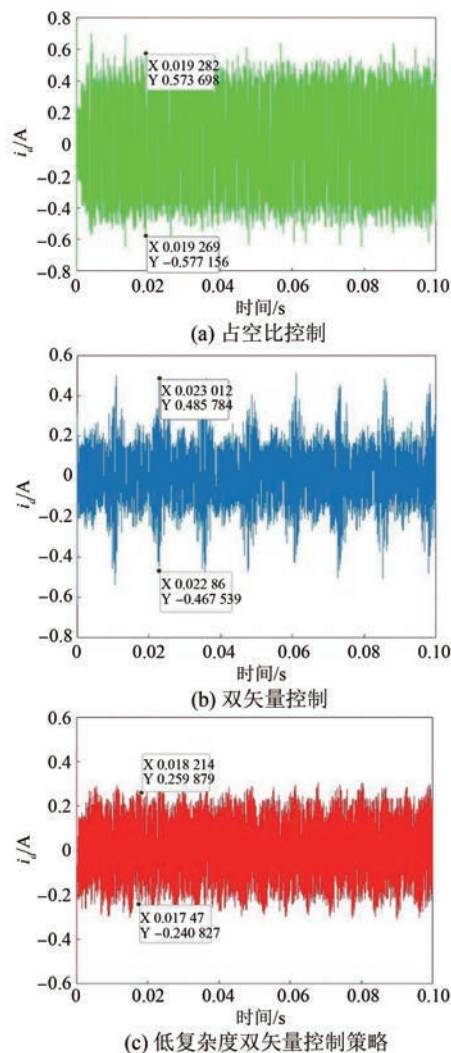


图 4 转速为 800 r/min 空载起动时三种控制策略下 i_d 电流波形

Fig. 4 i_d current waveforms at a speed of 800 r/min under three control strategies

从图 4 可知,占空比策略下 i_d 上下波形值为 1.150 854 A,双矢量控制策略下为 0.951 523 A,而低复杂度双矢量控制策略下为 0.500 706 A。相较于占空比策略,双矢量策略电流波动分别减少了 56.492%,47.378%。

由图 5 可知,占空比控制策略下 i_q 上下波形值为 0.830 328 A,双矢量控制策略下为

0.658 095 A,而所提的低复杂度双矢量控制策略下为 0.639 641 A。相较于占空比策略,双矢量策略电流波动分别减少了 20.742%,2.804%。

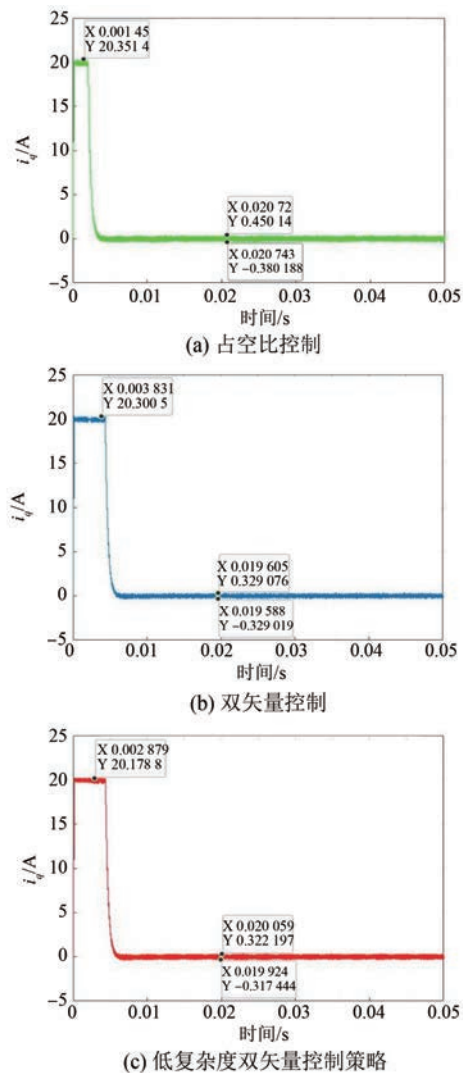


图 5 转速为 800 r/min 空载起动时三种控制策略下 i_q 电流波形

Fig. 5 i_q current waveforms at a speed of 800 r/min under three control strategies

电机在给定转速为 800 r/min 空载起动时,对 a 相定子电流进行 FFT 分析,如图 6 所示。结果表明,频率相同时,相较于广义双矢量控制策略和占空比控制策略,所提的低复杂度控制策略下的直流电流波动确实有所降低。

进一步对仿真系统做突加负载测试。永磁同步电机设定转速为 800 r/min,0.02 秒时突加 5 N·m 的负载,对电磁转矩 T_e 、转速 N_r 进行分析,其结果分别如图 7 和 8 所示。

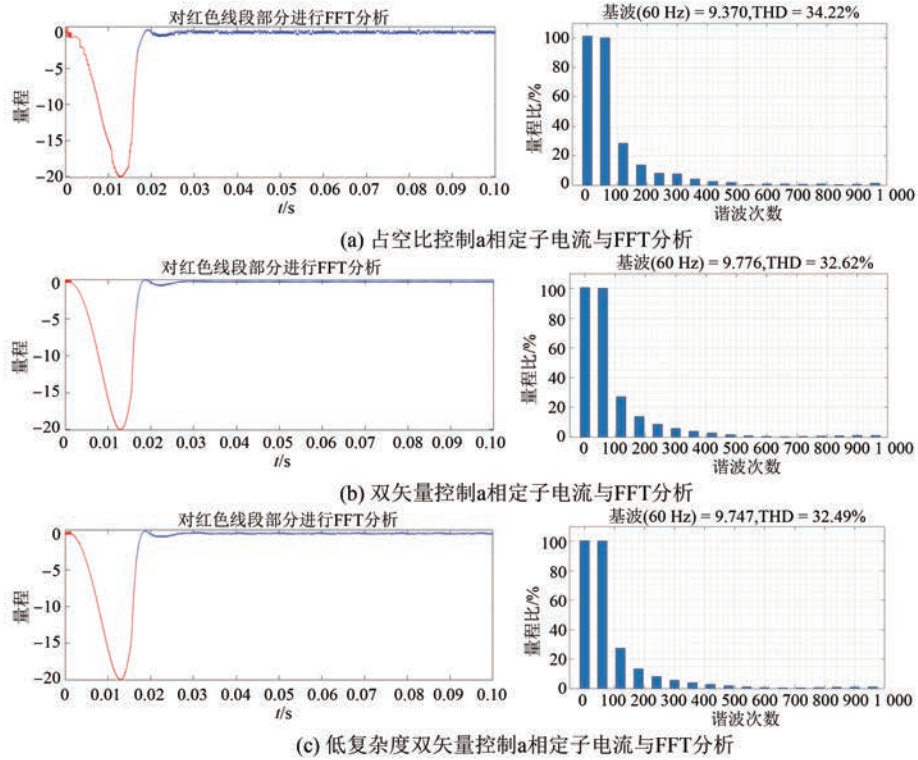
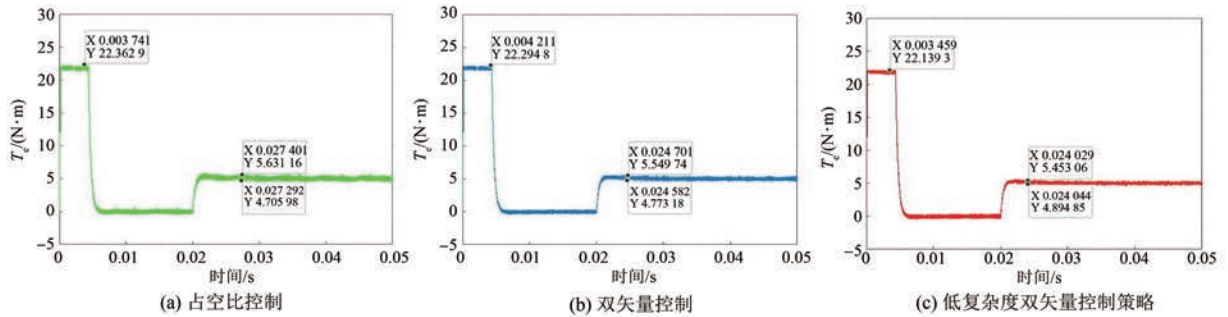
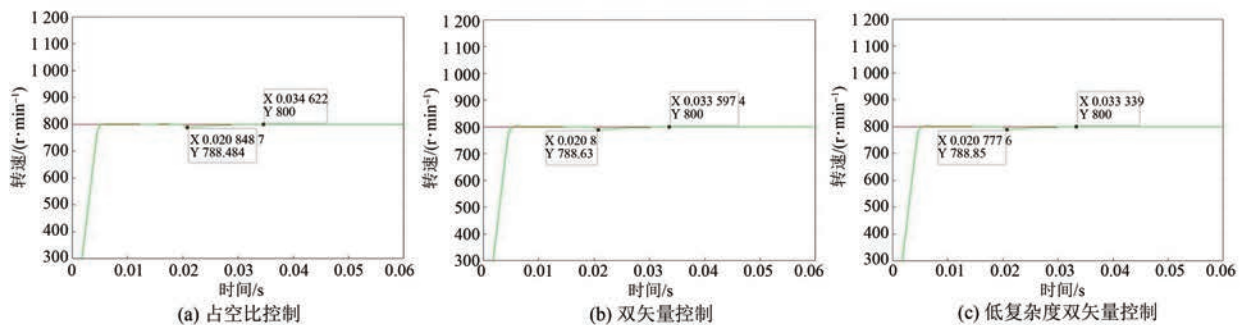


图 6 转速为 800 r/min 空载起动时三种控制策略下 a 相定子电流与 FFT 分析

Fig. 6 A-phase stator current and FFT analysis under three control strategies during no-load start-up

图 7 转速为 800 r/min 突加负载时三种控制策略下的 T_e Fig. 7 T_e at 800 r/min sudden load under three control strategies图 8 转速为 800 r/min 突加负载时三种控制策略下的 N_r Fig. 8 N_r at 800 r/min sudden load under three control strategies

由图 7 可知,在突加负载情况下,低复杂度双矢量控制策略下转矩脉动为 11.16%;双矢量策略下转矩脉动为 15.53%;占空比策略转矩脉动为 18.50%。可见,低复杂度双矢量策略能够更好地改善系统稳定性,降低转矩脉动。

由图 8 可知,相比于占空比控制和双矢量控

制,低复杂度双矢量控制策略能更快达到稳定状态,且稳态转速波动较小。

对仿真系统做给定转速突增测试。永磁同步电机初始转速为 400 r/min,0.02 s 时突增为 800 r/min,对 q 轴电流波动进行分析,电流仿真结果如图 9 所示。

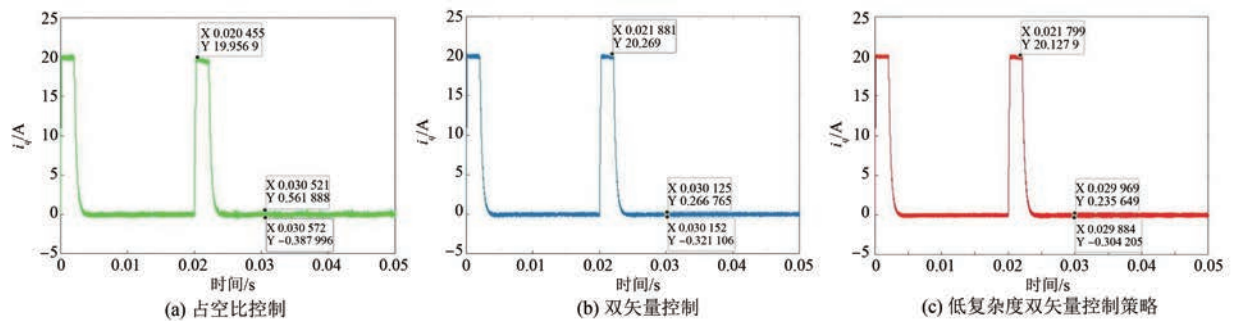


图 9 0.02 s 转速突增为 800 r/min 时三种控制策略下的 i_q 电流波形

Fig. 9 i_q currents waveforms under three control strategies for 0.02 s speed suddenly increases to 800 r/min

由图 9 可见,转速在 0.02 s 从 400 r/min 突增为 800 r/min 时,占空比控制策略下 i_q 上下波形值为 0.949 884 A,双矢量控制策略下其为 0.587 871 A,而低复杂度双矢量控制策略下仅为 0.539 854 A。相较于占空比控制策略,双矢量策略电流波动分别减少了 43.166% 和 8.167%。

同时,对仿真程序运行时间进行对比分析。在同等设备,同等情况下电机设定 800 r/min 空载起动时三种控制策略下的仿真程序运行时间如表 5 所示。可见在本文所提的低复杂度双矢量控制策略下,由于程序优化,其运行时间略大于占空比控制策略。但相较于传统双矢量控制策略运行时间节约很多。

表 5 三种控制策略下的仿真程序运行时间

Tab. 5 Simulating program runtime at three control strategies		s
控制策略	程序运行时间	
占空比	11.26	
双矢量	18.52	
低复杂度双矢量	12.64	

4 结语

本文提出了一种低复杂度双矢量模型预测电压控制策略。该策略以电压误差为基准,通过三次代价函数计算,选择出两个相邻最优有效电压矢量。并引入 dq 轴电压差作用时间计算方法,计

算最优有效电压矢量作用时间,以降低计算量。仿真结果表明,相较于占空比策略和传统双矢量策略,所提策略可有效减小电流波动和转矩脉动,提高系统稳态性能,证明了所提策略的优越性。

参考文献

[1] 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.

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

[3] 孙振兴. 交流伺服系统先进控制理论及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.

SUN Z X. Research on advanced control theory and application of AC servo system [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

- [4] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, Part 2: Field weakening operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 648-657.
- [5] 杨狂彪, 石坚. 改进型永磁同步电机有限控制集模型预测速度控制 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 92-100.
- YANG K B, SHI J. Improved finite control set model predictive speed control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 92-100.
- [6] 朱芮, 吴迪, 陈继峰, 等. 电机系统模型预测控制研究综述 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 1-10+30.
- ZHU R, WU D, CHEN J F, et al. A review of research on motor system model predictive control [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46 (8): 1-10+30.
- [7] BANDY K, STUMPF P. Quadratic regression model-based indirect model predictive control of AC drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11): 13158-13177.
- [8] 徐艳平, 张保程, 周钦. 永磁同步电机双矢量模型预测电流控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (20): 222-230.
- XU Y P, ZHANG B C, ZHOU Q. Two-vector based model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32 (20): 222-230
- [9] 徐艳平, 王极兵, 张保程, 等. 永磁同步电机三矢量模型预测电流控制 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 980-988.
- XU Y P, WANG J B, ZHANG B C, et al. Three-vector-based model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33 (5): 980-988
- [10] ZHOU Z Q, XIA C L, YAN Y, et al. Torque ripple minimization of predictive torque control for PMSM with extended control set [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 6930-6939.
- [11] 李晨, 谷鑫, 周湛清, 等. 永磁同步电机低计算复杂度离散开关占空比预测转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4629-4639+4741.
- LI C, GU X, ZHOU Z Q, et al. Low computational burden predictive torque control with discrete switching duty ratio for PMSM drives [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4629-4639 +4741.
- [12] ZHANG X G, HOU B S. Double vectors model predictive torque control without weighting factor based on voltage tracking error [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (3): 2368-2380.
- [13] 李祥林, 薛志伟, 阎学雨, 等. 基于电压矢量快速筛选的永磁同步电机三矢量模型预测转矩控制 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1666-1678.
- LI X L, XUE Z W, YAN X Y, et al. Voltage vector rapid screening-based three-vector model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1666-1678.
- [14] TAO T, ZHAO W X, HE Y, et al. Multivector predictive current control for five-phase PM motor by using hybrid duty modulation technology [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1603-1612.
- [15] YANG Q F, KARAMANAKOS P, TIAN W, et al. Computationally efficient fixed switching frequency direct model predictive control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37 (3): 2761-2777.
- [16] 姚骏, 刘瑞阔, 尹潇. 永磁同步电机三矢量低开关频率模型预测控制研究 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2935-2945.
- YAO J, LIU R K, YIN X. Research on 3-vector model predictive control with low switching frequency of permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 2935-2945.
- [17] ZHANG Y C, XU D L, LIU J L, et al. Performance improvement of model-predictive current control of permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2017, 53 (4): 3683-3695.
- [18] 徐殿胜, 张志锋. 一种改进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, 2022, 49(11): 1-8.
- XU D S, ZHANG Z F. An improved dual-vector model predictive control strategy for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines &

- Control Application, 2022, 49 (11): 1-8.
- [19] LI X L, XUE Z W, YAN X Y, et al. Low-complexity multivector-based model predictive torque control for PMSM with voltage preselection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36 (10): 11726-11738.
- [20] 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.
- [21] WANG C, JI J H, TANG H Y, et al. Improved model predictive current control for linear vernier permanent-magnet motor with efficient voltage vectors selection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2833-2842.
- [22] 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/OL]. 中国电机工程学报, 2023-06-01. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223252>.
- CHEN R, SHU H P, ZHAI K M. Low-complexity three-vector model predictive current control with fixed switching frequency for PMSM [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023-06-01. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223252>.
-
- 收稿日期:2023-08-30
收到修改稿日期:2023-10-19
作者简介:
杨狂彪(1997-),男,硕士研究生,研究方向为永磁电机新型模型预测控制,2646016633@qq.com;
* 通信作者:石 坚(1982-),男,博士,讲师,主要研究方向为汽车电子技术和车用电机驱动控制技术,shi@gzhu.edu.cn。

Low Complexity Dual Vector Model Predictive Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor

YANG Kuangbiao, CHEN Dingxin, SHI Jian *

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Key words: permanent magnet synchronous motor; model predictive control; cost function; low complexity; dq axis voltage difference

In order to solve the problems of large computation and current fluctuations in the model predictive current control of permanent magnet synchronous motor, a low complexity dual vector model predictive voltage control strategy is proposed. This method predicts and evaluates three non-adjacent effective voltage vectors only through cost functions, and two adjacent optimal effective voltage vectors can be determined accurately and quickly based on the relationship between the values of three cost functions, without traversing all the voltage vectors. The selection of two optimal effective voltage vectors is shown in Fig.1. Assuming $\mathbf{u}_{\min}$ is $\mathbf{u}_1$, the best expected voltage is in sector 1 or sector 6, where $\mathbf{u}_{\text{opt1}}$ is equal to $\mathbf{u}_1$, and the value of $\mathbf{u}_{\text{opt2}}$ depends on the position of $\mathbf{u}_{\text{sub-min}}$. If $\mathbf{u}_3$ is $\mathbf{u}_{\text{sub-min}}$, then $\mathbf{u}_{\text{opt2}}$ is equal to $\mathbf{u}_2$; If $\mathbf{u}_5$ is $\mathbf{u}_{\text{sub-min}}$, then $\mathbf{u}_{\text{opt2}}$ is equal to $\mathbf{u}_6$. The optimal and effective voltage vector selection can reduce the prediction calculation, and the dq axis voltage difference action time calculation method is introduced to calculate the optimal effective voltage vector action time in order to reduce the calculation.

A permanent magnet synchronous motor driven

by a two-level three-phase inverter is simulated using the Matlab/Simulink simulation software platform in this paper. Through simulation analysis, compared to the duty cycle strategy and the traditional dual vector model predictive current control strategy, the proposed low complexity permanent magnet synchronous motor control strategy can effectively reduce the computational complexity and current fluctuation and improve the torque ripple on the basis of ensuring the steady-state and dynamic performance of the system. Although this method requires additional running time during the optimization process compared to the duty cycle strategy, considering the improvement of system performance, the additional time is acceptable. Simulation analysis proves the superiority of this method.

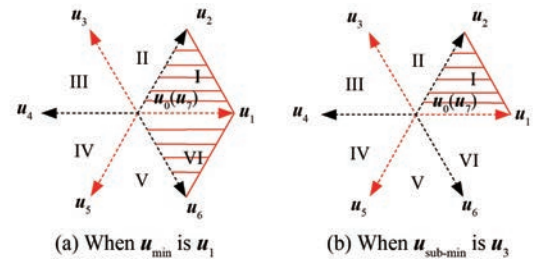


Fig. 1 Voltage vector selection process