

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.160308

永磁同步电机双矢量模型预测电流控制

徐艳平 张保程 周 钦

(西安理工大学电气工程系 西安 710048)

摘要 在占空比模型预测电流控制中,由于第二个电压矢量只能是零电压矢量,在每个采样周期中只能选择6个固定方向上的电压矢量,因此电流仍存在较大波动。提出一种双矢量模型预测电流控制方法,该方法在每一个采样周期中进行两次电压矢量选择,可以在进行第二次电压矢量选择时采用非零电压矢量,电压矢量的选择范围扩大为任意方向、任意幅值的电压矢量,并且在价值函数中考虑了作用时间对电压矢量选择的影响,使得电压矢量的选择更加准确。实验结果表明:所提出的方法具有良好的静态性能,同时与占空比模型预测电流控制相比,该方法有效地减小了电流波动。

关键词: 永磁同步电机 双矢量 模型预测控制 电流控制

中图分类号: TM315

Two-Vector Based Model Predictive Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motor

Xu Yanping Zhang Baocheng Zhou Qin

(Department of Electrical Engineering Xi'an University of Technology
Xi'an 710048 China)

Abstract In the duty cycle model predictive current control, there are still large current ripples because the second voltage vector is always zero-voltage vector and the voltage vector is selected in six fixed directions in each sampling period. In this paper, a two-vector based model predictive current control strategy is proposed. This method performs two voltage vector selections in each sampling period, and the range of voltage vector selection is expanded to arbitrary directions and amplitudes because the second voltage vector is not fixed to zero-voltage vector yet. Besides, the duration of voltage-vector is evaluated simultaneously in cost function, which makes the selection of voltage vector more accurate. Experimental results show that the proposed method has good steady-state and dynamic performance. Compared with the duty cycle model predictive current control, the proposed method can reduce the current ripples effectively.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, two-vector, model predictive control, current control

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有体积小、功率密度高、结构简

单、转矩惯性比大的特性^[1],而且,随着稀土永磁材料性能的提高和成本的逐步降低,以及电力电子技术的发展,PMSM引起了众多研究人员的青睐,其应用领域逐步得到推广^[2]。

永磁同步电机的电流环性能是影响系统性能的关键因素。目前,永磁同步电机电流控制的主要方

法有比例积分电流控制^[3]、滞环电流控制^[4]和预测电流控制^[5-8]。比例积分电流控制器结构简单、控制精度高,但是受带宽限制动态性能较差,而且参数整定困难;滞环电流控制器鲁棒性强、响应迅速,但是这种 bang-bang 控制方式存在开关频率不固定、电流脉动较大等问题;预测电流控制器根据电机方程直接计算出达到给定电流值所需的电压值,获得了较好的动态性能和较小的电流波动,但是由于预测控制是基于电机数学模型的控制方法,对电机参数的准确性有着较高要求。模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 是一种新的控制算法,是根据系统当前状态和数学模型预测出系统未来的状态,再根据期望值进行在线寻优的控制算法,但是由于要进行在线求解最优方程导致该算法计算量较大。随着近年来集成电路设计制造技术的发展进步,数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 等控制芯片计算能力的大幅提高,使得在线完成 MPC 成为可能,因此 MPC 吸引了国内外学者的广泛关注。

MPC 根据是否需要脉冲宽度调制器分为连续控制集 MPC 和有限控制集 MPC。目前,连续控制集 MPC 的应用主要集中在替换矢量控制中的传统 PI 电流控制器^[8,9],通过在线求解最优化问题得到最优的电压给定值。文献[9-11]用连续控制集模型预测电流控制器替代了传统矢量控制中电流环 PI 控制器,有效地提高了电流响应速度和系统参数鲁棒性。有限控制集 MPC 充分考虑了逆变器的离散特性,具有控制思想简单、便于处理多约束条件和高动态性能等优点。但由于有限控制集 MPC 中控制集的有限性,系统稳态性能较差,目前针对有限控制集 MPC 的改进算法主要集中在稳态性能的提高,由传统 MPC 的单矢量控制^[11-13]发展为多矢量控制^[14-17]。文献[14,15]针对传统 MPC 策略每个采样周期中只有一个电压矢量作用导致稳态性能较差的问题,将占空比控制加入到了传统 MPC 策略,提出了占空比 MPC 策略,但是占空比的计算是在电压矢量选择之后,不能保证所选择的电压矢量全局最优。文献[16]针对异步电机提出了一种最优占空比 MPC 转矩控制策略,将电压矢量和占空比同时加入到价值函数中进行优化,保证了选择电压矢量的全局最优,明显提高了系统稳态性能,但是由于第二个电压矢量总是零电压矢量,导致高速时稳态较差。文献[17]针对文献[16]中第二个电压矢量总是零电压矢量的问题,提出了一种基于广义双矢量的异步电机 MPC

转矩控制策略,将电压矢量的选择范围扩展到任意的两个电压矢量范围内,在两两组合的电压矢量中利用价值函数同时选择出两个电压矢量,但是由于要在 25 种电压矢量组合中进行寻优,计算量较大,对硬件要求比较高,应用比较困难。

为了改善占空比 MPC 的稳态性能,本文选取电流作为控制量,即模型预测电流控制 (Model Predictive Current Control, MPCC)^[18],在占空比 MPCC 的基础上,针对永磁同步电机提出了一种双矢量 MPCC 策略,该控制策略在每个采样周期进行两次电压矢量选择,将占空比 MPCC 中第二个电压矢量的选择范围从零电压矢量扩展到 7 个电压矢量,使得价值函数可以在更大的范围内优化得出最优电压矢量,并且只需要进行 14 次电压矢量选择。实验结果表明,所提出控制策略有效地减小了系统的交直流电流波动。

1 永磁同步电机离散数学模型

表贴式永磁同步电机在旋转坐标系 (dq) 下的定子电流状态方程为

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s}(u_q - R_s i_q - \omega_{re} L_s i_d - \omega_{re} \psi_f) \quad (1)$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s}(u_d - R_s i_d + \omega_{re} L_s i_q) \quad (2)$$

式中, u_d 和 u_q 分别为直、交轴电压; i_d 和 i_q 分别为直、交轴电流; L_s 为定子电感; R_s 为定子电阻; ω_{re} 为转子电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

采用一阶欧拉离散法将式 (1) 和式 (2) 离散化可得

$$i_q(k+1) = i_q(k) + \frac{T_s}{L_s}[u_q(k) - R_s i_q(k) + E_q(k)] \quad (3)$$

$$i_d(k+1) = i_d(k) + \frac{T_s}{L_s}[u_d(k) - R_s i_d(k) + E_d(k)] \quad (4)$$

$$E_q(k) = -\omega_{re}(k)L_s i_d(k) - \omega_{re}(k)\psi_f \quad (5)$$

$$E_d(k) = \omega_{re}(k)L_s i_q(k) \quad (6)$$

式中, $E_q(k)$ 和 $E_d(k)$ 分别为交、直轴反电动势在当前采样时刻的值; $u_d(k)$ 和 $u_q(k)$ 分别为直、交轴电压在当前采样时刻的值; $i_d(k)$ 和 $i_q(k)$ 分别为直、交轴电流在当前采样时刻的值; T_s 为采样周期; $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$ 分别为直、交轴电流在下一个采样时刻的预测值。

2 双矢量模型预测电流控制策略

2.1 传统模型预测电流控制

传统 MPCC 通过旋转变换把定子电流分解成 dq 坐标系下的励磁分量 i_d 和转矩分量 i_q , 然后通过直接控制 i_d 和 i_q 实现了定子电流两个分量的解耦控制。传统 MPCC 的核心思想是通过价值函数选择使预测电流和给定电流误差最小的电压矢量作为最优电压矢量。电流预测值可由永磁同步电机的离散数学模型式 (3) 和式 (4) 给出, 选取价值函数为

$$g_i = |i_q^* - i_q(k+1)| + |i_d^* - i_d(k+1)| \quad (7)$$

式中, i_q^* 是定子电流 q 轴分量给定值; i_d^* 是定子电流 d 轴分量给定值。

两电平逆变器可以产生 6 个有效电压矢量和 2 个零电压矢量, 共 7 种电压矢量。故针对这 7 种电压矢量需要对 i_d 和 i_q 进行 7 次预测, 将预测出的电流值代入价值函数式 (7) 利用价值函数进行 7 次评价, 使 g_i 最小的电压矢量为最优电压矢量, 然后将最优电压矢量输出到脉冲发生器以控制逆变器。

2.2 占空比模型预测电流控制

占空比 MPCC 是在传统 MPCC 的基础上引入占空比控制, 即计算被价值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。

本文采用 q 轴电流无差拍来计算占空比, 即在一个采样周期中, 通过分配最优电压矢量和零电压矢量作用时间使得 i_q 在 $k+1$ 时刻达到给定值 i_q^* , 即

$$i_q(k+1) = i_q(k) + s_{\text{opt}} t_{\text{opt}} + s_0 (T_s - t_{\text{opt}}) = i_q^* \quad (8)$$

式中, t_{opt} 是最优电压矢量的作用时间; s_{opt} 是最优电压矢量作用时 i_q 的斜率; s_0 是零电压矢量作用时 i_q 的斜率。由式 (1) 可得 s_0 和 s_{opt} 的计算公式为

$$s_0 = \left. \frac{di_q}{dt} \right|_{u_q=0} = \frac{1}{L_s} (-R_s i_q - \omega_{re} L_s i_d - \omega_r \psi_f) \quad (9)$$

$$s_{\text{opt}} = \left. \frac{di_q}{dt} \right|_{u_q=u_{q,\text{opt}}} = s_0 + \frac{u_{q,\text{opt}}}{L_s} \quad (10)$$

式中, $u_{q,\text{opt}}$ 是最优电压矢量对应的定子电压交轴分量。将式 (9) 和式 (10) 代入式 (8) 可得最优电压矢量的占空比为

$$\gamma_{\text{opt}} = \frac{t_{\text{opt}}}{T_s} = \frac{i_q^* - i_q(k) - s_0 T_s}{T_s (s_{\text{opt}} - s_0)} \quad (11)$$

因为占空比 MPCC 中每个采样周期中都有零电压矢量作用, 所以通过价值函数选择最优电压矢量时不需要考虑零电压矢量, 只需要在 6 个有效电压矢量中选择即可。两电平逆变器驱动的 PMSM 占空比 MPCC 方法如下:

(1) 根据 PMSM 离散数学模型式 (3) 和式 (4) 预测定子电流在旋转坐标系下的电流分量预测值。

(2) 由式 (7) 计算 6 个有效电压矢量分别作用时的价值函数 g_i , 选择使 g_i 最小的电压矢量作为最优电压矢量。

(3) 由式 (11) 计算最优电压矢量的占空比, 然后将最优电压矢量和占空比输出到脉冲发生器以控制逆变器运行。

2.3 双矢量模型预测电流控制

双矢量 MPCC 的思想是在传统 MPCC 选择出最优电压矢量 V_{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 V_{opt2} , 最优电压矢量 V_{opt2} 选择的依据是: 让 V_{opt1} 和 V_{opt2} 共同作用一个采样周期后直、交轴电流 i_d 和 i_q 与其给定值的误差最小, 所以在进行最优电压矢量 V_{opt2} 的选择时仍采用如式 (7) 所示的价值函数。

在进行 V_{opt2} 选择时, 将最优电压矢量 V_{opt1} 和 7 种电压矢量分别组合, 并且预先分配每个组合中两个电压矢量的作用时间, 然后利用数学模型预测电流的同时考虑两个电压矢量的作用时间, 这样预测方程式 (3) 和式 (4) 中的 u_q 和 u_d 就要写成

$$u_q = t_{\text{opt1}} u_{q,\text{opt1}} + (T_s - t_{\text{opt1}}) u_{qj} \quad (12)$$

$$u_d = t_{\text{opt1}} u_{d,\text{opt1}} + (T_s - t_{\text{opt1}}) u_{dj} \quad (13)$$

式中, t_{opt1} 是最优电压矢量 V_{opt1} 的作用时间; $u_{d,\text{opt1}}$ 和 $u_{q,\text{opt1}}$ 分别为最优电压矢量 V_{opt1} 对应的定子电压直、交轴电压分量; u_{dj} 和 u_{qj} 分别为第 j 个电压矢量 V_j 对应的直、交轴电压分量 ($j=1, 2, \dots, 7$)。这样每组电压矢量及其作用时间组合都能得到一个电流预测值, 7 组电压矢量及其作用时间组合就可以得到 7 个电流预测值。然后, 通过价值函数选择出与电流给定值最接近的电流预测值对应的电压矢量组合及其作用时间。这就相当于在价值函数中考虑了作用时间对电压矢量选择的影响, 从而不仅优化出了电压矢量, 而且优化出了作用时间。这样一方面体现了 MPC 策略易于进行多目标控制的特点; 另一方面, 因为在占空比 MPCC 中, 进行电流预测时是按照电压矢量作用整个采样周期进行预测的, 加入占

空比控制后, 价值函数选择的电压矢量不再作用整个采样周期, 导致最终作用的电压矢量不能保证仍然为最优。而在本文提出的控制策略中, 通过预先分配电压矢量的作用时间, 价值函数选择出的是电压矢量和作用时间的最优组合, 可以保证最终作用的电压矢量仍然为最优, 所以电压矢量的选择更加准确。

本文采用 q 轴电流无差拍来分配一个采样周期中两个电压矢量 V_{opt1} 和 V_j 的作用时间, 需满足

$$i_q(k+1) = i_q(k) + s_{\text{opt1}}t_{\text{opt1}} + s_j(T_s - t_{\text{opt1}}) = i_q^* \quad (14)$$

根据式 (14) 可得 V_{opt1} 的作用时间为

$$t_{\text{opt1}} = \frac{i_q^* - i_q(k) - s_j T_s}{s_{\text{opt1}} - s_j} \quad (15)$$

式中, s_{opt1} 、 s_j 分别为两个电压矢量 V_{opt1} 和 V_j 作用时 i_q 的斜率; V_j 的作用时间为 $T_s - t_{\text{opt1}}$ 。 s_{opt1} 和 s_j 可分别表示为

$$s_{\text{opt1}} = \left. \frac{di_q}{dt} \right|_{u_q=u_{q_{\text{opt1}}}} = s_0 + \frac{u_{q_{\text{opt1}}}}{L_s} \quad (16)$$

$$s_j = \left. \frac{di_q}{dt} \right|_{u_q=u_{qj}} = s_0 + \frac{u_{qj}}{L_s} \quad (17)$$

基于双矢量的模型预测电流控制方法如下:

(1) 根据 2.1 节中的传统 MPCC 策略选择最优电压矢量 V_{opt1} , 然后由式 (15) 分配所有 7 种电压矢量组合中的两个电压矢量在一个采样周期中的各自作用时间。

(2) 根据 PMSM 离散数学模型式 (3) 和式 (4), 结合式 (12) 和式 (13) 预测 i_d 和 i_q 在 7 种电压矢量化组合下的电流值, 代入到式 (7) 计算对应的 g_i 值。

(3) 比较 7 个 g_i 值, 选择使 g_i 最小的电压矢量 V_{opt2} 作为第二个最优电压矢量, 将 V_{opt1} 、 V_{opt2} 和对应的作用时间输出到脉冲发生器控制逆变器。

双矢量 MPCC 的系统控制框图如图 1 所示。

2.4 三种控制策略比较

下面对传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 这三种控制策略从电压矢量选择准确性和电压矢量选择范围两个方面进行分析比较。

2.4.1 电压矢量选择准确性

图 2~图 4 分别为传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 三种控制策略的电压矢量选择示意

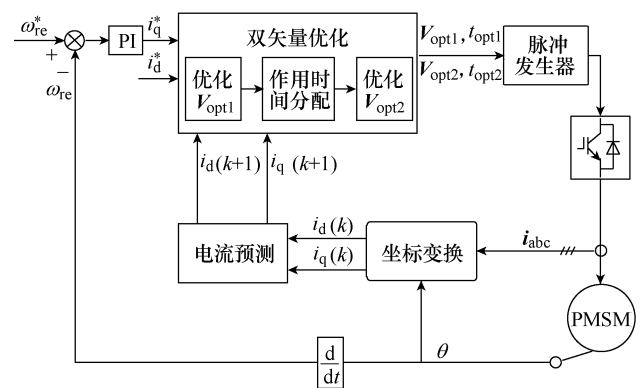


图 1 双矢量 MPCC 系统控制框图

Fig.1 Block diagram of the two-vector based model

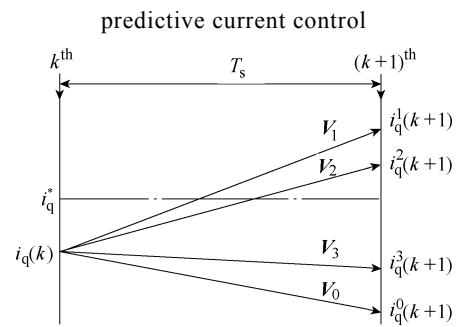
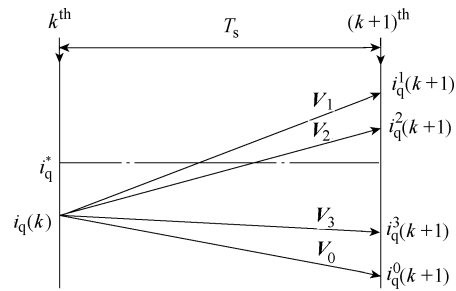
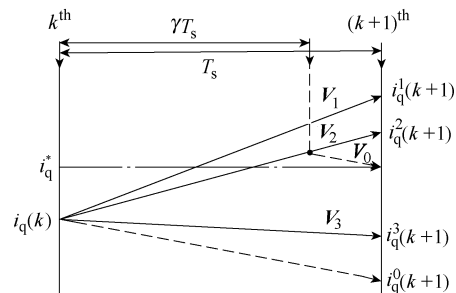


图 2 传统 MPCC 矢量选择示意图

Fig.2 Schematic diagram of voltage vector selection for traditional MPCC



(a) 最优电压矢量选择



(b) 占空比计算

图 3 占空比 MPCC 矢量选择示意图

Fig.3 Schematic diagram of voltage vector selection for duty cycle MPCC

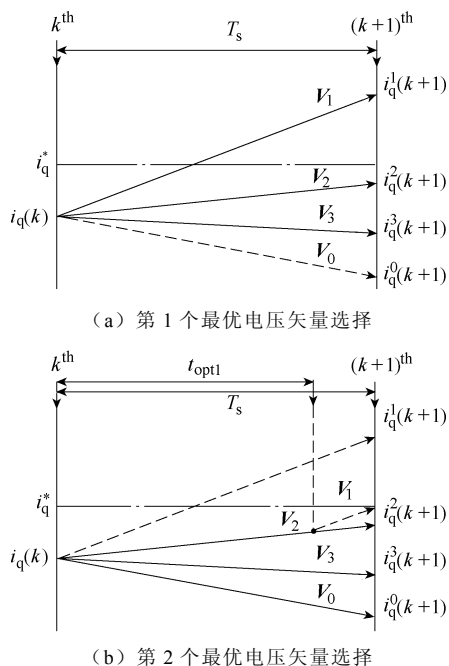


图4 双矢量 MPCC 矢量选择示意图

Fig.4 Schematic diagram of voltage vector selection for two-vector based MPCC

图。从图2可以看出,传统MPCC中最优电压矢量作用整个采样周期,当最优电压矢量作用后的电流预测值大于或小于给定值时,控制量会产生较大的波动,系统稳态性能较差。从图3可以看出,占空比MPCC是在最优电压矢量的基础上加入占空比控制,即可以根据给定值灵活地调节最优电压矢量的作用时间,使得最优电压矢量的电流预测值的大小连续可调,以获得更高的控制精度。在图3b中,当最优电压矢量 V_2 的电流预测值 $i_q^2(k+1)$ 大于电流给定值 i_q^* 时,可以通过分配 V_2 和 V_0 在一个采样周期中的作用时间,实现交轴电流无差拍。但是,当最优电压矢量作用后的电流预测值小于电流给定值时,如图4a中 $i_q^1(k+1)$ 所示,即使占空比为1,仍不能达到给定值,但在双矢量MPCC中,在获得最优电压矢量 V_2 的基础上再进行一次电压矢量选择,这样选择的第2个最优电压矢量可以是非零电压矢量,从而可以使电压矢量的选择更准确,图4b中先选择出 V_2 ,再选择出 V_1 ,然后通过分配 V_2 和 V_1 在一个采样周期中的作用时间,使电流预测值达到给定值。

2.4.2 电压矢量选择范围

图5为传统MPCC、占空比MPCC和双矢量MPCC三种控制策略的电压矢量选择范围示意图。对于两电平电压型逆变器驱动的PMSM交流调速系统来说,传统MPCC只能在7个电压矢量中选择

最优电压矢量,如图5a所示;占空比MPCC是在传统MPCC中引入了占空比控制,即为最优电压矢量与零矢量的合成,电压矢量范围为6个方向固定,幅值大小可调的电压矢量,如图5b所示;双矢量MPCC策略是把最优电压矢量与任意一个电压矢量进行组合,合成的电压矢量可以是任意方向、任意大小的电压矢量,如图5c所示,从而扩大了实际作用的电压矢量范围,因而可以取得更好的控制效果。

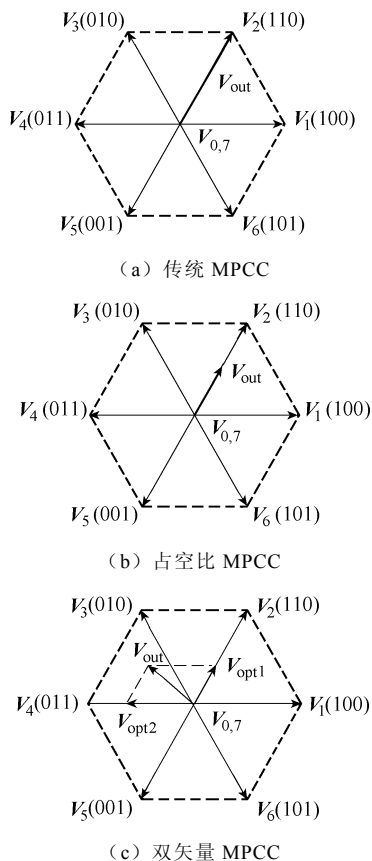


图5 传统MPCC、占空比MPCC和双矢量MPCC三种控制策略的电压矢量选择范围示意图

Fig.5 Schematic diagram of voltage vector selection range for traditional MPCC, duty cycle MPCC and two-vector based MPCC

3 实验结果及分析

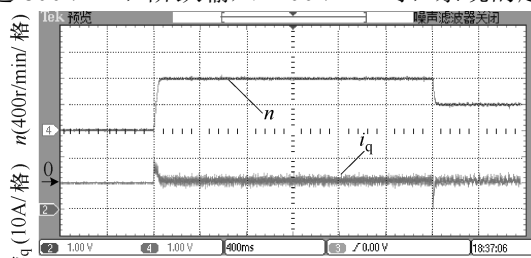
本文对传统MPCC、占空比MPCC和双矢量MPCC这三种控制策略进行了对比实验分析,以证明双矢量MPCC策略在提高系统稳态性能方面的有效性,控制对象是两电平电压型逆变器驱动的PMSM,控制芯片为TMS320F28335DSP。另外,为了更合理地比较三种控制策略,实验中三种控制策略采用相同的转速环PI参数,采样频率均为10kHz,永磁同步电机参数见表1。

表 1 永磁同步电机参数

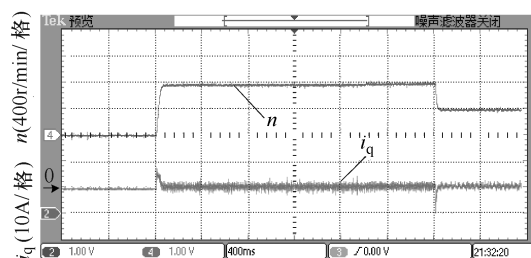
Tab.1 PMSM parameters

参 数	数 值
永磁体磁链/Wb	0.24
定子电感/mH	8.5
额定电压/V	200
额定电流/A	9.4
定子电阻/ Ω	0.2
额定转速/(r/min)	2 000
极对数	4
转子惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.001 2

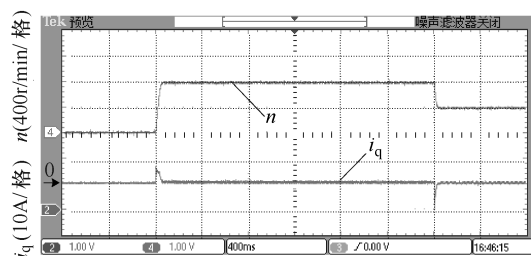
图 6 为传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 三种控制策略下, PMSM 空载时, 初始给定转速 800r/min, 阶跃输入-400r/min 时, 系统的起动-



(a) 传统 MPCC



(b) 占空比 MPCC



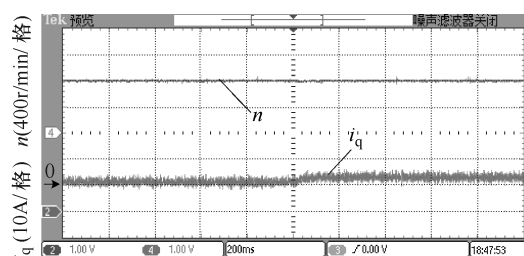
(c) 双矢量 MPCC

图 6 传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 起动-降速实验波形

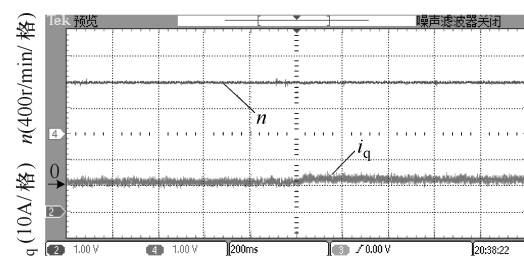
Fig.6 Experimental waveforms of traditional MPCC, duty cycle MPCC and two-vector based MPCC at start-up and changed speed

降速实验波形。由图 6 可以看出, 三种控制策略空载起动时间大约都为 0.07s, 减速后的调整时间大约都为 0.04s, 均能迅速跟随转速给定。

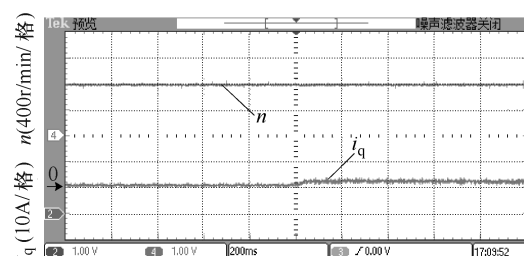
图 7 为传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 三种控制策略下, PMSM 空载运行在 800r/min 时, 突加负载 3 N·m, 转速和交轴电流的实验波形。由图 7 可以看出, 三种控制策略的交轴电流响应时间均大约为 0.04s, 具有同样迅速的交轴电流响应。



(a) 传统 MPCC



(b) 占空比 MPCC



(c) 双矢量 MPCC

图 7 传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 突加负载实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of traditional MPCC, duty cycle MPCC and two-vector based MPCC at changed torque

图 8 为传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 三种控制策略下, PMSM 空载运行在 1 000r/min 时的系统交直流电流实验波形。从图 8 中得到三种控制策略的交直流电流波动见表 2。需要指出的是, 本文中的交、直流电流波动计算公式^[19]分别为

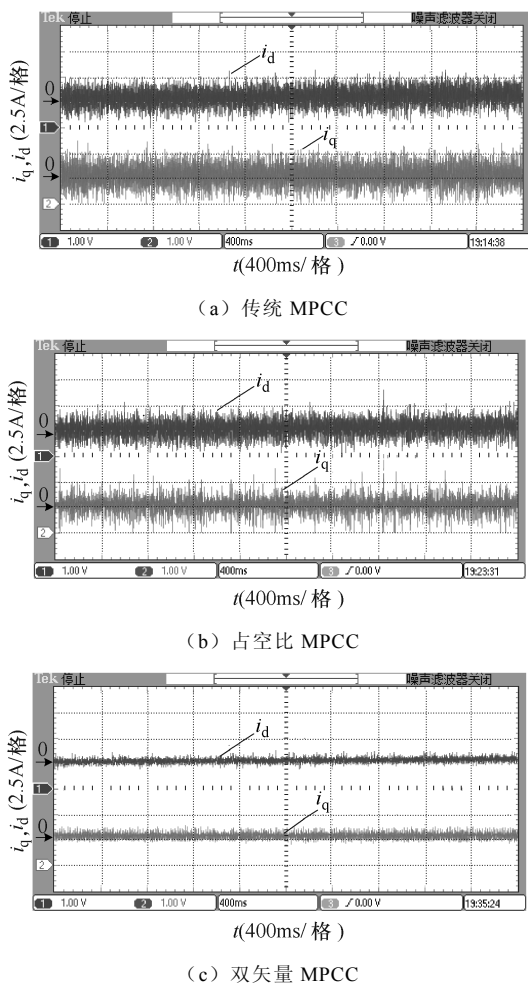


图8 传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 在转速 1 000r/min 的电流波形

Fig.8 Current waveforms of traditional MPCC, duty cycle MPCC and two-vector based MPCC at 1 000r/min

表2 三种控制策略在转速 1 000r/min 时的电流纹波

Tab.2 Current ripple of three control strategies at 1 000r/min

	$\Delta i_d/A$	$\Delta i_q/A$
传统 MPCC	1.15	1.5
占空比 MPCC	0.95	1.05
双矢量 MPCC	0.35	0.3

$$\Delta i_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (i_q(n) - i_{q_ave})^2} \quad (18)$$

$$\Delta i_d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (i_d(n) - i_{d_ave})^2} \quad (19)$$

式中, N 为采样个数; i_{q_ave} 和 i_{d_ave} 分别为交、直轴电流平均值; $i_q(n)$ 和 $i_d(n)$ 的值是把实验中示波器的波形保存为逗号分隔值格式 (CSV 格式) 得到的。

由表 2 可以看出, PMSM 空载运行在 1 000r/min, 占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 均能减小传统 MPCC 中的电流波动, 而且双矢量 MPCC 可以获得比占空比 MPCC 更好的稳态性能。

为了进一步说明双矢量 MPCC 相比于传统 MPCC 和占空比 MPCC 具有更好的稳态性能, 对 PMSM 空载运行在 400r/min、800r/min、1 200r/min 和 1 600r/min 时分别进行了实验, 不同转速时的交直轴电流波动如图 9 所示。可以看出双矢量 MPCC 策略在全速范围内都可以有效地减小交直轴电流波动。PMSM 带载运行时可以获得类似的效果, 受篇幅限制, 这里不再给出波形。

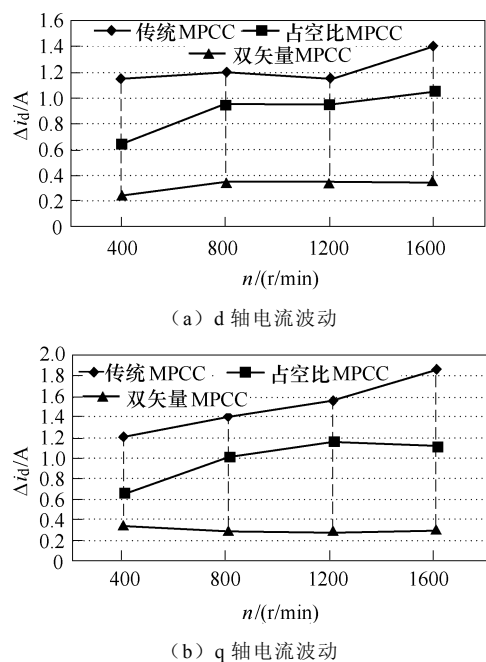


图9 传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 在不同转速时的电流波动

Fig.9 Current ripples of traditional MPCC, duty cycle MPCC and two-vector based MPCC at various speeds

综上所述, 双矢量 MPCC 策略具有和传统 MPCC 以及占空比 MPCC 策略同样迅速的转速和转矩响应, 同时双矢量 MPCC 策略明显减小了传统 MPCC 以及占空比 MPCC 策略中的电流波动。这是因为从电压矢量选择范围的角度来说: 传统 MPCC 只能在 7 种电压矢量中进行选择; 占空比 MPCC 的电压矢量选择范围为最优电压矢量同零电压矢量合成的 6 个固定方向上, 幅值可调的电压矢量; 双矢量 MPCC 的电压矢量选择范围为两个最优电压矢量合成的任意方向、任意幅值的电压矢量。从电压矢量选择准确性的角度来说: 传统 MPCC 中选择的是预测值与给定值最接近的电压矢量, 基本上不能达到电流无

差拍要求; 占空比 MPCC 中, 通过调节每一个采样周期中有效电压矢量和零电压矢量的作用时间, 使预测值更加接近给定值, 理论上可在部分采样周期中达到电流无差拍要求; 双矢量 MPCC 中, 进行第 2 次电压矢量选择可以选择非零电压矢量, 使得选择出的电压矢量更准确, 可以在更多的采样周期内实现电流无差拍要求。因此双矢量 MPCC 策略可以在更大的矢量选择范围内选择电压矢量, 使得电压矢量的选择更加准确, 可以获得更好的稳态性能。

4 结论

本文针对占空比 MPCC 策略中电流波动较大的问题, 提出了一种双矢量 MPCC 策略, 该控制策略在每个采样周期进行两次电压矢量选择, 避免了占空比 MPCC 中第 2 个电压矢量总是零电压矢量的问题。通过从电压矢量选择准确性和电压矢量选择范围两个方面分析比较了传统 MPCC、占空比 MPCC 和双矢量 MPCC 三种控制策略, 指出本文提出的双矢量 MPCC 策略可以在更大的矢量选择范围内选择电压矢量, 使得电压矢量的选择更加准确, 可以获得更好的稳态性能。实验结果表明: 双矢量 MPCC 策略具有和传统 MPCC 以及占空比 MPCC 策略同样迅速的转速和转矩响应, 而且双矢量 MPCC 策略明显减小了传统 MPCC 以及占空比 MPCC 策略中的电流波动, 验证了所提出控制策略的有效性和可行性。

参考文献

- [1] Dutta R, Rahman M F. Design and analysis of an interior permanent magnet (IPM) machine with very wide constant power operation range[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 25-33.
- [2] 李绿山, 张博利. 稀土永磁电机应用现状与发展[J]. 机电产品开发与创新, 2013, 26(3): 30-31.
Li lüshan, Zhang Boli. Development and application of rare-earth PM motor[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2013, 26(3): 30-31.
- [3] 王宏佳, 杨明, 牛里, 等. 永磁交流伺服系统电流环带宽扩展研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 56-62.
Wang Hongjia, Yang Ming, Niu Li, et al. Current loop bandwidth expansion for permanent magnet AC servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 56-62.
- [4] 廖金国, 花为, 程明, 等. 一种永磁同步电机变占空比电流滞环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4762-4770.
Liao Jinguo, Hua Wei, Cheng Ming, et al. A variable duty cycle current hysteresis control strategy for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4762-4770.
- [5] 王伟华, 肖曦, 丁有爽. 永磁同步电机改进电流预测控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 50-55.
Wang Weihua, Xiao Xi, Ding Youshuang. An improved predictive current control method for permanent magnet synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 50-55.
- [6] 牛里, 杨明, 刘可述, 等. 永磁同步电机电流预测控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 131-137.
Niu Li, Yang Ming, Liu Keshu, et al. A predictive current control scheme for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 131-137.
- [7] 王庚, 杨明, 牛里, 等. 永磁同步电机电流预测控制电流静差消除算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2544-2551.
Wang Geng, Yang Ming, Niu Li, et al. A static current error elimination algorithm for PMSM predictive current control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2544-2551.
- [8] 荆锴, 孙鹤旭, 董砚, 等. 以电流矢量为目标的永磁同步电机定子电流动态预测[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 47-55.
Jing Kai, Sun Hexu, Dong Yan, et al. Stator current dynamic prediction of permanent magnet synchronous motor targeting the current vector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 47-55.
- [9] 郑泽东, 王奎, 李永东, 等. 采用模型预测控制的交流电机电流控制器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 118-123.
Zheng Zedong, Wang Kui, Li Yongdong, et al. Current controller for AC motors using model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 118-123.
- [10] 王东文, 李崇坚, 吴尧, 等. 永磁同步电机的模型预测电流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2014,

- 29(增刊 1): 73-79.
- Wang Dongwen, Li Chongjian, Wu Yao, et al. Model predictive current control scheme for permanent magnet synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 73-79.
- [11] 马宏伟, 李永东, 郑泽东, 等. 电流环模型预测控制在 PWM 整流器中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 136-141.
- Ma Hongwei, Li Yongdong, Zheng Zedong, et al. PWM rectifier using a model predictive control method in the current loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 136-141.
- [12] 雷亚洲, 徐艳平, 周钦. 基于改进模型预测控制的永磁同步电机 DTC 方法[J]. 电气传动, 2015, 45(9): 3-6, 19.
- Lei Yazhou, Xu Yanping, Zhou Qin. Direct torque control of permanent magnet synchrochronous motor based on improved model predictive control[J]. Electric Drive, 2015, 45(9): 3-6, 19.
- [13] 沈坤, 章兢, 王坚. 一种多步预测的变流器有限控制集模型预测控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 37-44.
- Shen Kun, Zhang Jing, Wang Jian. A model predictive control scheme of multi-step prediction finite control set for converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 37-44.
- [14] Davari S A, Khaburi D A, Kennel R. An improved FCS-MPC algorithm for an induction motor with an imposed optimized weighting factor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1540-1551.
- [15] Morel F, Lin-Shi X, R  tif J, et al. A comparative study of predictive current control schemes for a permanent-magnet synchronous machine drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2715-2728.
- [16] Zhang Y, Yang H. Model predictive torque control of induction motor drives with optimal duty cycle control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6593-6603.
- [17] Zhang Y, Yang H. Generalized two vector based model-predictive torque control of induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3818-3829.
- [18] Wang F, Li S, Mei X, et al. Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: an experimental evaluation of PTC and PCC methods[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(3): 674-681.
- [19] Vafaie M, Dehkordi B, Moallem P, et al. A new predictive direct torque control method for improving both steady-state and transient-state operations of the PMSM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3738-3752.

作者简介

徐艳平 女, 1977 年生, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与现代交流调速。

E-mail: xuyyp@xaut.edu.cn (通信作者)

张保程 男, 1992 年生, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机及其控制。

E-mail: zhangbch@outlook.com

(编辑 陈 诚)