

本文全文线上首发由  
上海电器科学研究所  
(集团) 有限公司  
支持

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.  
电机与控制应用, 2021, 48(10): 7.



连接工业资产, 打通边缘层/平台层/应用层,  
打造电机领域全生命周期的工业互联网产品

WWW.YUNMOTOR.COM

生命周期一站式管理

# 上电科电机工业互联网云平台

- 数据监测**  
多维数据采集, 全面运行分析  
全景可视窗口, 丰富报表类型
- 预测运维**  
海量行业数据, 精准趋势预测  
生命周期管理, 性能尽在掌握
- 故障诊断**  
专业机理模型, 自动故障告警  
在线智能诊断, 高效便捷派单
- 绿色节能**  
环保绿色先行, 助力低碳生产  
节能降耗减排, 合理降本增效
- 聚汇商机**  
供需多方互联, 协同合作共赢  
有效整合资源, 共享生态未来



上海电器科学研究所(集团)有限公司  
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司

云平台技术支持: 18918675776    业务垂询: 18801608667  
固定电话: 021- 52669993    地址: 上海市普陀区武宁路505号9号楼



# 永磁同步电机模型预测电流控制比较研究\*

苏晓杨<sup>1</sup>, 兰志勇<sup>1</sup>, 蔡兵兵<sup>2</sup>

(1. 湘潭大学 自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411105;

2. 江麓机电集团有限公司, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 对永磁同步电机的3种模型预测电流控制方案进行了比较研究。传统模型预测电流控制策略在单个采样周期中输出一个电压矢量,选择使价值函数最小的电压矢量输出。双矢量模型预测电流控制策略在单个采样周期中输出2个电压矢量,并分别计算2个电压矢量的作用时间,使输出电压矢量与期望电压矢量更加接近。三矢量模型预测电流控制策略在单个采样周期中输出2个有效电压矢量和一个零矢量,扩大备选电压矢量的覆盖范围,减小电流脉动。为了比较3种控制策略的动、静态性能,进行了对比仿真分析。仿真结果表明,多矢量模型预测电流控制具有良好的动静态性能,与传统模型预测电流控制相比,能有效地减小电流脉动。

**关键词:** 永磁同步电机; 预测控制; 电流控制; 双矢量; 三矢量

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)10-0007-07

doi: 10.12177/emca.2021.092

## A Comparative Research of Model Predictive Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motor\*

SU Xiaoyang<sup>1</sup>, LAN Zhiyong<sup>1</sup>, CAI Bingbing<sup>2</sup>

(1. School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Jianglu Machinery Electronics Group Co., Ltd., Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** The schemes of three model predictive current control (MPCC) for permanent magnet synchronous motor (PMSM) is compared. The conventional MPCC strategy applies one voltage vector which can minimize a cost function in each sampling period. The two-vector-based MPCC strategy outputs two voltage vectors in each sampling period, and calculates the working time of them respectively. The method makes the resulting voltage vector closer to the expected voltage vector. The three-vector-based MPCC strategy outputs two optimal voltage vectors and one zero vector in each sampling period. In this method, the coverage range of alternative voltage vectors is expanded and the current ripples are reduced. The dynamic performance and steady state behavior of three control schemes is compared by the simulation experiments. Simulation results show that three-vector-based or two-vector-based MPCC strategy has good steady state and dynamic performance. Compared with the conventional MPCC strategy, the proposed method can reduce the current ripples effectively.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); predictive control; current control; two-vector; three-vector

收稿日期: 2021-07-20; 收到修改稿日期: 2021-08-21

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51507148); 风力发电机组及控制湖南省重点实验室开放研究基金项目(2016FLFDYB02)

作者简介: 苏晓杨(1995—),女,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机系统设计及控制技术。

兰志勇(1980—),男,博士,教授,研究方向为大功率永磁同步电机设计及优化等。

## 0 引言

具有功率密度高、可靠性好、运行效率高等优点的永磁同步电机(PMSM)广泛应用于轨道交通、航天航空、数控伺服等高性能调速系统领域<sup>[1]</sup>。PMSM应用场合对控制精度要求的提高使矢量控制与直接转矩控制逐渐难以满足需求。随着数字处理器性能的提升,结构简单、动态响应快的模型预测控制(MPC)得到了更广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。

线性 MPC 称为有限控制集模型预测控制(FCS-MPC),选取电流为优化目标的 FCS-MPC 称为模型预测电流控制(MPCC)<sup>[4]</sup>。传统 MPCC 在单个采样周期只输出一种开关状态对应的电压矢量,也称为单矢量 MPCC。但对于两电平逆变器的 PMSM 驱动系统来说,由于单矢量 MPCC 输出的仅为 6 个方向幅值固定的有效电压矢量或零矢量,在稳态运行状态下存在电流波动较大的问题。为改善其控制效果,由单矢量 MPCC 逐渐发展为多矢量 MPCC,在单个采样周期不只发出一个电压矢量。占空比 MPCC 是双矢量 MPCC 中的一种,文献[5-7]中均采用占空比 MPCC,但占空比的计算方法不同。文献[5]通过使电流矢量误差最小化的方法来确定占空比;文献[6]通过  $q$  轴电流无差拍原则计算占空比;文献[7]中构建了关于矢量作用时间的价值函数,并根据  $dq$  轴电流无差拍原则计算占空比。文献[8]采用双矢量 MPCC 策略,第二电压矢量可选择有效电压矢量与零矢量。文献[9-13]采用三矢量 MPCC,文献[9]将相邻 2 个有效电压矢量与零矢量合成的虚拟电压矢量作为备选电压矢量;文献[10-11]中采用无差拍原理计算最优虚拟电压矢量,将其所在扇区边界有效电压矢量与零矢量作为输出;文献[12]根据第一最优电压矢量作用下的电流误差所在扇区确定第二最优电压矢量;文献[13]在确定第一最优电压矢量之后,与其余有效电压矢量、零矢量合成备选虚拟电压矢量。

本文针对 MPCC 的 3 种算法进行比较研究,首先介绍传统 MPCC、占空比 MPCC 以及三矢量 MPCC 3 种控制策略的控制原理,并从发出矢量个数、电压矢量选择范围和矢量作用时间计算方法 3 个方面对 3 种方法进行对比分析。最后,通

过仿真验证 3 种方法的动静态性能,仿真结果表明多矢量 MPCC 与传统 MPCC 具有相似的动态性能,但能够有效地改善传统 MPCC 的稳态性能,减小电流波动。

## 1 传统 MPCC 策略

### 1.1 PMSM 数学模型

本文以表贴式 PMSM 为研究对象,忽略铁心饱和、涡流和磁滞损耗,且  $d$ 、 $q$  轴电感相等,有  $L_d=L_q=L_s$ ,其在同步旋转坐标系下的电压方程可表示为

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

式中: $R_s$  为定子电阻; $\omega_{re}$  为转子电角速度; $\psi_f$  为永磁体磁链; $i_d$  和  $i_q$  分别为定子电流  $d$ 、 $q$  轴分量; $u_d$  和  $u_q$  分别为定子电压  $d$ 、 $q$  轴分量。

### 1.2 传统 MPCC 原理

将式(1)离散化得到预测模型,如式(2)~式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{F}(k) \cdot \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \mathbf{G} \cdot \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} + \mathbf{H}(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T_s}{L_s} & T_s \omega_{re}(k) \\ -T_s \omega_{re}(k) & 1 - \frac{R_s T_s}{L_s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_s} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_s \omega_{re}(k)}{L_s} \psi_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $T_s$  为采样周期; $u_d(k)$  和  $u_q(k)$  分别为  $k$  时刻的  $d$ 、 $q$  轴电压值; $\omega_{re}(k)$  为  $k$  时刻的转子电角速度。

两电平三相电压源逆变器(VSI)共有 8 种开关状态,包括 6 个有效电压矢量( $\mathbf{u}_1 \sim \mathbf{u}_6$ )和 2 个零矢

量( $u_0, u_7$ )。将 8 个电压矢量与当前  $k$  时刻采样得到的电流值  $i_d(k), i_q(k)$  依次代入预测模型式(2) 预测  $k+1$  时刻的电流值  $i_d(k+1), i_q(k+1)$ 。

为了得到使电流预测值( $i_d(k+1), i_q(k+1)$ )与 电流给定值( $i_d^*, i_q^*$ ) 最接近的最优电压矢量, 将价值函数设为两者之差, 价值函数  $g_i$  表达式如下:

$$g_i = |i_q^* - i_q(k+1)| + |i_d^* - i_d(k+1)| \quad (6)$$

因此, 将  $i_d(k+1), i_q(k+1)$  代入价值函数式 (6) 计算出相应的  $g$  值, 并从中选出最小的  $g$  值, 最后将使  $g$  值最小的电压矢量作为最优电压矢量输出。

## 2 多矢量 MPCC 策略

### 2.1 虚拟矢量的合成

与传统单矢量 MPCC 存在较大的电流波动相比, 多矢量 MPCC 策略最终作为电流指令输出的不再是 VSI 的 8 个基本电压矢量, 而是由其合成的虚拟电压矢量, 可减小电流波动。占空比 MPCC 在单个采样周期中, 通过 1 个有效电压矢量和 1 个零矢量合成 1 个方向固定、幅值可调的虚拟电压矢量, 如图 1(a) 所示; 三矢量 MPCC 在单个采样周期中, 通过 2 个有效电压矢量的 1 个零矢量合成 1 个方向可调、幅值可调的虚拟电压矢量, 如图 1(b) 所示。图 1 中  $t_m, t_n$  为有效电压矢量  $u_m, u_n$  的作用时间。

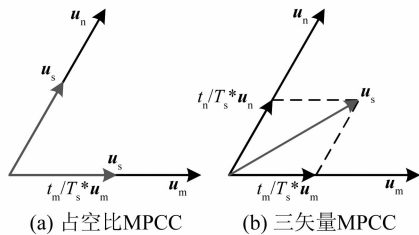


图 1 虚拟电压矢量合成

根据式(1) 可得, 零矢量  $u_{zero}$  与有效电压矢量  $u_m, u_n$  作用时  $d, q$  轴电流变化率  $s_{dz}, s_{qz}, s_{dm}, s_{qm}, s_{dn}, s_{qn}$  分别为

$$\begin{cases} s_{dz} = \frac{di_d}{dt} \Big|_{u_d=0} = \frac{1}{L_s} (-R_s i_d + \omega_{re} L_s i_q) \\ s_{qz} = \frac{di_q}{dt} \Big|_{u_q=0} = \frac{1}{L_s} (-R_s i_q - \omega_{re} L_s i_d - \omega_{re} \psi_f) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} s_{dm} = \frac{di_d}{dt} \Big|_{u_d=u_{dm}} = s_{dz} + \frac{u_{dm}}{L_s} \\ s_{qm} = \frac{di_q}{dt} \Big|_{u_q=u_{qm}} = s_{qz} + \frac{u_{qm}}{L_s} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} s_{dn} = \frac{di_d}{dt} \Big|_{u_d=u_{dn}} = s_{dz} + \frac{u_{dn}}{L_s} \\ s_{qn} = \frac{di_q}{dt} \Big|_{u_q=u_{qn}} = s_{qz} + \frac{u_{qn}}{L_s} \end{cases} \quad (9)$$

结合式(7)~式(9), 占空比 MPCC 与三矢量 MPCC 中  $k+1$  时刻的  $i_d(k+1), i_q(k+1)$  为

$$\begin{cases} i_q(k+1) = i_q(k) + s_{qm} t_m + s_{qn} (T_s - t_m) \\ i_d(k+1) = i_d(k) + s_{dm} t_m + s_{dn} t_n + s_{dz} (T_s - t_m - t_n) \\ i_q(k+1) = i_q(k) + s_{qm} t_m + s_{qn} t_n + s_{qz} (T_s - t_m - t_n) \end{cases} \quad (10)$$

### 2.2 占空比 MPCC 原理

计算有效电压矢量  $u_m$  与零矢量  $u_{zero}$  的作用时间, 为实现  $q$  轴电流的无差拍, 使  $q$  轴电流预测值  $i_q(k+1)$  与电流给定值  $i_q^*$  相等, 即:

$$i_q(k+1) = i_q^* \quad (12)$$

将式(10) 代入式(12), 得  $u_m$  的作用时间  $t_m$  为

$$t_m = \frac{i_q^* - i_q(k) - s_{qz} T_s}{(s_{qm} - s_{qz})} \quad (13)$$

$u_{zero}$  的作用时间  $t_z$  为

$$t_z = T_s - t_m \quad (14)$$

作用时间确定之后, 便可以预测  $i_d(k+1), i_q(k+1)$ , 在此过程中, 考虑作用时间的因素, 预测模型式(2) 中的  $u_d, u_q$  应改写为虚拟电压矢量对应的  $dq$  轴分量:

$$\begin{cases} u_d = \frac{t_m}{T_s} u_{dm} \\ u_q = \frac{t_m}{T_s} u_{qm} \end{cases} \quad (15)$$

然后, 6 组有效电压矢量及其作用时间的组合可得到 6 个对应的电流预测值, 将 6 个电流预测值依次代入价值函数式(6), 选出使  $g$  值最小的电压矢量与其作用时间组合, 并根据减少开关切换次数原则选择零矢量, 最终将该组合作为最优输出以控制 VSI。

由上述原理可搭建占空比 MPCC 控制框图,

如图 2 所示。

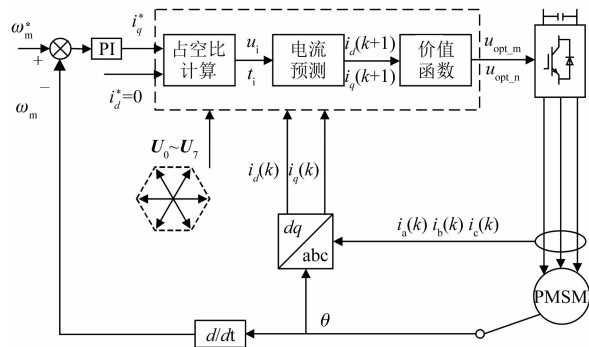


图 2 占空比 MPCC 控制框图

### 2.3 三矢量 MPCC 原理

三矢量 MPCC 控制框图如图 3 所示。

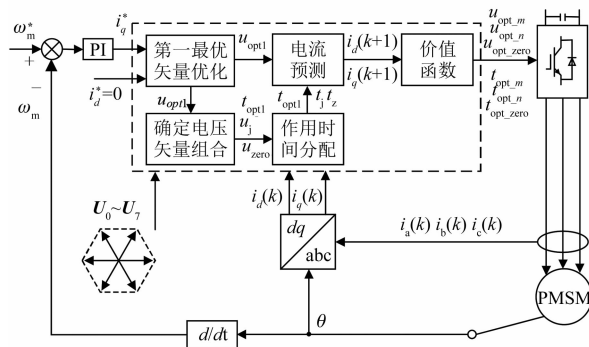


图 3 三矢量 MPCC 控制框图

在 6 个有效电压矢量中选出能够使价值函数最小的电压矢量作为三矢量 MPCC 策略中第 1 个有效电压矢量  $u_{opt1}$ ，寻优过程与传统 MPCC 相同。然后，根据  $u_{opt1}$  确定候选电压矢量组合，选取原则为除了  $u_{opt1}$ ，其余有效电压矢量均可作为第 2 个有效电压矢量  $u_j$  的候选矢量， $u_{zero}$  的选取遵循开关切换次数最少原则，矢量组合情况如表 1 所示。

表 1 三矢量 MPCC 候选电压矢量组合表

| $u_{opt1}$ | $u_j$                         | $u_{zero}$  |
|------------|-------------------------------|-------------|
| $u_1$      | $u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6$ | $u_0 \ u_7$ |
| $u_2$      | $u_1 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6$ | $u_0 \ u_7$ |
| $u_3$      | $u_1 \ u_2 \ u_4 \ u_5 \ u_6$ | $u_0 \ u_7$ |
| $u_4$      | $u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_5 \ u_6$ | $u_0 \ u_7$ |
| $u_5$      | $u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_6$ | $u_0 \ u_7$ |
| $u_6$      | $u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5$ | $u_0 \ u_7$ |

根据 dq 轴电流无差拍原则确定候选电压矢量组合中各个电压矢量的作用时间，有：

$$\begin{cases} i_d(k+1) = i_d^* \\ i_q(k+1) = i_q^* \end{cases} \quad (16)$$

结合式 (11)，可得  $u_{opt1}$ 、 $u_j$  与  $u_{zero}$  的作用时间  $t_{opt1}$ 、 $t_j$ 、 $t_z$  分别为

$$t_{opt1} = \frac{1}{D} \{ [i_d^* - i_d(k)](s_{qj} - s_{qz}) + [i_q^* - i_q(k)] \cdot (s_{dz} - s_{dj}) + T_s(s_{qz}s_{dj} - s_{qj}s_{dz}) \} \quad (17)$$

$$t_j = \frac{1}{D} \{ [i_d^* - i_d(k)](s_{qz} - s_{qopt1}) + [i_q^* - i_q(k)] \cdot (s_{dopt1} - s_{dz}) + T_s(s_{qopt1}s_{dz} - s_{qz}s_{dopt1}) \} \quad (18)$$

$$t_z = T_s - t_{opt1} - t_j \quad (19)$$

且有：

$$D = s_{qz}s_{dj} + s_{qopt1}s_{dz} + s_{qj}s_{dopt1} - s_{qopt1}s_{dj} - s_{qj}s_{dz} - s_{qz}s_{dopt1} \quad (20)$$

则对应的虚拟电压矢量的 dq 轴分量为

$$\begin{cases} u_d = \frac{t_{opt1}}{T_s} u_{dopt1} + \frac{t_j}{T_s} u_{dj} \\ u_q = \frac{t_{opt1}}{T_s} u_{qopt1} + \frac{t_j}{T_s} u_{qj} \end{cases} \quad (21)$$

最后将 5 个虚拟电压矢量依次代入预测模型式 (2) 中，得到  $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$ ，根据价值函数式 (6) 选出使  $g$  值最小的虚拟电压矢量作为输出以控制 VSI。

### 3 3 种控制策略的比较

根据上述 3 种控制策略的控制原理，从 3 个方面分析其差异性：发出矢量个数、电压矢量选择范围和矢量作用时间计算方法，如表 2 所示。

表 2 控制策略差异表

| MPC      | 发出矢量个数 | 电压矢量选择范围     | 矢量作用时间计算方法    |
|----------|--------|--------------|---------------|
| 传统 MPCC  | 1      | 方向固定<br>幅值固定 | 无             |
| 占空比 MPCC | 2      | 方向固定<br>幅值可调 | q 轴电流<br>无差拍  |
| 三矢量 MPCC | 3      | 任意方向<br>任意幅值 | dq 轴电流<br>无差拍 |

3 种 MPCC 最明显的差异就是单个采样周期

输出的电压矢量个数不同。通过增加输出矢量个数扩大了电压矢量的选择范围,传统 MPCC、占空比 MPCC 与三矢量 MPCC 的电压矢量选择范围如图 4 所示。传统 MPCC 的备选电压矢量是固定的基本电压矢量;占空比 MPCC 可选择的电压矢量幅值可调,但方向仍固定在基本电压矢量上;三矢量 MPCC 通过 2 个有效电压矢量与 1 个零矢量合成 1 个虚拟电压矢量,可使电压矢量的选择范围覆盖到任意幅值和任意方向。

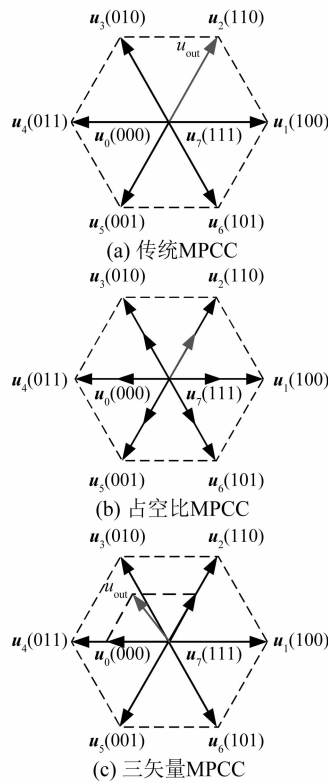


图 4 电压矢量选择范围

最后,在传统 MPCC 中,寻优得到的最优电压矢量作用一整个采样周期,不存在矢量作用时间的计算方法;在占空比 MPCC 中,通过分配有效电压矢量与零矢量的作用时间,实现了  $q$  轴电流无差拍;在三矢量 MPCC 中则同时实现了对  $dq$  轴电流的无差拍控制。

### 4 仿真验证

在 MATLAB/Simulink 环境中搭建 PMSM 的传统 MPCC、占空比 MPCC 及三矢量 MPCC 模型并进行对比仿真,电机参数如表 3 所示,采样频率均为 20 kHz,且均采用相同的 PI 参数( $K_p=0.2, K_i=10$ )。

表 3 永磁同步电机仿真参数

| 参数名称                       | 参数值       | 参数名称             | 参数值    |
|----------------------------|-----------|------------------|--------|
| 额定功率/W                     | 400       | 定子电阻/ $\Omega$   | 1.858  |
| 额定转矩/( $N\cdot m$ )        | 1.3       | 直交轴电感/mH         | 11.956 |
| 额定转速/( $r\cdot min^{-1}$ ) | 3 000     | 极对数              | 4      |
| 额定电流/A                     | 2.6       | 磁链/Wb            | 0.048  |
| 转动惯量/( $kg\cdot m^2$ )     | 0.000 074 | 直流侧电压 $U_{dc}/V$ | 311    |

### 4.1 静态运行特性

稳态运行仿真工况为,转速 300 r/min,负载  $0.6 N\cdot m$ 。电机转速  $n$  与 a 相电流  $i_a$  波形如图 5 所示。与占空比 MPCC、三矢量 MPCC 相比,传统 MPCC 的转速波形存在较大的抖振,且 a 相电流波形谐波较大。对传统 MPCC、占空比 MPCC、三矢量 MPCC 的 a 相电流做 FFT 分析,其频谱图如图 6 所示。其中传统 MPCC 中 THD = 15.19%,占空比 MPCC 中 THD = 2.93%,三矢量 MPCC 中 THD = 2.81%。因此可以看出,与传统 MPCC 相比,多矢量 MPCC 可以有效改善系统的稳态性能,

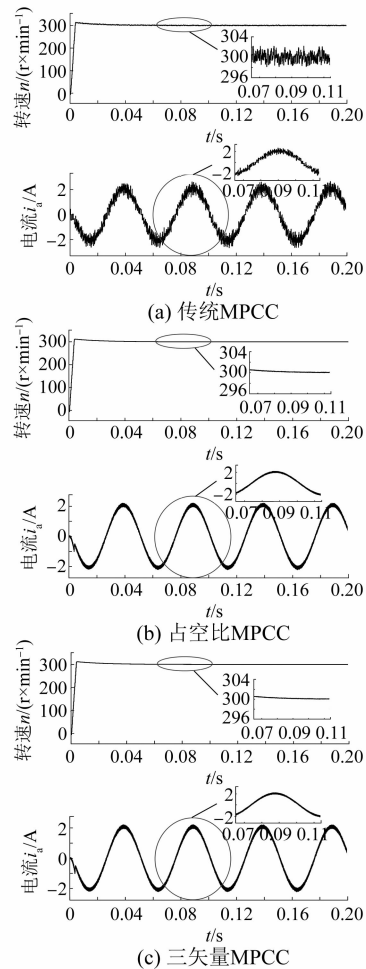


图 5 稳态运行下转速与相电流波形图

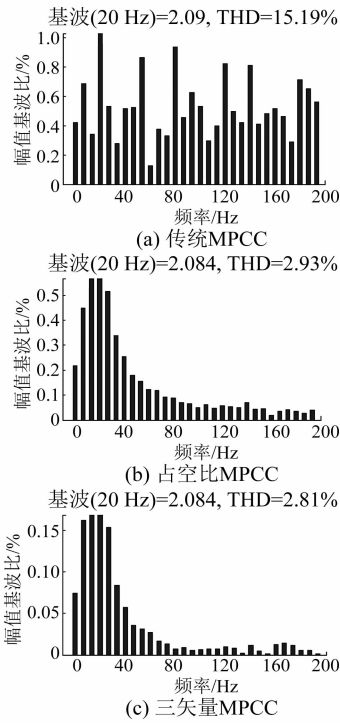


图6 FFT分析频谱图

减小电流谐波。

#### 4.2 动态运行特性

图7为电机给定转速1500 r/min,带0.6 N·m负载启动,0.2 s突加负载至1.2 N·m时3种控制方法的动态响应图。由图7可知,在发生负载突变时,3种控制策略的转速均有小幅下降,但均能快速跟随上给定转速。

图8为3种控制策略下,电机带0.6 N·m负载,0.2 s转速突变的电流跟踪情况。由图8可以看出,转速由500 r/min加速到1500 r/min时,3种控制策略均有较快的电流响应速度,均能够实现转速的快速跟踪。

从上述仿真结果可以看出,无论是转速阶跃还是突加负载,3种控制策略均能达到快速响应,但多矢量MPCC与传统MPCC相比具有更小的转速与电流波动,与稳态运行结果相符。由此可以说明多矢量MPCC不仅改善了系统的稳态性能,还保持了良好的系统动态响应性能。

### 5 结语

本文针对两电平三相电压源逆变器供电的永磁同步电机的3种MPCC策略,进行了比较研究。介绍了3种控制方案的控制原理,并分析了三者

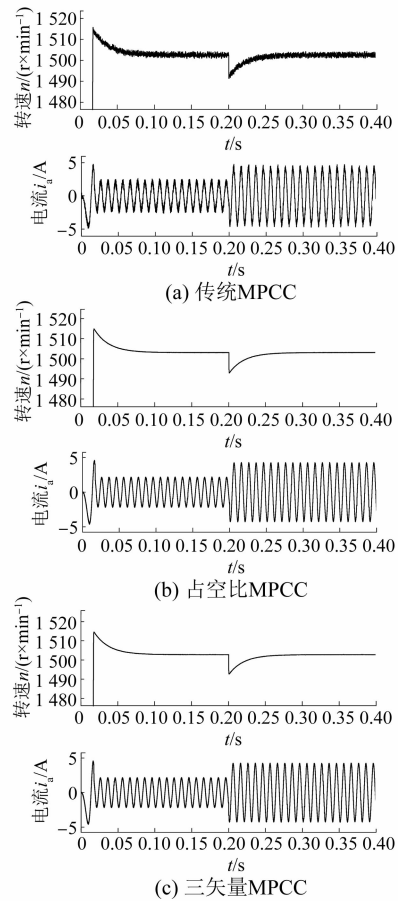


图7 负载突变状态下转速与相电流波形图

的差异性,与单矢量MPCC相比,多矢量MPCC在单个周期发出多个电压矢量,扩大了电压矢量选择范围,可实现d、q轴电流的无差拍控制。最后通过仿真对比分析三者的动静态性能。结果表明,多矢量MPCC明显减小了单矢量MPCC中的电流脉动,提高了稳态性能,同时能够保持良好快速的动态响应性能。本文针对不同MPCC策略进行的比较研究为后续进行实物试验验证做了准备工作,奠定了基础。

#### 【参考文献】

[1] 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.  
 [2] 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.  
 [3] 康劲松,李旭东,王硕. 计及参数误差的永磁同步电机最优虚拟矢量预测电流控制[J]. 电工技术学报,2018,33(24): 5731.  
 [4] 张永昌,杨海涛,魏香龙. 基于快速矢量选择的永

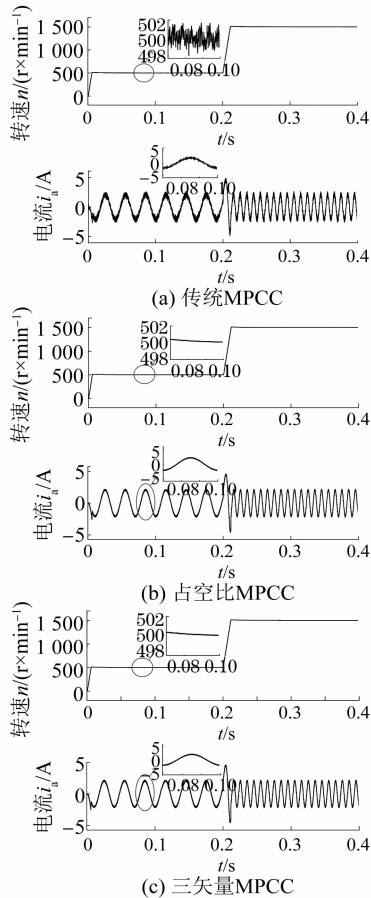


图8 转速突变状态下转速与相电流波形图

磁同步电机模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 66.

[5] MOREL F, LIN-SHI X, RETIF 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.

[6] XU Y, ZHANG B, ZHOU Q. A model predictive current control method of PMSM based on the simultaneous optimization of voltage vector and duty cycle [C] // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016.

[7] 史婷娜, 张维, 肖萌, 等. 基于矢量作用时间的永磁同步电机预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 1.

[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.

[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.

[10] 康劲松, 李旭东, 王硕. 计及参数误差的永磁同步电机最优虚拟矢量预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5731.

[11] 刘佳敏, 葛召炎, 吴轩, 等. 基于占空比调制的永磁同步电机预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3319.

[12] 兰志勇, 王波, 徐琛, 等. 永磁同步电机新型三矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增1): 243.

[13] 徐艳平, 王极兵, 周钦, 等. 永磁同步电动机双优化三矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1857.

(上接第6页)

[6] LEVI E. Linear synchronous motors for high-speed ground transportation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1973, 9(3): 242.

[7] 张如霞. 一类时滞不确定TS模糊系统的滑模变结构控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.

[8] 张代林, 陈幼平, 艾武, 等. 永磁直线电机保证稳态精度的模糊控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 64.

[9] HOSSEINI M S, VAEZ-ZADEH S. Modeling and analysis of linear synchronous motors in high-speed maglev vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(7): 2656.

[10] 范承志, 吴国兴, 胡赣娟. 基于状态方程的长定子直线同步电机特性分析[J]. 微电机, 2005, 38(1):

26.

[11] ZHU Y, LEE S, CHO Y. Thrust and normal force characteristics analysis of linear synchronous motor for direct drive conveyer [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2011, 36(1/2): 41.

[12] TAKAI H, KENJI S, DOHMEKI H. Study on the servo drive of PMLSM to be used in parallel synchronous drive [J]. Journal of Mechanics Engineering and Automation, 2015, 5(10): 580.

[13] 卢琴芬. 直线同步电机的特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[14] 李增乐. 混合励磁直线磁悬浮同步电动机的设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.