

五桥臂双永磁同步电机系统双矢量 模型预测电流控制*

王 亮, 耿 强, 周湛清

(天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300387)

摘 要: 针对五桥臂双永磁同步电机(PMSM)系统单矢量模型预测电流控制(MPCC)稳态波动大的问题,提出一种优化的双矢量模型预测电流控制策略。利用无差拍的思想分别独立预测2台电机 q 轴电流准确跟踪参考值所需时间,筛选出在一个控制周期内能够准确跟踪 q 轴电流的基本有效矢量。依据公共桥臂开关状态必须一致的特性,选择合适的零矢量对符合条件的矢量进行组合,筛选出使系统性能达到最优的矢量组合作用于五桥臂逆变器驱动双电机,改善系统的运行性能。仿真结果验证了所提双矢量MPCC策略的正确性和有效性。

关键词: 永磁同步电机; 双矢量; 五桥臂逆变器; 模型预测电流控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0027-07

doi: 10.12177/emca.2019.148

Double-Vector Model Predictive Current Control of Five-Leg Dual Permanent Magnet Synchronous Motor System*

WANG Liang, GENG Qiang, ZHOU Zhanqing

(School of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to solve the problem of large steady-state fluctuation of single-vector model predictive current (MPCC) control for the five-leg dual permanent magnet synchronous motor (PMSM) system, an optimal double-vector model predictive current control strategy is proposed. By using the idea of deadbeat, the time required for two motors to track the reference value of q -axis current is predicted independently. The basic effective vector which can track the q -axis current accurately in a control cycle is screened out. According to the characteristics that the switching state of the common leg must be consistent, the appropriate zero vector is selected to combine the vectors that meet the conditions, and the vector combination that makes the system performance reach the optimum is selected to act on the five-leg inverter to drive the two motors, so as to improve the operation performance of the system. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the proposed double-vector MPCC strategy.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); double-vector; five-leg inverter; model predictive current control (MPCC)

0 引 言

随着工业技术的迅猛发展,多电机驱动技术

在电动汽车、纺织、采矿等领域发挥着至关重要的作用。五桥臂逆变器驱动双电机系统作为一种良好的容错结构,近年来得到了国内外众多学者的

收稿日期: 2019-11-12; 收到修改稿日期: 2019-12-17

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51907142);天津市教委科研计划重点项目(2019ZD09)

作者简介: 王 亮(1992—),男,硕士研究生,研究方向为多电机协同控制。

耿 强(1978—),男,教授,硕士生导师,研究方向为电机系统及控制。(通信作者)

广泛关注^[1-8]。传统双电机拓扑中一般采用 2 台逆变器共用直流母线, 每台逆变器独立驱动 1 台电机运行。五桥臂双电机拓扑中有一相桥臂作为 2 台电机的公共桥臂。目前五桥臂逆变器驱动双电机系统一般采用矢量控制和预测控制。国内外学者针对矢量控制提出了零序电压注入法、半周期调制法; 针对预测控制目前主要为单矢量预测控制^[9-14]。在五桥臂双电机预测控制系统中, 减少预测控制过程的计算量是提高整个系统控制性能的关键之一。文献[15]提出在 $k+1$ 时刻矢量选择范围缩减至当前矢量及其相邻矢量, 矢量选择范围由 32 种减少到 10 种, 显著减少了预测控制的计算量。文献[16]提出了一种提高母线电压利用率的控制策略, 但该方法对 2 台电机控制的独立性产生了影响。文献[17]将空间矢量调制与载波调制相结合, 提出一种减小功率开关管次数的新方案, 适用于电机恒功率的工况运行。文献[18]提出一种新的数字标量调制方案 (DSPWM) 控制输出电压, 在不需要额外数学推导的情况下可以独立的控制 2 个以上的负载。文献[19]首先针对 1 台电机选出最优矢量以此确定公共桥臂开关状态, 缩小了第 2 台电机矢量的选择范围。文献[20]借鉴空间矢量脉宽调制技术 (SVPWM) 提出一种合理调整两逆变器零矢量的策略使其同时满足两电机的需求, 提高了系统电压利用率。

本文针对单矢量预测控制中稳态波动大的问题提出了一种双矢量预测控制策略。首先, 利用无差拍的思想分别计算出 2 台电机各自有效矢量准确跟踪 q 轴电流所需时间, 筛选出作用时间小于一个控制周期的矢量。其次, 将 2 台电机分别筛选出的矢量结合零矢量进行组合。最后, 将其代入到系统价值函数中, 筛选出使系统运行状态达到最优的组合应用到五桥臂逆变器。所提五桥臂双电机双矢量预测电流控制 (MPCC) 策略在兼顾预测控制快速动态响应的同时, 实现了减小稳态 q 轴电流波动的目标。

1 系统拓扑

五桥臂逆变器-双永磁同步电机 (PMSM) 系统的拓扑结构如图 1 所示。五桥臂驱动双 PMSM 系统主要由电压源、三相不可控整流桥、五桥臂逆

变器、2 台 PMSM 组成。五桥臂逆变器共包含 5 个桥臂, 分别为 A、B、C、D、E 相。其中, A、B、C 3 个桥臂连接至 PMSM1 的定子三相绕组 a1、b1、c1 驱动电机 1; E、D、C 3 个桥臂连接至永磁同步电机 2 (PMSM2) 的定子三相绕组 a2、b2、c2 驱动电机 2, C 桥臂为 2 台 PMSM 的公共桥臂。

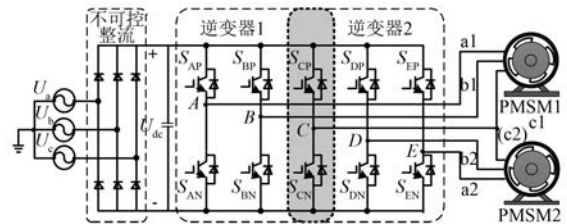


图 1 五桥臂双电机拓扑结构图

2 传统五桥臂双电机模型预测控制

传统五桥臂双电机预测控制系统中, 整个系统共包含 5 个桥臂, 每个桥臂均存在 1 和 0 这 2 种开关状态, 逆变器输出共有 $2^5 = 32$ 种开关状态。1 对应相应桥臂的上桥臂导通、下桥臂关断; 反之, 0 对应相应桥臂的下桥臂导通、上桥臂关断。那么, 各桥臂的开关状态函数可表示为

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通} \\ 0 & \text{下桥臂导通} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x = A, B, C, D, E$ 。

考虑到电压源逆变器同一桥臂上下 2 个 IGBT 开关状态的互补性, 五桥臂双 PMSM 系统电压矢量分布图如图 2 所示。

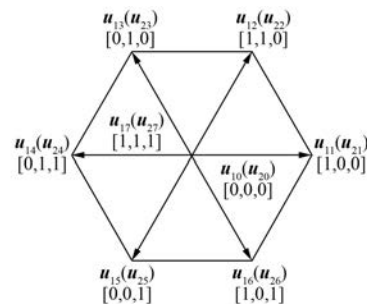


图 2 五桥臂双 PMSM 系统电压矢量分布图

图 2 中, $u_{1j}(j = 1, \dots, 6), u_{1n}(n = 0, 7)$ 分别为电机 1 的基本有效电压矢量和零矢量; $u_{2j}(j = 1, \dots, 6), u_{2n}(n = 0, 7)$ 分别为电机 2 的基本有效电压矢量和零矢量。

在忽略表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 磁饱

和与铁耗的情况下, 可将其在 d - q 旋转坐标系下的定子电流变化率表示为

$$\begin{cases} \frac{di_{id}}{dt} = \frac{1}{L_i} [u_{id} - R_{is}i_{id} + \omega_{ie}L_i i_{iq}] \\ \frac{di_{iq}}{dt} = \frac{1}{L_i} [u_{iq} - R_{is}i_{iq} - \omega_{ie}L_i i_{id} - \omega_{ie}\psi_{if}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{id} 、 i_{iq} 分别为 d 、 q 轴的电流分量; 下角标 $i = 1, 2$ 分别表示电机 1 和电机 2; L_i 为定子电感; u_{id} 、 u_{iq} 分别为 d 、 q 轴的电压分量; R_{is} 为定子电阻; ω_{ie} 为转子电角速度; ψ_{if} 为永磁体磁链。

采用一阶欧拉法对式 (2) 进行离散化, 可得 $(k+1)$ 时刻 d 轴和 q 轴电流的预测值:

$$\begin{cases} i_{id}(k+1) = i_{id}(k) + \frac{T_s}{L_i} \cdot [-R_{is}i_{id}(k) + \omega_{ie}L_i i_{iq}(k) + u_{id}(k)] \\ i_{iq}(k+1) = i_{iq}(k) + \frac{T_s}{L_i} \cdot [-R_{is}i_{iq}(k) - \omega_{ie}L_i i_{id}(k) + u_{iq}(k) - \omega_{ie}\psi_{if}] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_{id}(k+1)$ 、 $i_{iq}(k+1)$ 分别为下一个采样时刻 d 、 q 轴电流预测值; $i_{id}(k)$ 、 $i_{iq}(k)$ 分别为当前采样时刻 d 、 q 轴电流实际值; T_s 为控制周期。

传统五桥 MPCC 中将 5 个桥臂看作一个整体, 将 32 个五维向量对应的预测电流值依次代入价值函数, 筛选出最小价值函数并将对应的最优矢量组合作用于五桥臂逆变器, 如式 (4) 所示:

$$g_m = g_I + g_{II} = [i_{1q}^* - i_{1q}(k+1)]^2 + [i_{1d}^* - i_{1d}(k+1)]^2 + [i_{2q}^* - i_{2q}(k+1)]^2 + [i_{2d}^* - i_{2d}(k+1)]^2 \quad (4)$$

式中: g_m 为系统价值函数; g_I 、 g_{II} 分别为电机 1、电机 2 的价值函数; i_{1d}^* 、 i_{1q}^* 、 i_{2d}^* 、 i_{2q}^* 分别为电机 1、电机 2 的 d 、 q 轴电流参考值。

在传统调制策略中, 2 台电机在一个控制周期内均仅有一个电压矢量作用, 矢量作用的方向、幅值均固定, 导致矢量所能调节的范围有限, 降低了系统运行性能。

3 基于双矢量作用时间的预测控制

本文所提控制策略是在传统预测电流控制的基础上加入占空比调制。五桥臂双电机预测控制系统框图如图 3 所示。

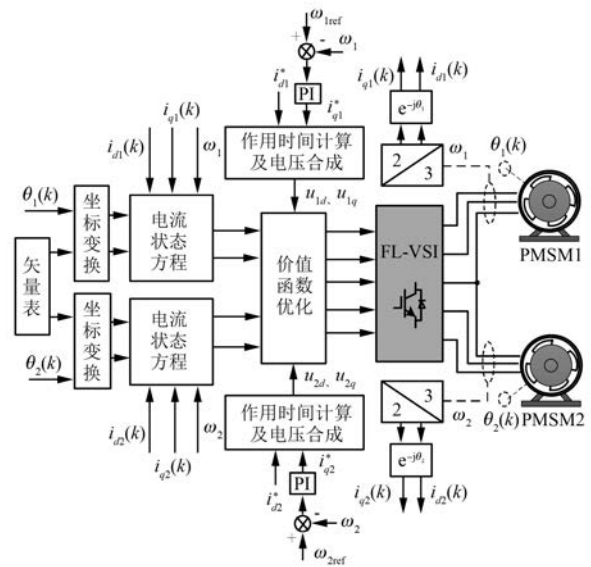


图 3 五桥臂双电机预测控制系统框图

本文采用 $i_d = 0$ 的控制方式, q 轴电流给定由速度环的 PI 控制器得到。在控制的核心模块中, 首先根据电流的反馈值和给定值计算出每台电机基本有效矢量的作用时间, 筛选出符合条件的矢量并将不同电机的矢量进行组合代入到系统价值函数中, 筛选出使系统达到最优的矢量组合, 应用到五桥臂逆变器。

3.1 双矢量 MPCC 原理

在传统五桥臂单矢量模型预测控制中筛选出的最优矢量为该矢量作用于五桥臂逆变器一个控制周期后, 使得系统达到最优的电压矢量。为了进一步减小 d 轴和 q 轴电流误差, 增强系统稳态性, 可在最优矢量的基础上加入零矢量进行占空比调制。但该方法不能保证最优矢量与零矢量配合时仍使系统达到最优, 难以发挥占空比调制环节的作用。

以电机 1 为例, 在一个控制周期内不同电压矢量作用下的 q 轴电流轨迹会发生变化, 如图 4 所示。

传统预测控制中通过价值函数将筛选出 u_{13} 为最优电压矢量并针对 u_{13} 进行占空比调制。此时计算得到的占空比将大于 1, 出现过调制的情况, 而占空比的取值只能为 1, 导致占空比调制环节难以发挥作用。此时电压矢量 u_{11} 、 u_{12} 均可通过占空比调制合理分配矢量作用时间达到期望值, 但在传统预测控制中却没有被选为最优电压

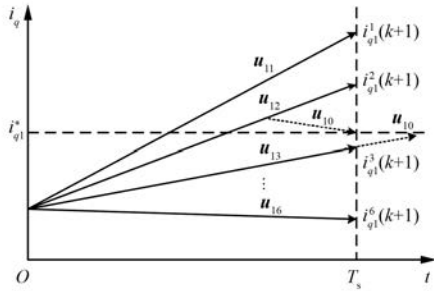


图4 不同电压矢量作用下 q 轴电流轨迹示意图

矢量作用于逆变器。

为了提高系统的控制精度,从改变最优电压矢量选择方式的角度出发,基于无差拍的思想提出一种优化的占空比调制策略。其核心思想为,利用无差拍的思想计算每台电机各自矢量消除 q 轴电流误差所需时间,筛选出每台电机在控制周期内能够准确跟踪 q 轴电流的矢量作为该台电机的备选矢量。若所有矢量均不能无误差跟踪给定值,则将作用一整个控制周期后与参考值误差最小的矢量作为备选矢量。然后针对公共桥臂开关状态必须一致的约束,选择合适的零矢量组合成不同的矢量组合。通过价值函数筛选出使系统性能最优的矢量组合应用于五桥臂逆变器。

依据公共桥臂在一个控制周期的状态,备选矢量的组合存在以下几种情况:

(1) 公共桥臂在整个控制周期内下桥臂导通,即备选矢量的范围为 100、110、010、000。由于公共桥臂的开关状态在整个控制周期内不变,2 台电机有效矢量的作用时间不受限制,如图 5(a) 所示。

(2) 公共桥臂在整个控制周期内上桥臂导通,即备选矢量的范围为 011、001、101、111。与情况(1)类似,2 台电机有效矢量的作用时间不受限制,如图 5(b) 所示。

(3) 公共桥臂在整个控制周期内既有上桥臂导通又有下桥臂导通,即备选矢量为 100、110、010、000 与 011、001、101、111 的组合。由于公共桥臂的开关状态在 1 个控制周期内发生了变化,其作用时间不能有重叠。以电机 1 下桥臂导通、电机 2 上桥臂导通为例,设 t_{1j} 、 t_{2j} 分别为电机 1、电机 2 第 j 个有效矢量作用时间。若 $t_{1j} + t_{2j} \leq T_s$, 2 个有效矢量之间的零矢量以电机 1 公共桥臂的

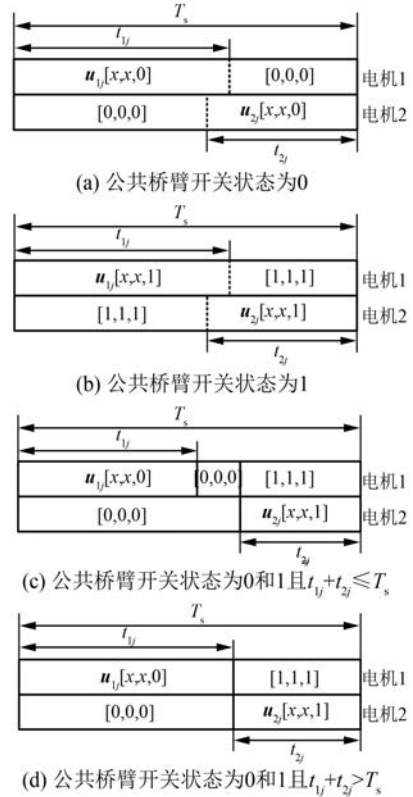


图5 矢量作用时间示意图

状态为参考进行选择,如图 5(c) 所示。若 $t_{1j} + t_{2j} > T_s$,如图 5(d) 所示,为了满足 2 台电机对公共桥臂开关状态的需求,对两电机的矢量作用时间按照式(5)进行归一化处理:

$$\begin{cases} t_{1j} = \frac{t_{1j}}{t_{1j} + t_{2j}} T_s \\ t_{2j} = \frac{t_{2j}}{t_{1j} + t_{2j}} T_s \end{cases} \quad (5)$$

3.2 电压矢量作用时间计算

本文所提控制策略利用无差拍的思想考虑了 q 轴电流无误差跟踪参考值。 q 轴电流可表示为

$$i_{iq}(k+1) = i_{iq}(k) + s_{ij}t_{ij} + s_{i0}(T_s - t_{ij}) = i_{iq}^* \quad (6)$$

式中: s_{ij} 为第 i 台电机第 j 个有效矢量作用时的交轴电流斜率; s_{i0} 为第 i 台电机零矢量作用时的交轴电流斜率; t_{ij} 为第 i 台电机第 j 个有效矢量的作用时间; t_{i0} 为第 i 台电机零矢量的作用时间; 下标 $i = 1, 2$; 下标 $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

由式(2)可得每个矢量作用时对应的交轴电流斜率为

$$s_{i0} = \left. \frac{di_{iq}}{dt} \right|_{u_{iq}=0} = \frac{1}{L_i} [-R_{is}i_{iq} - \omega_{ie}L_i i_{id} - \omega_{ie}\psi_{if}] \quad (7)$$

$$s_{ij} = \left. \frac{di_{iq}}{dt} \right|_{u_{iq}=u_{ijq}} = s_{i0} + \frac{u_{ijq}}{L_i} \quad (8)$$

设2个矢量的作用时间和为 T_s , 联立式(6)~式(8)可得2个矢量的作用时间:

$$t_{ij}(k+1) = \frac{i_{iq}^* - i_{iq}(k) - s_{i0}T_s}{s_{ij} - s_{i0}} \quad (9)$$

$$t_{i0} = T_s - t_{ij} \quad (10)$$

按照式(9)~式(10)计算出2个基本矢量的作用时间 t_{ij} 、 t_{i0} 后, 还需判断其是否在 $0 \sim T_s$ 范围内, 按如下规则进行取值:

(1) 如果 $t_{ij} \leq 0$, 令其取值为 0, 即 $t_{ij} = 0$ 。

(2) 如果 $t_{ij} \geq T_s$, 令其取值为 T_s , 即 $t_{ij} = T_s$ 。

(3) 如果 $0 < t_{ij} < T_s$, 则一个控制周期内作用1个有效矢量和1个零矢量。

则式(3)中的 $u_{id}(k)$ 、 $u_{iq}(k)$ 需改写为

$$\begin{cases} u_{id} = \frac{t_{ij}}{T_s} u_{id} \\ u_{iq} = \frac{t_{ij}}{T_s} u_{iq} \end{cases} \quad (11)$$

4 仿真分析

为了验证所提五桥臂双PMSM双矢量MPCC方法的有效性和可行性, 采用MATLAB/Simulink仿真平台对传统单矢量预测控制和所提双矢量预测控制下的五桥臂双PMSM系统分别进行了仿真研究。

仿真中直流母线电压设定为300V, 采样频率设定为20kHz, 2台电机的参数相同, 如表1所示。

表1 电机参数表

参数名称	参数值
额定功率 P_N /kW	2.3
额定转速 n_N /(r·min ⁻¹)	1500
额定转矩 T_N /(N·m)	15
额定电流 i_N /A	10
转动惯量 J_{m1} 、 J_{m2} /(kg·m ²)	0.00272
永磁磁链 ψ_f /Wb	0.5
电感 L /mH	4.025
电阻 R_s /Ω	0.635
极对数 p	2

4.1 动态性能分析

图6所示为两电机均处于空载状态转速突变的仿真结果。2台电机的初始转速均设为300r/min, 0.3s时电机1转速从300r/min跳变至500r/min, 0.6s时电机1转速从500r/min跳变至400r/min。

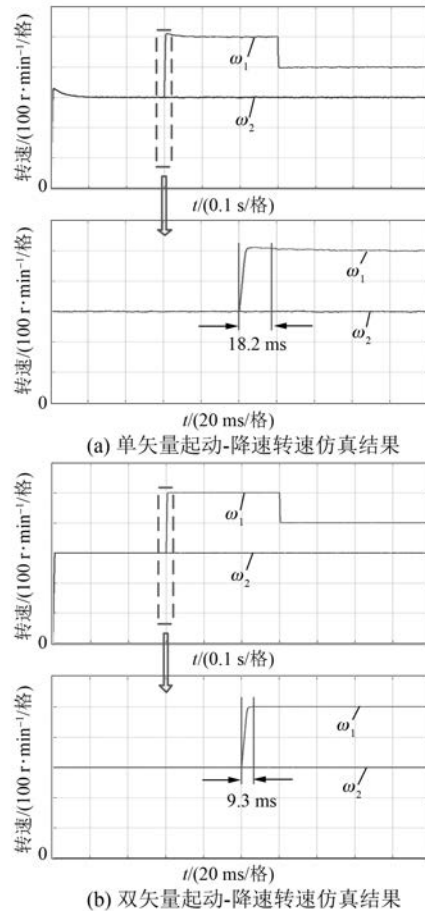


图6 电机空载起动-降速转速仿真结果

图7所示为电机空载起动, 电机1突加负载的转速波形。2台电机均给定恒定转速300r/min空载起动, 经过0.3s电机1突加5N·m负载, 电机2保持空载运转。

由图6、图7可知, 传统单矢量调制策略和所提双矢量调制策略在转速突变和突加负载的情况下均可快速准确跟踪给定的参考值。所提调制策略比传统调制策略动态效果更好。

4.2 稳态性能分析

图8所示为两电机均处于空载状态转速突变的q轴电流波形。2台电机的初始转速均设定为

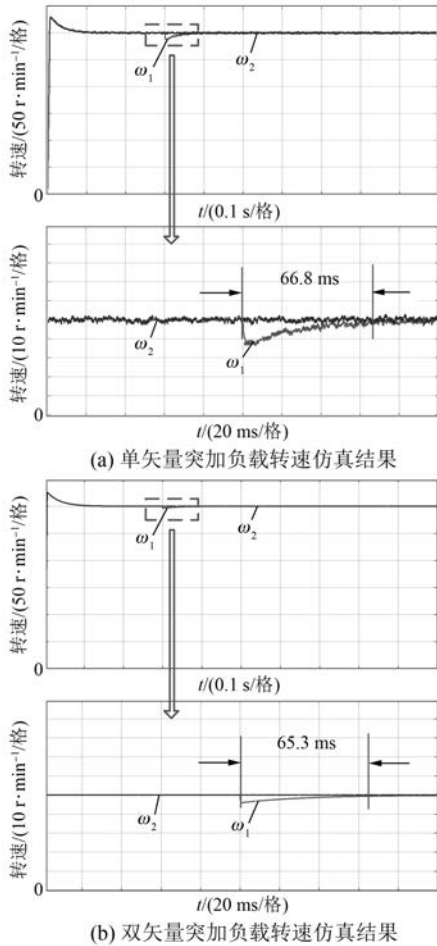


图7 电机突加负载转速仿真结果

300 r/min, 0.3 s 时电机 1 转速从 300 r/min 跳变至 500 r/min, 0.6 s 时电机 1 转速从 500 r/min 跳变至 400 r/min。

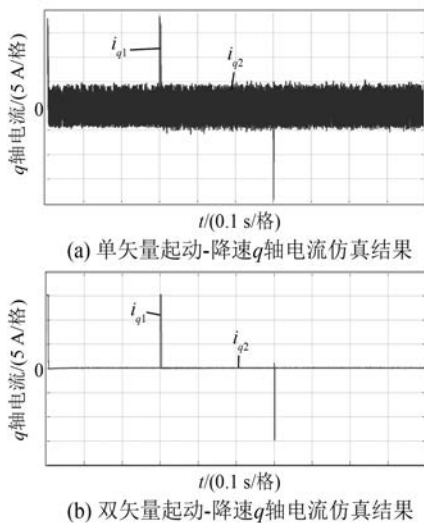


图8 电机空载起动-降速 q 轴电流仿真结果

图9所示为电机空载起动,电机1突加负载 q 轴电流波形。2台电机均给定恒定转速300 r/min空载起动。经过0.3 s电机1突加5 N·m负载,电机2一直保持空载运转。

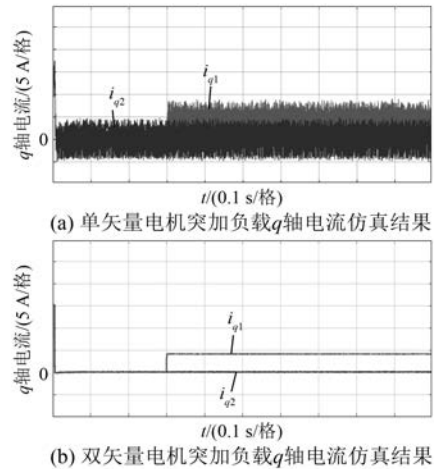


图9 电机突加负载 q 轴电流仿真结果

由图8、图9可知,所提双矢量调制策略比传统单矢量调制策略 q 轴电流波动小,转矩输出性能平稳,提高了系统的稳态性能。

4.3 三相电流谐波分析

图10所示为电机空载起动,电机1突加负载

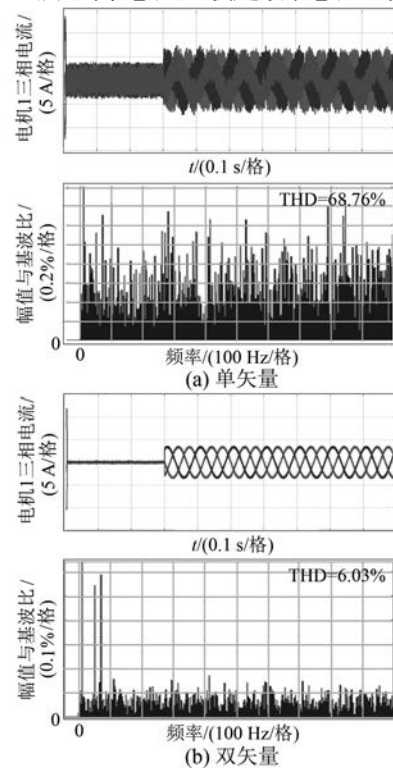


图10 电机突加负载稳态电流谐波

的三相电流波形。2 台电机均设定转速为 300 r/min, 针对 0.3 s 突加负载后电机 1 的三相电流, 进行谐波分析。

由图 10 可知, 所提双矢量调制策略的电流谐波含量远小于传统单矢量预测控制。

4.4 鲁棒性分析

图 11 所示为所提调制策略电机 1 在 0.3 s 时突加 5 N·m 负载, 电机 1 在预测模型中的电感值分别设定为仿真中所用电机额定电感 0.8 倍 (3.22 mH) 和 1.2 倍 (4.83 mH) 的转速仿真波形。

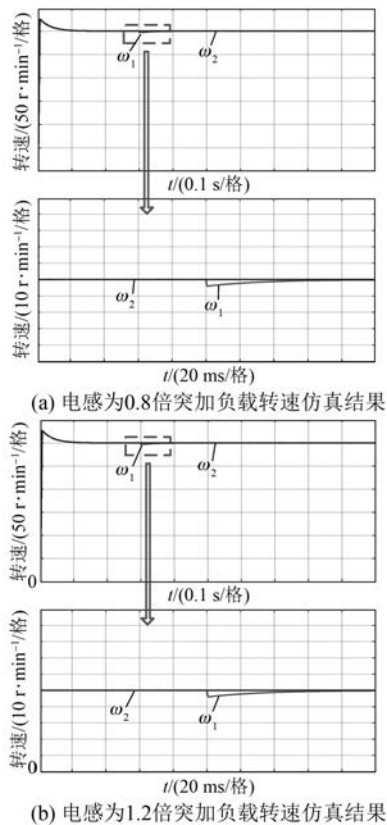


图 11 电机 1 突加负载鲁棒性对比

由图 11 可以看出, 当所提双矢量调制策略模型中电感参数相对仿真中电机额定值上下浮动 20% 时, 仍能够实现转速的准确跟踪。由此验证了所提双矢量调制策略具有良好的鲁棒性。

5 结 语

针对传统五桥臂双 PMSM MPCC 中存在的电流波动大的问题, 提出了一种双矢量电流预测控制策略。该策略利用无差拍的思想分别计算每台电机 6 个有效矢量准确跟踪 q 轴电流参考值所

需时间, 筛选出所需时间小于 1 个控制周期的有效矢量, 根据五桥臂特有的公共桥臂开关状态必须一致的特性, 选择合适的零矢量将两电机所筛选的矢量进行组合, 通过系统价值函数筛选出最优矢量组合应用于五桥臂逆变器。所提双矢量预测控制在具有预测控制良好动态效果的同时, 提升了系统的稳态性能, 提高了系统的控制精度。

【参考文献】

- [1] 梅杨, 常娜卿, 王立鹏, 等. 基于 IMC 5 桥臂逆变器双电机矢量控制研究[J]. 电气传动, 2013, 43(1): 34.
- [2] 王伟, 程明, 张邦富, 等. 最小占空比跟踪法及其在五相逆变器双三相电机系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 117.
- [3] 孙伟, 于泳, 王高林, 等. 基于矢量控制的异步电机预测电流控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3448.
- [4] 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.
- [5] KOMINAMI T, FUJIMOTO Y. A novel nine-switch inverter for independent control of two three-phase loads[C]//2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, 2007.
- [6] 谷鑫, 姜勃, 耿强, 等. 双永磁同步电机五桥臂变换器模型预测控制[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(12): 25.
- [7] 耿强, 巨永龙, 周湛清. 五桥臂双永磁同步电机系统优化模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 8.
- [8] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 表贴式永磁同步电机有限集模型预测转矩控制成本函数研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 12.
- [9] 张杰, 柴建云, 孙旭东, 等. 双三相异步电机电流预测控制算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 12.
- [10] 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.
- [11] TANAKA T, HARA A, IWASHITA M, et al. Characteristics of independent vector control of two induction motors fed by a five-leg inverter with space vector modulation[C]//2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012. (下转第 41 页)