

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211686

基于MPC的五桥臂双电机公共桥臂电流抑制方法*

刘涛¹ 尤斌¹ 诸晔源² 赵晴晴¹ 张秀云³(1.天津工业大学电气工程学院 天津 300387; 2.华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206;
3.天津职业技术师范大学自动化与电气工程学院 天津 300222)

摘要: 基于模型预测控制的五桥臂逆变器存在公共桥臂电流过大的问题,以五桥臂逆变器下的双永磁同步电机系统为研究对象,在模型预测控制策略的基础上对公共桥臂电流抑制方法展开研究。结合五桥臂双永磁同步电机系统的拓扑结构以及模型预测控制策略的算法架构,探讨了公共桥臂对应的两相电流相位差对其电流的影响,将基于转子磁链角度差的公共桥臂电流抑制方法应用于模型预测控制策略中,并对电流抑制效果进行实验验证和量化评估。实验结果表明,在均衡负载以及不均衡负载情况下,基于模型预测控制策略的公共桥臂电流抑制算法均能够实现较好的电流抑制效果。

关键词: 永磁同步电机;五桥臂逆变器;公共桥臂电流抑制;模型预测控制

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Common leg current suppression method for dual motors driven by a five-leg inverter based on MPC

Liu Tao¹ You Bin¹ Zhu Yeyuan² Zhao Qingqing¹ Zhang Xiuyun³

(1. School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. School of Automation and Electrical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: A five-leg inverter based on model predictive control (MPC) strategy has a problem of excessive common leg current. This paper takes the dual permanent magnet synchronous motor (dual-PMSM) system driven by a five-leg inverter as the research object, and a common leg current suppression method on the basis of MPC strategy is studied. Combined with the topology of five-leg dual-PMSM system and the algorithm architecture of MPC strategy, the influence of the phase difference of two-phase current corresponding to common leg on common leg current is discussed. The common leg current suppression method based on the rotor flux linkage angle difference is applied to MPC strategy, and corresponding experiments are carried out so as to verify and evaluated current suppression effect. Experimental results show that the common leg current suppression algorithm based on MPC strategy can achieve a fine control effect whether under the balanced load or not.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; five-leg inverter; common leg current suppression; model predictive control

0 引言

近年来,随着工业技术水平的不断发展,纺织、钢铁、多自由度数控机床以及轨道交通等多个领域对双电机同步控制系统的要求越来越高^[1-4]。与传统的双逆变器双永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)相比,五桥臂逆变器双电机控制系统减少了开关器件的数量,

降低了逆变器的生产成本;同时,作为六桥臂逆变器故障运行模式下的拓扑结构,五桥臂逆变器提高了系统运行的安全稳定性。因此,五桥臂逆变器双电机控制系统逐渐成为国内外学者的研究热点^[5-7]。

针对五桥臂双电机控制系统,学术界提出了多种控制策略与调制算法,如磁场定向控制,直接转矩控制,模型预测控制,自适应控制,滞环控制。其中,模型预测控制

收稿日期:2022-10-13

* 基金项目:国家自然科学基金(51807139)、天津市普通高等本科院校教学质量与教学改革研究计划(B201005807)、天津市自然科学基金(19JJCQNJC03600,20JJCQNJC00370)项目资助

(model predictive control, MPC) 因其算法结构简单清晰, 易于加入非线性约束条件, 能够有效实现多目标优化控制, 逐渐得到国内外学者的广泛关注。相比广泛应用的磁场定向控制 (field oriented control, FOC) 策略^[8-9], 模型预测控制策略取消了传统线性控制器的使用, 消除了交、直流电流的非线性耦合, 可以处理多变量约束等相关问题, 提高了系统的动、稳态性能及控制精度^[10-14]。

在五桥臂双电机控制系统中, 由于逆变器公共桥臂电流为两台电机相应相电流的叠加, 因而不可避免地会存在公共桥臂电流过大的问题。为解决这一问题, 部分学者对其进行了深入的研究。文献[15]采用角度控制器, 通过对转子磁链角 θ_1 与 $\theta_2 + \delta$ 进行三角函数运算, 将具有误差性质的归一化结果注入到系统中, 以达到最小化公共桥臂电流的目的。文献[16-17]提出了一种半周期调制策略, 通过将五桥臂逆变器在一个控制周期内对两台电机的同时控制转化为在两个半周期内对两台电机的分时独立控制, 使公共桥臂在任一时刻通过的电流始终为某一电机的相电流, 从而有效解决了公共桥臂电流过高的问题。

但是, 上述研究均是基于传统线性控制策略进行的, 而非基于非线性控制思想的模型预测控制策略。考虑到模型预测控制存在较高的谐波电流, 并且在算法架构上与传统线性控制策略存在较大差异, 因而如何实现模型预测控制策略下的五桥臂逆变器公共桥臂电流抑制, 是一个亟待解决的问题。针对上述问题, 本文将基于双电机转子磁链角度差的公共桥臂电流抑制算法引入到模型预测控制策略中。将五桥臂逆变器看作一个整体, 通过构建五桥臂双电机控制系统的预测模型、价值函数、寻优算法, 分析公共桥臂对应的两相电流相位差对合成电流的影响, 通过改变双电机转子磁链角度差来调节公共桥臂上两相电流的相对相位, 使两相电流相位相反, 相互抵消, 以抑制公共桥臂电流, 提高五桥臂双电机控制系统的稳定性。最后, 通过搭建实验平台, 对模型预测控制策略下的公共桥臂电流抑制效果进行实验验证与量化评估。

1 五桥臂双永磁电机系统的拓扑结构和数学模型

1.1 五桥臂双永磁电机系统的拓扑结构

五桥臂双永磁电机系统由直流电源、五桥臂逆变器、永磁同步电机以及相应负载组成, 拓扑结构如图 1 所示。

图 1 的主体部分为五桥臂逆变器的变流桥和两台用于驱动的永磁同步电机。其中, 逆变器的三相桥臂 A、B、C 用于驱动电机 1, 与三相定子绕组 a_1 、 b_1 、 c_1 相连接; 逆变器的三相桥臂 C、D、E 用于驱动电机 2, 与三相定子绕组 a_2 、 b_2 、 c_2 相连接, 其中, C 相桥臂为两台电机的公共桥臂。

1.2 五桥臂双永磁电机系统的数学模型

在建立系统数学模型的过程中, 将五桥臂逆变器看作是理想逆变器, 即不考虑功率开关器件中的电压降落以及换相过程中死区时间的设定等问题。

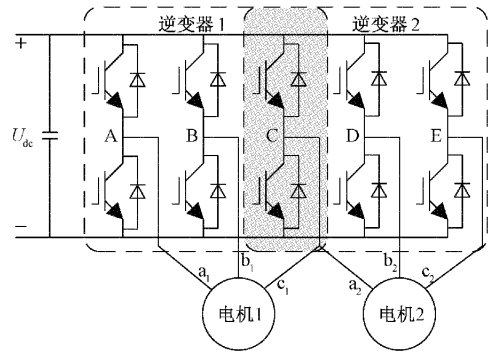


图 1 五桥臂双永磁电机系统的拓扑结构

逆变器任一桥臂的开关状态 S_x 可以表示为:

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{上开关器件导通, 下开关器件关断} \\ 0 & \text{下开关器件导通, 上开关器件关断} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = A, B, C, D, E$, 表示为逆变器的各相桥臂。

由于每相桥臂都能输出 0 和 1 两种开关状态, 因而五桥臂逆变器共能输出 $2^5 = 32$ 种开关状态组合, 其对应的开关状态集如表 1 所示。

表 1 五桥臂逆变器开关状态集

| 五相桥臂 | A | B | C | D | E |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 00000 | 00001 | 00010 | 00011 | 00011 |
| | 00100 | 00101 | 00110 | 00111 | 00111 |
| | 01000 | 01001 | 01010 | 01011 | 01011 |
| 开关状态 | 01100 | 01101 | 01110 | 01111 | 01111 |
| | 10000 | 10001 | 10010 | 10011 | 10011 |
| | 11000 | 11001 | 11010 | 11011 | 11011 |
| | 11100 | 11101 | 11110 | 11111 | 11111 |

两台电机交流侧相电压与逆变器开关状态函数之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} U_{AN1} \\ U_{BN1} \\ U_{CN1} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & -2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} U_{CN2} \\ U_{DN2} \\ U_{EN2} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & -2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_C \\ S_D \\ S_E \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: U_{AN1} 、 U_{BN1} 、 U_{CN1} 分别为电机 1 的三相输入电压; U_{CN2} 、 U_{DN2} 、 U_{EN2} 分别为电机 2 的三相输入电压; U_{dc} 为逆变器直流侧的电源电压。

采用 Clarke 变换, 将永磁同步电机三相静止坐标系下电压方程转换为 $\alpha\beta$ 静止坐标系下电压方程, 即:

$$\begin{bmatrix} U_{\alpha 1} \\ U_{\beta 1} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{AN1} \\ U_{BN1} \\ U_{CN1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} U_{\alpha 2} \\ U_{\beta 2} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{CN2} \\ U_{DN2} \\ U_{EN2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $U_{\alpha 1}$ 、 $U_{\beta 1}$ 和 $U_{\alpha 2}$ 、 $U_{\beta 2}$ 分别为 $\alpha\beta$ 静止坐标系下电机 1 和电机 2 的定子电压。

反电动势的数学表达式为:

$$\begin{bmatrix} e_{\alpha m} \\ e_{\beta m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{em} \cdot \psi_{fm} \cdot (-\sin\theta_{em}) \\ \omega_{em} \cdot \psi_{fm} \cdot \cos\theta_{em} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: ω_e 为电机转子电角速度; ψ_f 为转子永磁体磁链; θ_e 为电机的电角度; m 是用来区分两台电机的序号, 其值为 1 或 2。

在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下, 表贴式永磁同步电机的定子电压平衡方程为:

$$\mathbf{u}_m = R\mathbf{i}_m + L \frac{d\mathbf{i}_m}{dt} + \mathbf{e}_m \quad (7)$$

式中: $\mathbf{u} = [u_\alpha \ u_\beta]^T$ 为电机的输入电压矢量; $\mathbf{i} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ 为电机的输入电流矢量; $\mathbf{e} = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ 为电机的反电动势矢量; R 、 L 分别为电机的定子电阻与定子电感。

根据式(7), 可以得到以定子电流为状态变量的微分方程:

$$\frac{d\mathbf{i}_m}{dt} = \frac{\mathbf{u}_m - \mathbf{e}_m - R\mathbf{i}_m}{L} \quad (8)$$

采用一阶欧拉法^[18]将式(8)离散化, 可得:

$$\mathbf{i}_m^n(k+1) = (1 - \frac{RT}{L})\mathbf{i}_m(k) + \frac{T}{L} [\mathbf{u}_m(k) - \mathbf{e}_m(k)], \quad n = 1 \sim 8 \quad (9)$$

式中: T 为控制周期; $\mathbf{i}(k)$ 、 $\mathbf{u}(k)$ 、 $\mathbf{e}(k)$ 分别为 kT 时刻定子电流矢量、电压矢量和反电动势矢量的测量值; $\mathbf{i}^n(k+1)$ 为 $(k+1)T$ 时刻定子电流矢量的预测值。

2 五桥臂双永磁电机系统模型预测控制策略

五桥臂双永磁电机下的模型预测控制策略流程如图 2 所示。

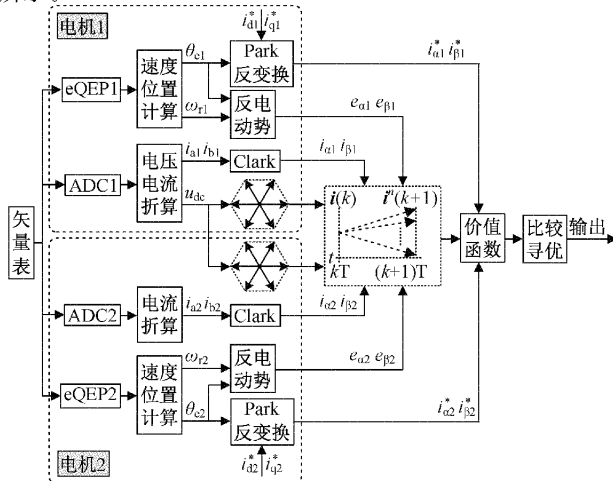


图 2 五桥臂双永磁电机的模型预测控制策略流程

图 2 中, 控制策略基于五桥臂逆变器的拓扑结构, 根据表 1 中的所有开关状态, 对相应电压矢量作用下的系统动态行为进行预测, 筛选出与电流给定值误差最小的电流预测值。所采用的价值函数为:

$$g^n(k+1) = \sum_{n=1}^2 \{ \lambda_{\alpha m} | i_{\alpha m}^n(k+1) - i_{\alpha m}^*(k+1) | + \lambda_{\beta m} | i_{\beta m}^n(k+1) - i_{\beta m}^*(k+1) | \} \quad (10)$$

式中: $\lambda_{\alpha m}$ 、 $\lambda_{\beta m}$ 为价值函数的权重。

筛选出的最优电压矢量为:

$$\mathbf{V} = \underset{\mathbf{V}_n}{\operatorname{argmin}} g^n(k+1), n = 1 \sim 32 \quad (11)$$

式中: $\operatorname{argmin} g^n(k+1)$ 表示最小 $g^n(k+1)$ 的值对应的电压矢量 \mathbf{V}_n 。

最后, 将最优电压矢量所对应的开关状态作为最优开关状态输出至逆变器^[19]。

在实际的数字控制系统中, 由于采样环节、滤波环节以及计算环节均需花费一定的运行时间, 因而在当前控制周期计算出来的最优电压矢量需到下一控制周期才能作用到系统中。为此, 需要加入延迟补偿算法, 即在原预测寻优过程之前, 进行一次电流预测, 并将得到的电流预测值应用于之后的模型预测控制算法中, 整个过程需要经历两个阶段的电流预测环节^[20]。

3 公共桥臂电流抑制策略

在五桥臂双永磁电机系统中, 任一时刻两台永磁电机各相绕组中通过的相电流可按式(12)表示:

$$\begin{cases} i_{a1}(t) = I_{s1} \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) \\ i_{b1}(t) = I_{s1} \cos(2\pi f_1 t + \theta_1 - 120^\circ) \\ i_{c1}(t) = I_{s1} \cos(2\pi f_1 t + \theta_1 + 120^\circ) \\ i_{a2}(t) = I_{s2} \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) \\ i_{b2}(t) = I_{s2} \cos(2\pi f_2 t + \theta_2 - 120^\circ) \\ i_{c2}(t) = I_{s2} \cos(2\pi f_2 t + \theta_2 + 120^\circ) \end{cases} \quad (12)$$

式中: I_{s1} 和 I_{s2} 分别为电机 1 与电机 2 相电流的幅值; f_1 与 f_2 分别为电机 1 与电机 2 的运行频率; θ_1 和 θ_2 分别为电机 1 与电机 2 永磁体磁链的初始位置角。

当两台电机同步运行时, 各相定子绕组相电流间的相量关系如图 3 所示。

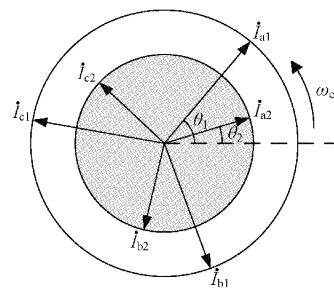


图 3 五桥臂双永磁电机各相电流相量关系

结合图 1 中五桥臂逆变器的拓扑结构,公共桥臂电流为位于公共桥臂上的两相定子电流的叠加,即:

$$i_C = i_{c1} + i_{a2} \quad (13)$$

其峰值表达式为:

$$i_{C-peak} = \sqrt{I_{s1}^2 + I_{s2}^2 + 2I_{s1}I_{s2}\cos\Delta\theta} \quad (14)$$

式中: $\Delta\theta$ 为公共桥臂上两相电流 i_{a2} 与 i_{c1} 的相位差,其表达式为:

$$\Delta\theta = \theta_{e2} - (\theta_{c1} + 120^\circ) = (2\pi f_2 t + \theta_2) - [(2\pi f_1 t + \theta_1) + 120^\circ] \quad (15)$$

当两台电机同步运行时, $f_1 = f_2$,此时,转子磁链角度差 $\Delta\theta$ 的取值范围为:

$$\Delta\theta \in [0^\circ, 360^\circ] \quad (16)$$

从而, $\cos\Delta\theta$ 的取值范围为:

$$\cos\Delta\theta \in [-1, 1] \quad (17)$$

结合式(14)可得,公共桥臂电流峰值变化范围为:

$$i_{C-peak} \in [|I_{s1} - I_{s2}|, I_{s1} + I_{s2}] \quad (18)$$

经上述数学公式的推导、分析,可以得到:在五桥臂双永磁电机系统中,当两台电机同步运行时,公共桥臂电流的大小不仅与两台电机相电流的幅值 I_{s1} 、 I_{s2} 有关,而且还与两台电机转子磁链角度差 $\Delta\theta$ 有关。并且当两台电机相电流的幅值 I_{s1} 、 I_{s2} 一定时,两台电机转子磁链角度差 $\Delta\theta$ 越接近 0° (或 360°),公共桥臂的电流越大,最大为 $I_{s1} + I_{s2}$; $\Delta\theta$ 越接近 180° ,公共桥臂的电流越小,最小为 $|I_{s1} - I_{s2}|$ 。因此,为降低公共桥臂电流峰值,使公共桥臂电流最小化,两台电机转子磁链角度差 $\Delta\theta$ 应等于或接近于 180° 。基于上述分析,本文所采用的公共桥臂电流抑制方法具体实现过程如下:

当两台电机同步运行时,其工作频率始终保持一致。电机 1 的参考电流由速度环的 PI 控制器给定,电机 2 的参考电流由两部分组成:第 1 部分与电机 1 的参考电流给定方式相同,通过相应转速环的 PI 控制器给定,第 2 部分则是将两台电机的转子磁链角度差与 180° 进行比较,并将比较结果输入至 PI 控制器进行处理,经处理后所输出的值即为系统所需的修正电流分量。最后将电机 2 的原 q 轴电流 I_{q2}^* 与该修正电流分量一起作为 q 轴修正电流注入到电机 2 中。其内部流程如图 4 所示。

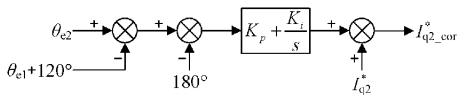


图 4 永磁电机 2 的 q 轴修正电流流程

在两台电机同步运行的过程中,转子磁链角会在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内变化。如果直接将两台电机转子磁链角度差与 180° 进行比较,会使得 PI 控制器的输入信号存在突变,从而无法通过比例积分来进行调节。为顺利使用 PI 控制器输出修正电流分量,可对采集到的转子磁链角作如下处理,以使 PI 控制器得到较为平滑的输入信号,处理过程如图 5 所示。

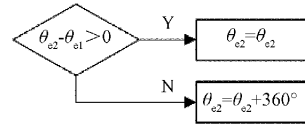


图 5 永磁电机 2 转子磁链角的等效变换流程

4 实验结果与分析

为了验证本文所采用的基于转子磁链角度差的公共桥臂电流抑制算法在模型预测控制策略下的可行性和有效性,搭建实验平台如图 6 所示。

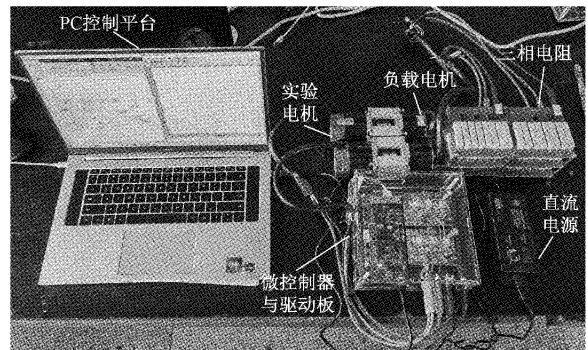


图 6 五桥臂双电机交流调速实验平台

在本实验平台中,控制器采用 TI 公司生产的 32 位浮点型微控制器 TMS320F28379D;五桥臂逆变器由两块 BOOSTXL-3PhGaNInv 电机驱动板合并而成,在工作时,使电机 1 的 C 相桥臂和电机 2 的 A 相桥臂的开关状态相同,等效为五桥臂工作模式;两台实验电机均为表贴式永磁同步电机,同时配备 1 000 脉冲/圈增量式光电编码器,用以实时获取电机的转子位置信息。实验中的电机参数如表 2 所示。

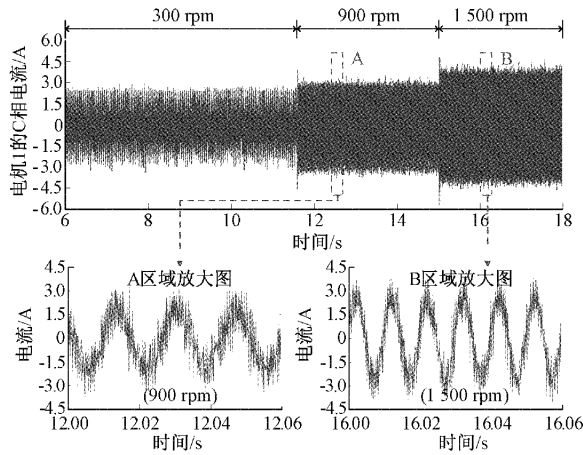
表 2 实验电机参数表

| 参数 | 数值 |
|---------------------------------------|---------|
| 额定转速 ω_N /rpm | 3 000 |
| 额定电流 I_N /A | 7.7 |
| 额定转矩 T_N /N·m | 0.423 7 |
| 额定功率 P_N /W | 133 |
| 极对数 p | 4 |
| 定子相电阻 R /Ω | 0.345 |
| 反电动势常数 k_e /(V/krpm ⁻¹) | 6.64 |
| 定子相电感 L /mH | 0.366 |
| 逆变器直流电压 u_{dc} /V | 24 |

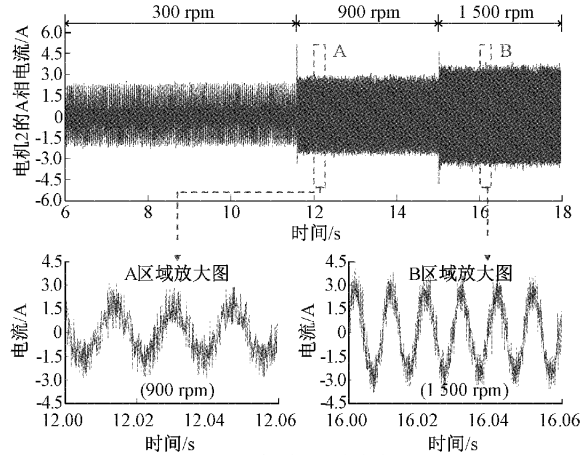
此外,在该实验平台中,两台实验电机通过联轴器分别与一台同型号的负载电机相连接,并且该负载电机的三相定子绕组外接星形连接的三相对称电阻负载。通过改变外接三相电阻的阻值,即可调节两台实验电机所接负载的大小。

当电机 1 与电机 2 负载情况相同时,设置负载电阻的大小均为 $10\ \Omega$ 。两台电机以 $300\ \text{rpm}$ 的转速启动,随后切入转子磁链角度控制算法,将公共桥臂上的两相电流相位差控制为 0° ,以模拟公共桥臂峰值电流最大时的情况。然后将两台电机转速升到 $900\ \text{rpm}$,再升到 $1\ 500\ \text{rpm}$ 。实验过程中,电机 1 的 C 相电流、电机 2 的 A 相电流、公共桥臂上两相电流相位差以及通过的电流如图 7 所示。

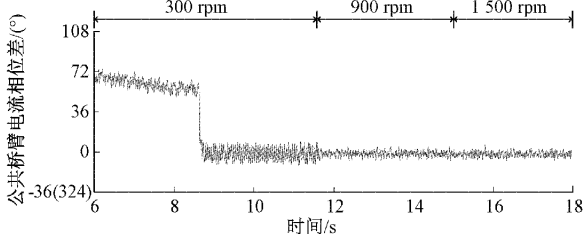
由图 7 可知,在负载条件相同的情况下,两台电机在同转速时的相电流幅值相同。以 900 和 $1\ 500\ \text{rpm}$ 的转速为例,两台电机在 900 和 $1\ 500\ \text{rpm}$ 转速下的相电流幅值分别为 2.08 和 $2.52\ \text{A}$,由于此时公共桥臂对应的两相电流相位相同,相位差为 0° ,因此公共桥臂电流峰值达到最大,其值分别为 3.82 和 $5.05\ \text{A}$ 。公共桥臂电流为电机 1 的 C 相电流与电机 2 的 A 相电流幅值之和,近似相当于每台



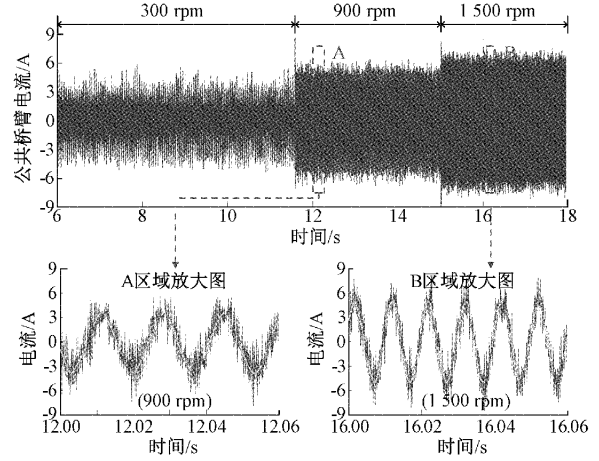
(a) 电机 1 的 C 相电流波形图



(b) 电机 2 的 A 相电流波形图



(c) 公共桥臂上两相电流的相位差

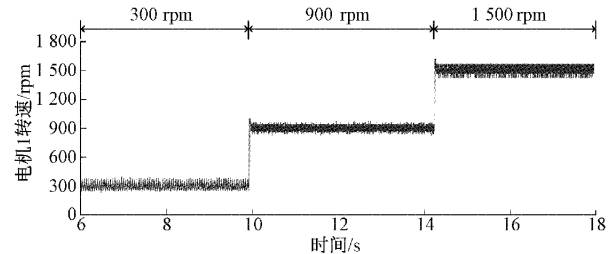


(d) 五桥臂逆变器公共桥臂电流波形图

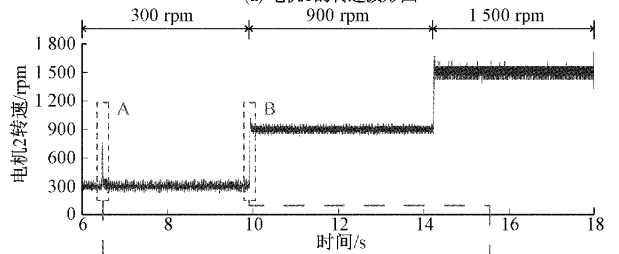
图 7 相同负载下不注入公共桥臂电流抑制算法的实验结果

电机相电流幅值的 2 倍。

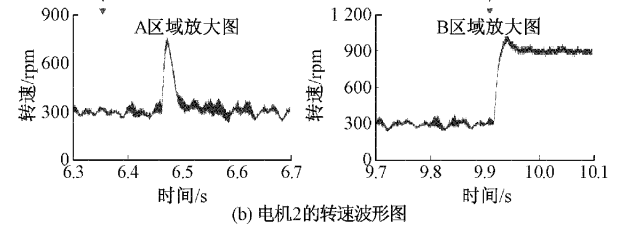
当向电机 2 中注入公共桥臂电流抑制算法后,公共桥臂对应的两相电流相位相反,相位差被控制在 180° ,公共桥臂电流得到了良好的抑制,此时系统的运行情况如图 8 所示。



(a) 电机 1 的转速波形图



(b) 电机 2 的转速波形图



(c) 公共桥臂上两相电流的相位差

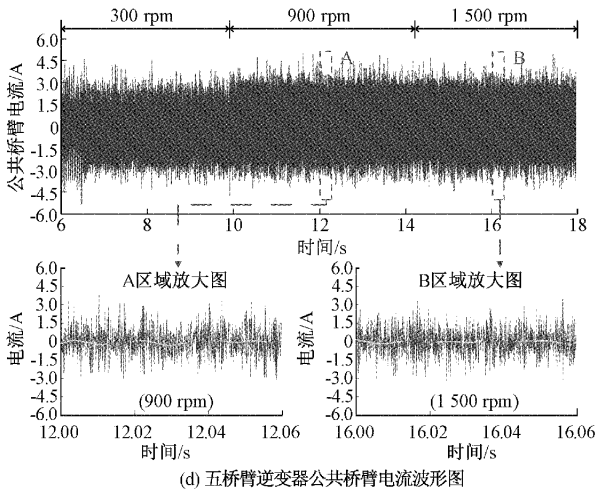
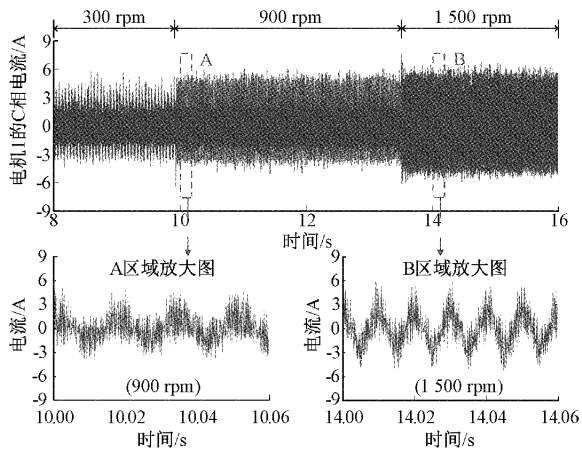


图 8 相同负载下注入公共桥臂电流抑制算法的实验结果

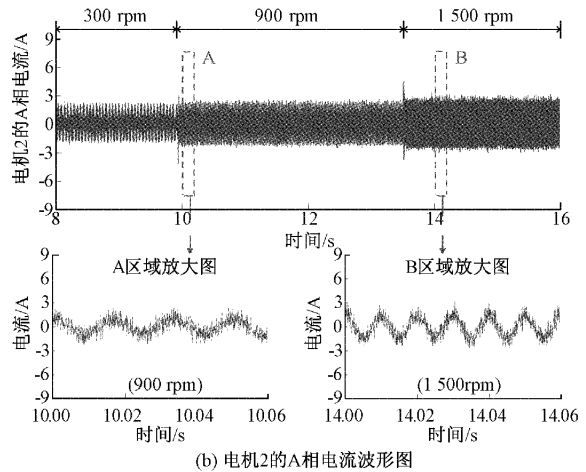
图 8 中,在 $t = 6.4 \sim 6.5$ s 时间段内将公共桥臂电流抑制算法注入系统,此时系统中会产生一个转速脉冲,电机 2 的转速在短时间内迅速变化,以调节两电机的转子磁链角度差,使该电机的 A 相电流与电机 1 的 C 相电流相位相反,相位差变为 180° 。在本实验中,当两台电机转速为 900、1 500 rpm 时,公共桥臂电流分别为 0.244 和 0.209 A,与不注入公共桥臂电流抑制算法相比,公共桥臂电流分别降低了 93.61% 和 95.86%。可以看到,当两台电机负载条件相同时,该算法能极大程度上降低公共桥臂的电流,维护五桥臂逆变器双电机控制系统的安全稳定性。

当两台电机负载情况不同时,设置电机 1 负载电阻大小为 10Ω ,电机 2 负载电阻为 5Ω 。调节两台电机的转速,使其变化情况与前述实验相同。在两台电机启动后,切入转子磁链角度控制算法,使公共桥臂上相应的两相电流相位差为 0° ,实验过程中电机 1 的 C 相电流、电机 2 的 A 相电流、公共桥臂上通过的电流如图 9 所示。

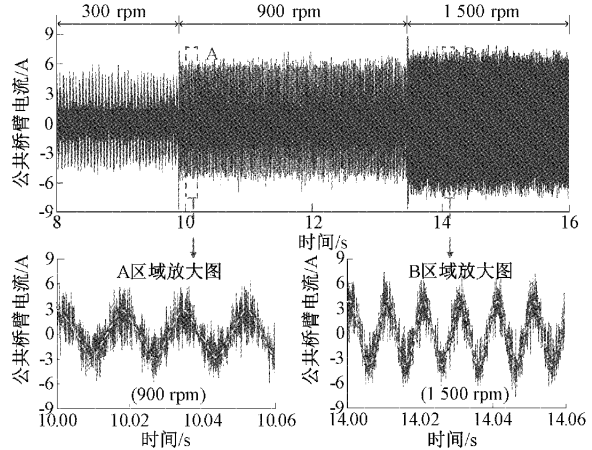
图 9 中,在负载条件不同且公共桥臂上两相电流相位相同的情况下,两台电机在相同转速下的相电流幅值不再相同。同样,以 900 和 1 500 rpm 时的转速为例,电机 1



(a) 电机1的C相电流波形图



(b) 电机2的A相电流波形图



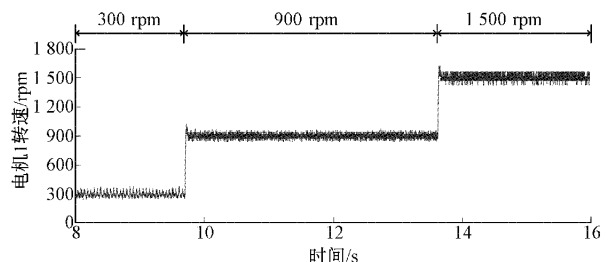
(c) 五桥臂逆变器公共桥臂电流波形图

图 9 不同负载下不注入公共桥臂电流抑制算法的实验结果

在 900 和 1 500 rpm 转速下的相电流幅值分别为 2.05 和 2.45 A,电机 2 在 900 和 1 500 rpm 转速下的相电流幅值分别为 1.09 和 1.50 A,公共桥臂在上述转速下的合成电流峰值分别约为 2.88 和 4.09 A,近似等于公共桥臂对应两个相电流的幅值之和。

当向电机 2 中注入公共桥臂电流抑制算法后,公共桥臂对应的两相电流相位差被控制在 180° ,两相电流相互抵消,此时系统的运行情况如图 10 所示。

图 10 中可以看出,在不同负载条件下公共桥臂对应的两相电流幅值不同,当注入公共桥臂电流抑制算法后,两相电流相位相反,相位差变为 180° 。观察公共桥臂电流波形图,可以看出,采用该算法后,公共桥臂电流峰值大大降低,



(a) 电机1的转速波形图

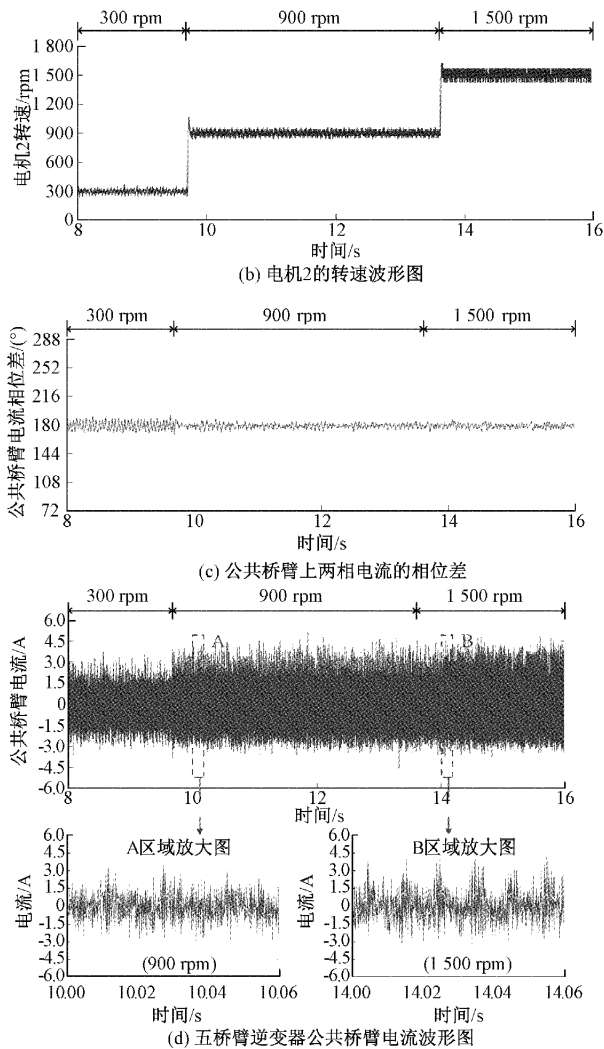


图10 不同负载下注入公共桥臂电流抑制算法的实验结果

当两电机转速为 900、1 500 rpm 时,公共桥臂电流分别为 1.059 和 1.094 A,仅相当于不注入公共桥臂电流抑制算法时的 36.77% 和 26.75%,此时公共桥臂电流为对应的两相电流幅值之差的绝对值。实验表明,当两台电机负载条件不同时,该算法仍能显著降低五桥臂双永磁电机系统中公共桥臂电流的大小。

由图 7~10 所示的实验结果可以看出,在注入基于转子磁链角度差的公共桥臂电流抑制算法后,公共桥臂电流幅值明显降低。模型预测控制策略会给系统带来较高的电流谐波分量,但由图 8 和 10 所示的实验结果可以看到,即使考虑上述谐波因素,该算法仍有较为明显的公共桥臂电流抑制效果。

5 结 论

本文以基于模型预测控制的五桥臂双永磁同步电机系统为研究对象,针对运行过程中存在的公共桥臂电流过大问题,引入调节双电机转子磁链角度差的控制方法,设计了基

于公共桥臂电流抑制算法的五桥臂双永磁电机模型预测控制策略,并对该算法的电流抑制效果进行实验验证与量化评估。实验结果表明,该算法对公共桥臂电流具有良好的抑制效果,有利于提高五桥臂双电机系统运行的安全稳定性。

参考文献

- [1] 夏长亮,李莉,谷鑫,等. 双永磁电机系统转速同步控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 1-8.
- [2] 王志强,张秀云. 双永磁同步电机系统非级联预测速度同步控制[J]. 微电机, 2020, 53(6): 78-86.
- [3] 叶宇豪,彭飞,黄允凯. 多电机同步运动控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2922-2935.
- [4] 郭建英,赵宏平. 基于谐波注入的永磁电机转矩脉动抑制策略研究[J]. 中国测试, 2022, 48(4): 47-52.
- [5] 唐永聪,刘涛,耿强. 双电机五桥臂逆变器模型预测同步控制[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 61-65.
- [6] TABBACHE B, REBAA K, MAROUANI K, et al. Independent control of two induction motors fed by a five legs PWM inverter for electric vehicles[C]. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013. Istanbul, Turkey: IEEE, 2013: 629-634.
- [7] LIM C S, LEVI E, JONES M, et al. A comparative study of synchronous current control schemes based on FCS-MPC and PI-PWM for a two-motor three-phase drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3867-3878.
- [8] 陈昱昊,郑宾. 基于模糊 PI 控制的永磁同步电机矢量控制性能研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(7): 75-81.
- [9] 邓聪颖,舒杰,陈翔,等. 多参数变化下基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 260-268.
- [10] 席裕庆,李德伟,林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
- [11] 高翔,鲁炳林,白月建,等. 基于电流环优化的双三相永磁同步电机双二阶模型预测控制[J]. 电子测量技术, 2021, 44(18): 31-36.
- [12] 刘涛,何启发,肖朝霞,等. 基于 FCS-MPC 的五桥臂 UPQC 电能质量补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 66-74.
- [13] 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(S1): 73-79.
- [14] 李瑞祺,黎英. 永磁同步电机无传感器启动过程研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 218-224.
- [15] LIM Y S, LEE J S, LEE K B. Advanced speed control for a five-leg inverter driving a dual-induction motor system [J]. IEEE Transactions on Industrial

- Electronics, 2019, 66(1): 707-716.
- [16] 史婷娜, 张必军, 刘涛, 等. 五桥臂逆变器驱动的双永磁同步电机系统占空比优化调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1498-1507.
- [17] HARA A, ENOKIJIMA H, MATSUSE K. Independent vector control of two induction motors fed by a five-leg inverter with space vector modulation[C]. 2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Orlando, FL, USA; IEEE, 2011: 1-8.
- [18] 刘涛, 习金玉, 宋战锋, 等. 基于多核并行计算的永磁同步电机有限集模型预测控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 107-119.
- [19] 张永昌, 杨海涛, 魏香龙. 基于快速矢量选择的永磁同步电机模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 66-73.
- [20] 方番, 李媛, 肖先勇, 等. 储能型准 Z 源逆变器的有限集模型预测控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2133-2144.

作者简介

刘涛, 博士, 副教授, 主要研究方向为永磁同步电机及其控制理论、多电机耦合与协同控制。

E-mail: taoliu@tju.edu.cn

尤斌, 硕士研究生, 主要研究方向为电机系统及其控制。

E-mail: Z13700590820@163.com