

永磁同步电机电流控制策略比较研究

李耀华*, 王钦政, 李明睿, 李岩松, 李欣睿, 雷济瑀,

王宇辰, 许浩, 丁红

(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

Comparative Study on Current Control Strategy for PMSM

LI Yaohua*, WANG Qinzhen, LI Mingrui, LI Yansong, LI Xinrui, LEI Jiyu,

WANG Yuchen, XU Hao, DING Hong

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: [Objective] To enhance the performance of permanent magnet synchronous motor (PMSM) control systems, selecting an appropriate current control strategy for different application scenarios is crucial. This paper conducts a comparative study of five current control strategies: vector control based on hysteresis current control (HCC), proportional-integral (PI) control, and sliding mode control (SMC), as well as model predictive current control (MPCC) and deadbeat current control (DBCC). The study aims to reveal the performance differences of these strategies under various operating conditions, providing a basis for selecting the most suitable strategy in practical applications. [Methods] This study adopted a combined research methodology of simulation and experimentation. Discretized simulation models of the PMSM system under different control strategies were developed based on Matlab/Simulink. The dynamic response and steady-state accuracy of each strategy were evaluated by applying various loads, speeds, and control parameters. Meanwhile, a motor back-to-back test platform was built, and experiments were conducted under the same operating conditions. The simulation and experimental current and speed waveforms were comparatively analyzed, and the actual performance of the control strategy was validated. [Results] The simulation and experimental results indicated that the DBCC strategy employing space vector modulation exhibited superior performance. In HCC and MPCC, the voltage vector was applied throughout the entire sampling period, resulting in significant current ripple. The DBCC demonstrated the best real-time performance, followed by HCC, while PI control and SMC showed comparable results, and MPCC had the poorest real-time performance. During load transients, the speed drop was minimized by HCC, with the other four control strategies exhibiting similar speed

drops. The recovery time was shortest for MPCC, followed by HCC, while the remaining three strategies showed comparable recovery times. [Conclusion] By comprehensively comparing the control performance and real-time performance of the above current control strategies, the DBCC for PMSM demonstrates superior performance in both aspects.

Key words: permanent magnet synchronous motor; vector control; model predictive current control; deadbeat current control

摘要: [目的]为提高永磁同步电机(PMSM)控制系统的性能,针对不同应用场景选择合适的电流控制策略至关重要。本文围绕基于滞环电流控制(HCC)、比例积分(PI)控制、滑模控制(SMC)的矢量控制,以及模型预测电流控制(MPCC)和无差拍电流控制(DBCC)五种电流控制策略进行对比研究,旨在揭示不同控制策略在不同工况下的性能差异,为实际应用中的策略选择提供依据。【方法】本文采用仿真与试验相结合的研究方法,基于Matlab/Simulink构建了不同控制策略下PMSM系统的离散化仿真模型,通过设置不同负载、转速及控制参数,评估各种策略的动态响应和稳态精度。同时,搭建电机对拖试验平台,在相同工况下进行试验,对比分析仿真与实测的电流、转速波形,验证控制策略的实际性能。【结果】仿真和试验结果表明,采用空间矢量调制的DBCC策略性能更优。HCC和MPCC施加电压矢量作用整个采样周期,产生较大的电流脉动。DBCC实时性最好,HCC次之,PI控制和SMC两者基本相当,MPCC实时性最差。当负载突变时,HCC转速跌落最小,其余四种控制策略转速跌落基本相当。MPCC恢复时间最短,HCC次之,另外三种控制策略基本相当。【结论】综合比较上述电流控制策略的控制性能和实时性能,PMSM的DBCC性能与实时性均较好。

关键词: 永磁同步电机; 矢量控制; 模型预测电流控制; 无差拍电流控制

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)凭借其功率密度高、动态响应速度快和运行可靠等优势,已成为新能源汽车、轨道交通等领域的技术主流^[1-4]。然而,PMSM作为强电磁耦合、非线性动力学特性的复杂被控对象,仍面临电流/转矩脉动导致的机械振动与噪声问题、参数摄动对系统鲁棒性的影响及不同工况下动态响应特性的协调控制需求等技术挑战^[5]。

当前 PMSM 主流电流控制策略主要包括矢量控制、模型预测电流控制(Model Predictive Current Control, MPCC)和无差拍电流控制(Deadbeat Current Control, DBCC)。其中,矢量控制可根据实现方式分为两类:基于滞环比较的电流法和基于空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)的电压法。电压法可采用比例积分(Proportional-Integral, PI)控制、滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)等生成理想 dq 轴电压^[6-11]。

有限控制集模型预测控制通过遍历所有开关状态,利用预测模型计算未来控制状态,并基于成本函数选择最优开关状态,近年来备受关注^[12-20]。然而,其开关状态作用于整个采样周期,导致电流脉动较大。相比之下,DBCC 基于预测模型反向计算理想电压矢量,理论上可实现零误差,显著提升电机的控制性能^[21-26]。

本文分别建立基于滞环电流控制(Hysteresis Current Control, HCC)、PI控制及 SMC 的矢量控制以及 MPCC 和 DBCC 的 PMSM 仿真模型,并对上述电流控制策略进行试验验证,综合比较控制策略的特点,为不同应用场景下控制策略的选择提供依据。

1 矢量控制

转子 dq 旋转坐标系下,表贴式 PMSM 定子电压方程如式(1)所示:

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

式中: u_d 和 u_q 、 i_d 和 i_q 分别为 dq 轴定子电压、电

流; R_s 为定子电阻; ω_e 为电机电角速度; L_d 、 L_q 分别为定子 dq 轴电感, $L_d=L_q$; ψ_f 为永磁体磁链。

表贴式 PMSM 转矩方程如式(2)所示:

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q \psi_f \quad (2)$$

式中: p 为电机极对数。

1.1 基于 HCC 的矢量控制

基于 HCC 的 PMSM 矢量控制系统框图如图 1 所示。图中,定子 dq 轴参考电流 i_d^* 、 i_q^* 通过坐标旋转反变换得到定子 abc 三相参考电流 i_{abc}^* ,并采用滞环比较器将其与定子 abc 三相实际电流 i_{abc} 进行比较,随后输出开关状态信号。

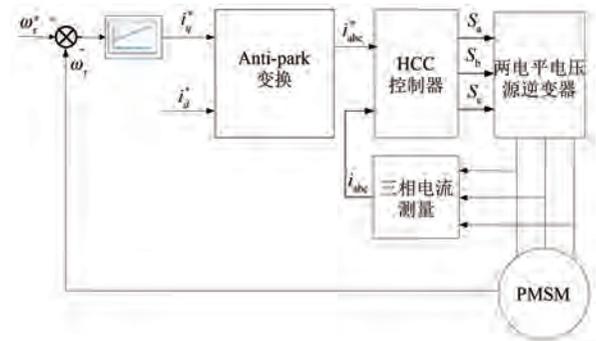


图 1 基于 HCC 的 PMSM 矢量控制

Fig. 1 The vector control for PMSM based on HCC

基于 Matlab 平台,建立 HCC 的 PMSM 矢量控制系统离散仿真模型,采样周期设置为 $50 \mu\text{s}$ 。设置转速环参数 $K_p=0.03$ 、 $K_I=1.1$,电流滞环宽度为 0.2 A 。仿真条件设置为:直流母线电压 $U_{dc}=24 \text{ V}$;初始参考转速为 1000 r/min , 5 s 时阶跃为 -1000 r/min ;初始负载转矩为 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$, 2.5 s 时阶跃至 $-0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$, 7.5 s 时阶跃至 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$;仿真总时长为 10 s 。仿真用 PMSM 参数如表 1 所示,仿真结果如图 2~3 所示。

表 1 仿真用 PMSM 参数

Tab. 1 The parameters of PMSM used in simulation

参数名称	参数值
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	3 000
额定转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	0.2
额定功率/W	64
定子电感/ μH	300
定子电阻/ Ω	0.63
永磁体磁链/Wb	0.008 3
电机极对数	4

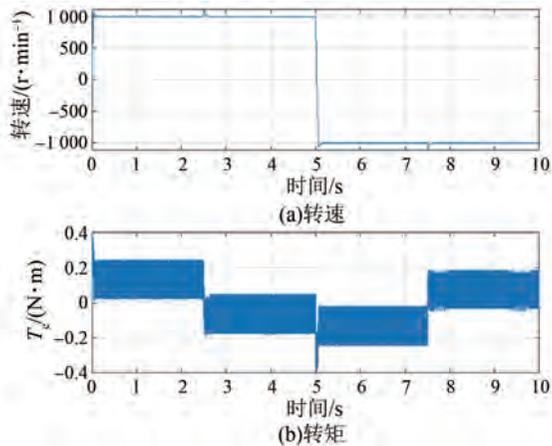


图 2 基于 HCC 矢量控制下 PMSM 的转速和转矩
Fig. 2 Speed and torque of PMSM based on HCC vector control

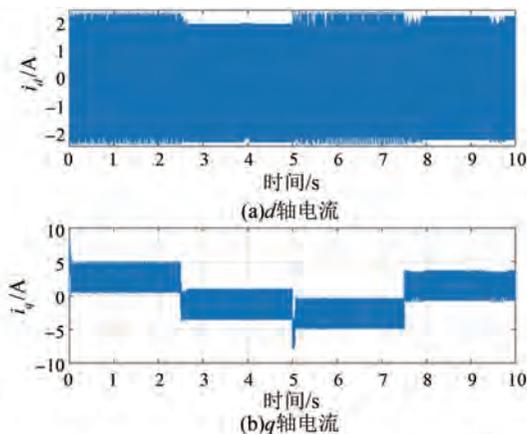


图 3 基于 HCC 矢量控制下 PMSM 的 i_{dq}
Fig. 3 i_{dq} of PMSM based on HCC vector control

1.2 基于 PI 控制的矢量控制

基于 PI 控制的 PMSM 矢量控制系统框图如图 4 所示。图中, i_{abc} 通过坐标旋转变换得到 i_d, i_q , 其与 i_d^*, i_q^* 求差可得到定子 dq 轴电流误差。通过 PI

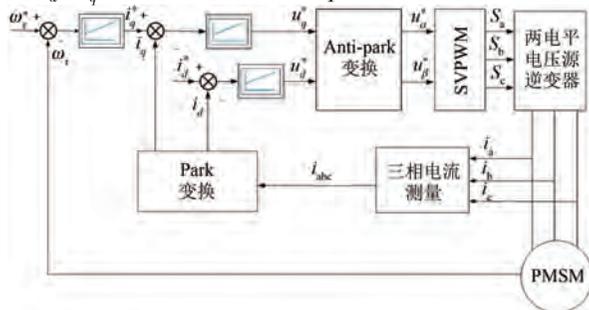


图 4 基于 PI 控制的 PMSM 矢量控制
Fig. 4 The vector control for PMSM based on PI control

控制器输出定子 dq 轴参考电压 u_d^*, u_q^* , 并通过坐标旋转反变换得到静止坐标系的定子参考电压 u_α^*, u_β^* , 最终由 SVPWM 模块生成理想电压矢量, 驱动逆变器输出。

基于 Matlab 平台, 建立 PI 控制的 PMSM 矢量控制系统离散仿真模型, dq 轴电流环 PI 控制器参数设置为 $K_p=0.377, K_i=791.68$, 其余仿真条件与上文相同。仿真结果如图 5~6 所示。

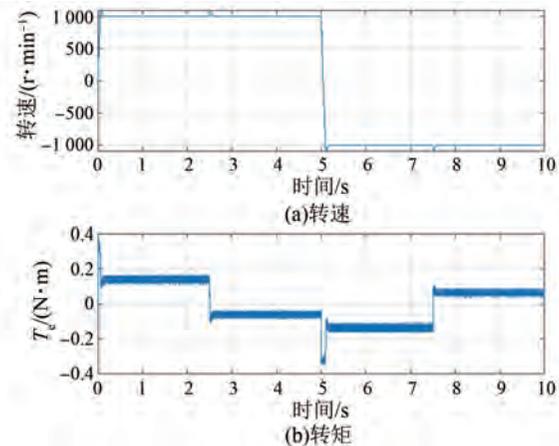


图 5 基于 PI 矢量控制下 PMSM 的转速和转矩
Fig. 5 Speed and torque of PMSM based on PI vector control

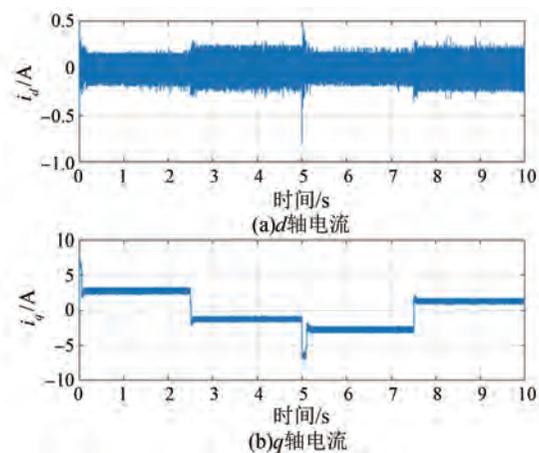


图 6 基于 PI 矢量控制下 PMSM 的 i_{dq}
Fig. 6 i_{dq} of PMSM based on PI vector control

1.3 基于 SMC 的矢量控制

基于 SMC 的 PMSM 矢量控制系统框图如图 7 所示。图中, 采用 SMC 代替 PI 控制生成 u_α^*, u_β^* 。

以定子 q 轴电流滑模控制器为例, 说明滑模控制器设计过程。选取 PMSM 系统的状态变量如式 (3) 所示:

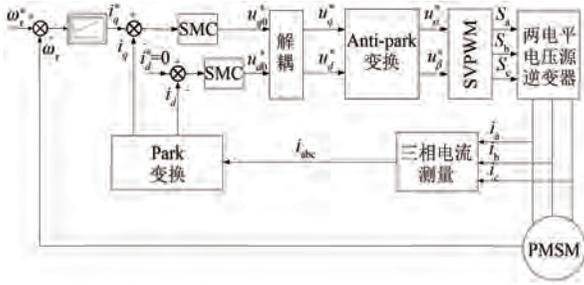


图7 基于 SMC 的 PMSM 矢量控制

Fig. 7 The vector control for PMSM based on SMC

$$\begin{cases} x_1 = e_q = i_q^* - i_q \\ x_2 = \dot{e}_q = -\dot{i}_q \end{cases} \quad (3)$$

定义滑模面函数如式(4)所示:

$$s_q = c_q x_1 + x_2 = c_q e_q + \dot{e}_q \quad (4)$$

式中: $c_q > 0$ 为系数。

对式(4)求一阶导数, 可得:

$$\dot{s}_q = c_q \dot{e}_q + \ddot{e}_q \quad (5)$$

采用指数趋近律 SMC 函数, 定子 q 轴电流滑模控制器可设计为

$$u_{q0} = L_q \int_0^t \left[\left(\frac{R_s}{L_q} - c_q \right) \dot{i}_q + \varepsilon_q \operatorname{sgn}(s_q) + \lambda_q s_q \right] dt \quad (6)$$

式中: ε_q, λ_q 为系数。

q 轴电流滑模控制器稳定性证明如下。

根据李雅普诺夫稳定性判据, 选取李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} s_q^2 (s_q \neq 0) \quad (7)$$

滑模控制器稳定的条件如式(8)所示:

$$\begin{aligned} \dot{V} = s_q \dot{s}_q = -s_q [\varepsilon_q \operatorname{sgn}(s_q) + \lambda_q s_q] = \\ -\varepsilon_q s_q \operatorname{sgn}(s_q) - \lambda_q s_q^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

由于 $s_q \operatorname{sgn}(s_q) \geq 0$ 且 $s_q^2 \geq 0$, 则 $\varepsilon_q > 0, \lambda_q > 0$, 令 $\dot{V} \leq 0$, 即系统渐进稳定。

同理, 定子 d 轴电流滑模控制器可设计为

$$u_{d0} = L_d \int_0^t \left[\left(\frac{R}{L_d} - c_d \right) \dot{i}_d + \varepsilon_d \operatorname{sgn}(s_d) + \lambda_d s_d \right] dt \quad (9)$$

式中: $c_d, \varepsilon_d, \lambda_d$ 为系数。

基于 Matlab 平台, 建立基于 SMC 的 PMSM 矢量控制系统离散仿真模型, dq 轴电流环滑模控制器参数设置为 $c_d = c_q = 400, \varepsilon_d = \varepsilon_q = 100, \lambda_d = \lambda_q = 5000$, 其余仿真条件与上文相同。仿真结果如图

8~9 所示。

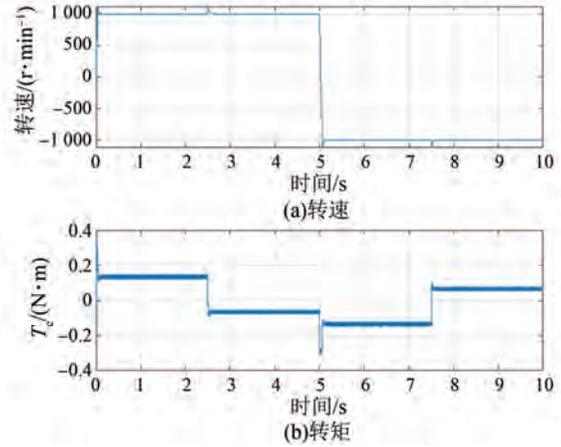
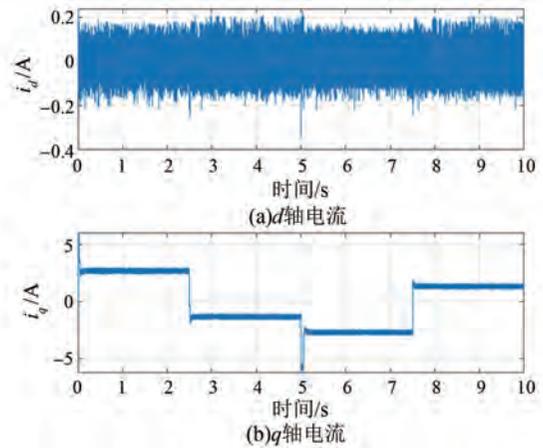


图8 基于 SMC 矢量控制下 PMSM 的转速和转矩

Fig. 8 Speed and torque of PMSM based on SMC vector control

图9 基于 SMC 矢量控制下 PMSM 的 i_{dq} Fig. 9 i_{dq} of PMSM based on SMC vector control

2 MPCC

对式(1)进行一阶前向欧拉离散化, 可得定子 dq 轴电流预测模型, 如式(10)所示:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k) + \\ T_s \left[\frac{L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k) + \frac{1}{L_d} u_d(k) \right] \\ i_q(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k) - \\ T_s \left[\frac{L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k) + \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k) - \frac{1}{L_q} u_q(k) \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中: $i_d(k)$ 和 $i_q(k)$ 、 $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$ 分别为定子 dq 轴电流当前时刻实际值、下一时刻预测值; $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 分别为当前时刻施加电压矢量的 dq 轴分量; $\omega_e(k)$ 为当前时刻转子电角速度; T_s 为采样周期。

MPCC 遍历逆变器所有的电压矢量, 并将其代入至电流预测模型中计算得到下一时刻的预测电流, 并选择成本函数最小的电压矢量作为最优电压矢量。

两电平电压源逆变器共有 8 个开关状态, 对应 6 个非零电压矢量和 1 个零电压矢量, 如式

(11) 所示, 其中零电压矢量由开关次数最小原则确定开关状态 111 或 000^[27]。

$$V_s \in \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (11)$$

MPCC 的成本函数如式 (12) 所示。由于采样时间很短, 近似认为当前时刻的参考值与下一时刻的参考值相同^[28]。

$$g = [i_d(k+1) - i_d^*(k)]^2 + [i_q(k+1) - i_q^*(k)]^2 \quad (12)$$

式中: $i_d^*(k)$ 、 $i_q^*(k)$ 分别为定子 dq 轴电流当前时刻参考值。

PMSM MPCC 系统框图如图 10 所示。

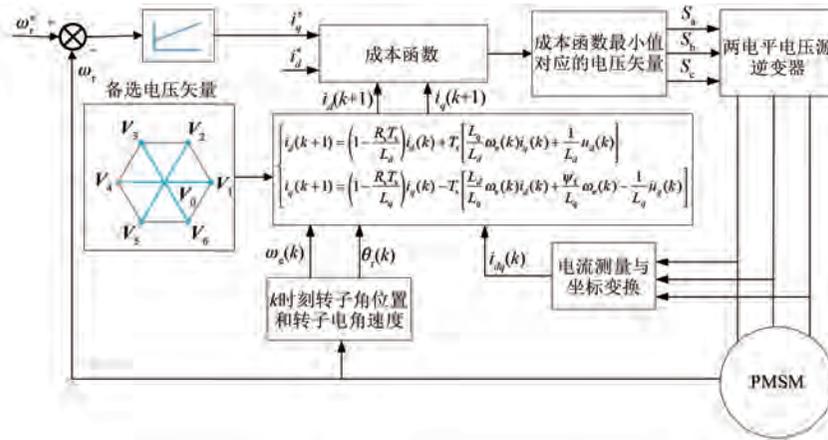


图 10 PMSM MPCC

Fig. 10 The MPCC for PMSM

基于 Matlab 平台, 建立基于 MPCC 的 PMSM 系统离散仿真模型, 仿真条件与上文相同。仿真结果如图 11~12 所示。

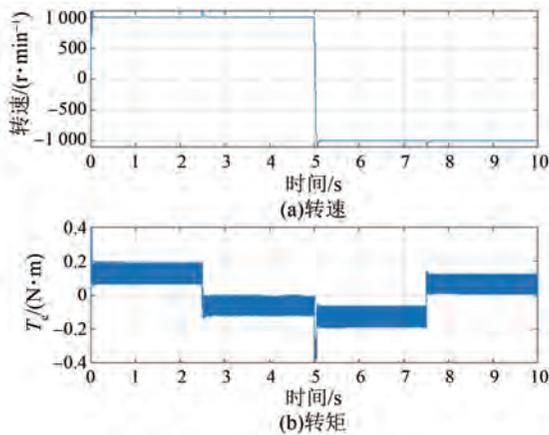


图 11 基于 MPCC 下 PMSM 的转速和转矩

Fig. 11 Speed and torque of PMSM based on MPCC

3 DBCC

由 DBCC 原理可知, 下一时刻定子 dq 轴电流

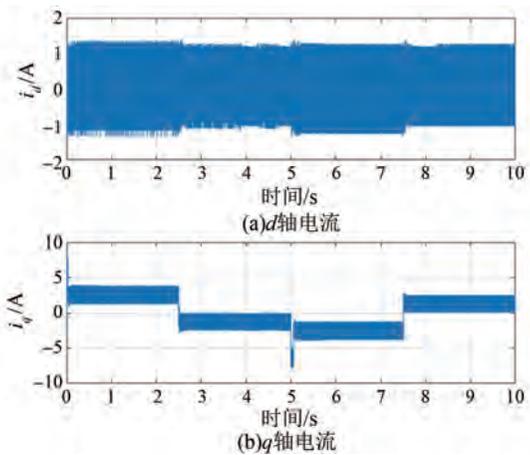


图 12 基于 MPCC 下 PMSM 的 i_{dq}

Fig. 12 i_{dq} of PMSM based on MPCC

如式 (13) 所示:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = i_d^*(k+1) \approx i_d^*(k) \\ i_q(k+1) = i_q^*(k+1) \approx i_q^*(k) \end{cases} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (10), 则可反向求解计算得到满足 DBCC 的定子 dq 轴参考电压, 如式 (14) 所示:

$$\begin{cases} u_d^*(k) = \frac{L_d}{T_s} [i_d^*(k) - i_d(k)] + \\ R_s i_d(k) - \omega_e(k) L_q i_q(k) \\ u_q^*(k) = \frac{L_q}{T_s} [i_q^*(k) - i_q(k)] + \\ R_s i_q(k) + \omega_e(k) L_d i_d(k) + \omega_e(k) \psi_f \end{cases} \quad (14)$$

通过坐标旋转反变换得到静止坐标系的定子参考电压, 最终由 SVPWM 模块生成理想电压矢量。基于 DBCC 的 PMSM 系统框图如图 13 所示。基于 Matlab 平台, 建立基于 DBCC 的 PMSM 系统离散仿真模型, 仿真条件与上文相同。仿真结果如图 14~15 所示。

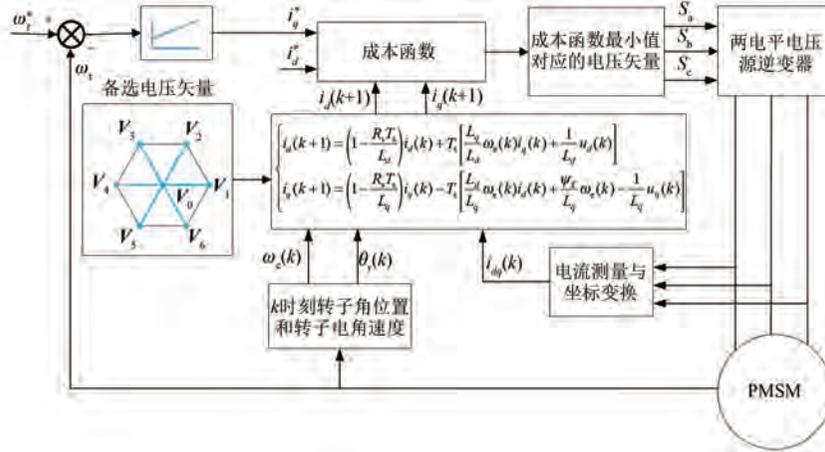


图 13 PMSM DBCC

Fig. 13 The DBCC for PMSM

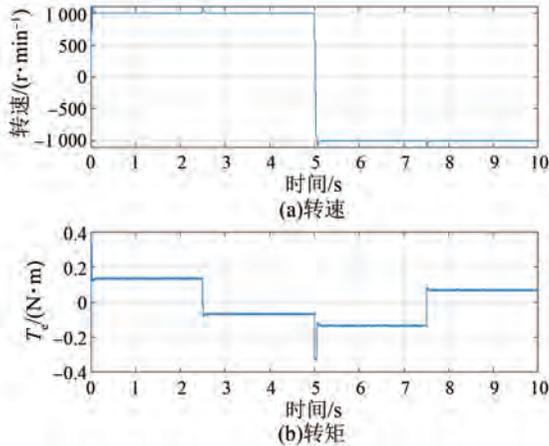


图 14 基于 DBCC 下 PMSM 的转速和转矩

Fig. 14 Speed and torque of PMSM based on DBCC

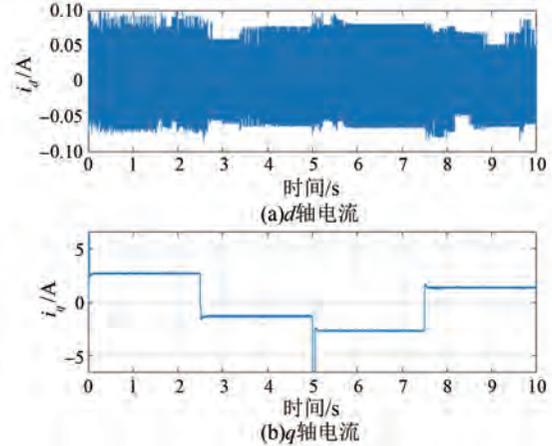


图 15 基于 DBCC 下 PMSM 的 i_{dq}

Fig. 15 i_{dq} of PMSM based on DBCC

4 试验验证

基于电机对拖试验台架对上述控制策略进行试验验证, 试验平台如图 16 所示, 主要由被测电机、负载电机和驱动器组成。其中, 被测电机和负载电机参数均与仿真电机参数一致, 试验条件及控制策略也均与仿真一致。负载电机采用电流单闭环的矢量控制进行动态加载, 被测电机和负载电机的控制芯片均为

STM32G431CBU6, 逆变器芯片为 Infineon BSC0702LS MOSFET, 栅极驱动芯片为 TI DRV8301, 电流传感器使用 TI INA240A2PWR, 采样频率设置为 20 kHz, 死区时间设置为 500 ns。控制器经串口将被测电机的转速和 dq 轴电流信号实时发送并存储至上位机。

4.1 基于 HCC 的矢量控制

基于 HCC 矢量控制下 PMSM 的试验波形如图 17~18 所示。



图 16 PMSM 对拖试验平台

Fig. 16 Dragging experimental platform for PMSM

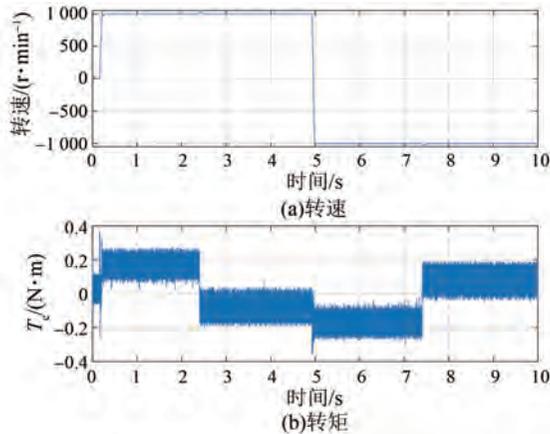


图 17 基于 HCC 矢量控制下 PMSM 的转速和转矩试验波形

Fig. 17 Experimental waveforms of speed and torque of PMSM based on HCC vector control

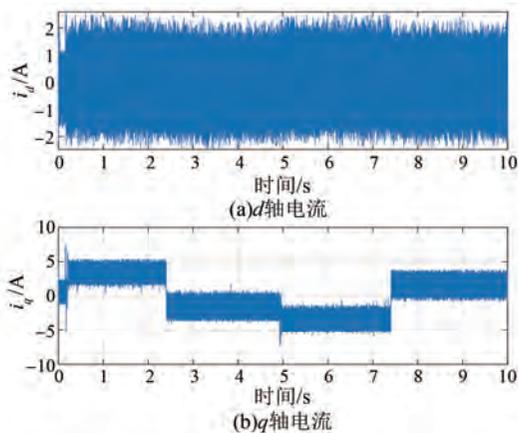


图 18 基于 HCC 矢量控制下 PMSM 的 i_{dq} 试验波形

Fig. 18 Experimental waveforms of i_{dq} of PMSM based on HCC vector control

4.2 基于 PI 控制的矢量控制

基于 PI 矢量控制下 PMSM 的试验波形如图 19~20 所示。

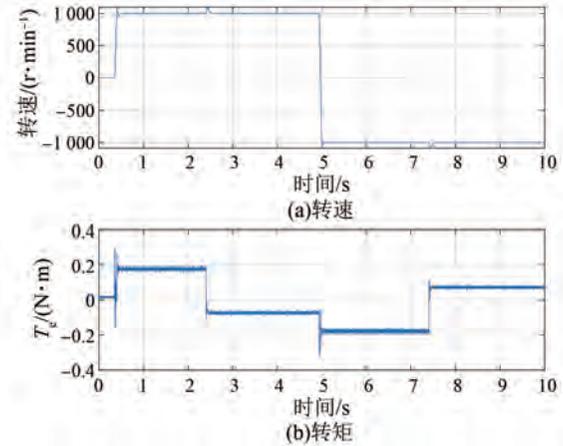


图 19 基于 PI 矢量控制下 PMSM 的转速和转矩试验波形

Fig. 19 Experimental waveforms of speed and torque of PMSM based on PI vector control

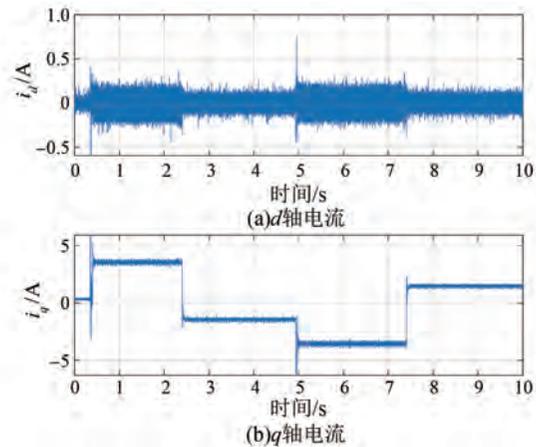


图 20 基于 PI 矢量控制下 PMSM 的 i_{dq} 试验波形

Fig. 20 Experimental waveforms of i_{dq} of PMSM based on PI vector control

4.3 基于 SMC 的矢量控制

基于 SMC 矢量控制下 PMSM 的试验波形如图 21~22 所示。

4.4 MPCC

基于 MPCC 下 PMSM 的试验波形如图 23~24 所示。

4.5 DBCC

基于 DBCC 下 PMSM 的试验波形如图 25~26 所示。

5 对比分析

定义定子 dq 轴电流脉动均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 如式 (15) 和式 (16) 所示:

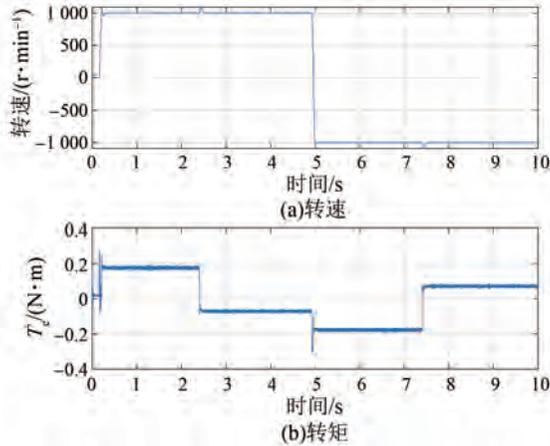


图 21 基于 SMC 矢量控制下 PMSM 的转速和转矩试验波形

Fig. 21 Experimental waveforms of speed and torque of PMSM based on SMC vector control

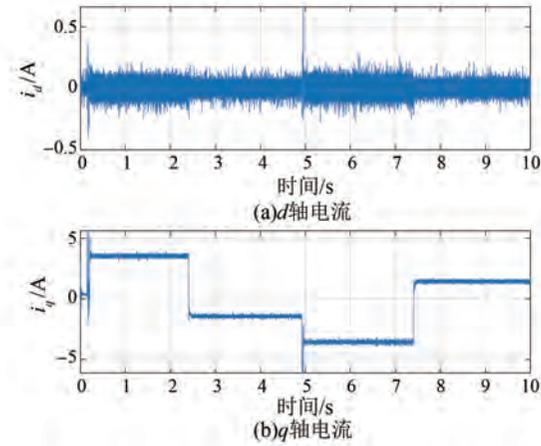


图 22 基于 SMC 矢量控制下 PMSM 的 i_{dq} 试验波形

Fig. 22 Experimental waveforms of i_{dq} of PMSM based on SMC vector control

$$i_{d_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (i_d - i_d^*)^2}{N}} \quad (15)$$

$$i_{q_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (i_q - i_q^*)^2}{N}} \quad (16)$$

式中: N 为采样个数。

相同条件不同电流控制策略下,定子 dq 轴电流脉动 RMSE 如表 2 所示。

由表 2 可知,HCC 性能最差,其次为 MPCC,PI 控制居中,SMC 与 DBCC 性能最优,两者基本相当。这是因为 HCC 和 MPCC 两者均未进行占

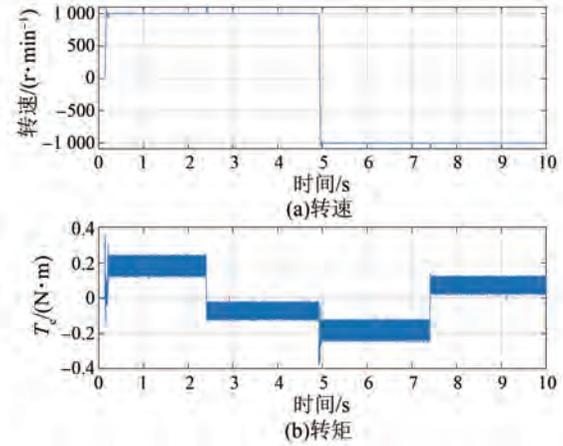


图 23 基于 MPCC 下 PMSM 的转速和转矩试验波形

Fig. 23 Experimental waveforms of speed and torque of PMSM based on MPCC

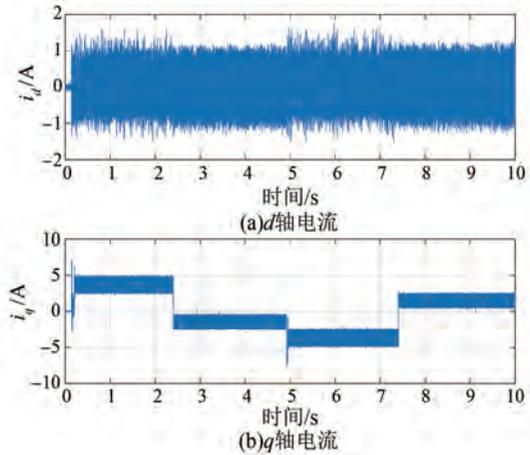


图 24 基于 MPCC 下 PMSM 的 i_{dq} 试验波形

Fig. 24 Experimental waveforms of i_{dq} of PMSM based on MPCC

空比调制,施加电压矢量作用整个采样周期,产生较大的电流脉动。

在 HCC 与 MPCC 并行运行的对比试验中,MPCC 仅用于电压矢量选择分析,不实际控制电机。统计结果显示,两者选择相同电压矢量的概率为 43.41%。表 3 进一步列出了 HCC 所选矢量在 MPCC 排序中的占比情况。

由表 3 可知,HCC 可正确减小电流误差,但并不一定选择最优电压矢量;MPCC 选择最优电压矢量,但其并不一定正确减小电流误差,这与直接转矩控制和模型预测转矩控制相同^[29]。

不同电流控制策略的实时运行时间如表 4 所示。

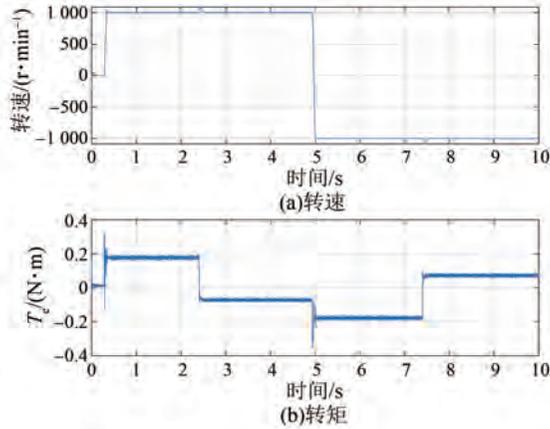


图 25 基于 DBCC 下 PMSM 的转速和转矩试验波形

Fig. 25 Experimental waveforms of speed and torque of PMSM based on DBCC

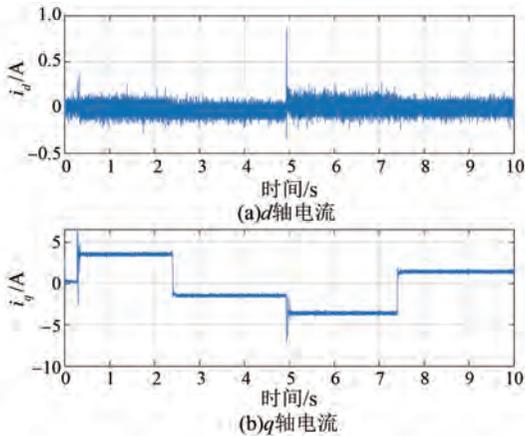


图 26 基于 DBCC 下 PMSM 的 i_{dq} 试验波形

Fig. 26 Experimental waveforms of i_{dq} of PMSM based on DBCC

表 2 定子 i_{dq} 脉动 RMSE

Tab. 2 Stator i_{dq} ripple RMSE

控制策略		i_{d_RMSE}/A	i_{q_RMSE}/A
HCC	仿真	0.995 7	1.129 0
	试验	1.000 6	1.018 7
PI 控制	仿真	0.096 7	0.265 7
	试验	0.088 5	0.109 4
SMC	仿真	0.060 3	0.134 0
	试验	0.048 3	0.090 0
MPCC	仿真	0.579 6	0.712 0
	试验	0.490 3	0.644 1
DBCC	仿真	0.078 1	0.098 3
	试验	0.046 0	0.068 3

表 3 电压矢量占比

Tab. 3 Occupy of voltage vector

参数值	电压矢量占比/%
1 st	43.41
2 nd	32.00
3 rd	14.86
4 th	4.87
5 th	2.74
6 th	1.25
7 th	0.87

表 4 电流控制策略实时运行时间

Tab. 4 Runing time of control strategies

控制策略	运行时间/ μs
HCC	11.64
PI 控制	12.43
SMC	12.85
MPCC	13.28
DBCC	11.33

由表 4 可知, DBCC 实时性最好, HCC 次之, PI 控制和 SMC 相当, MPCC 实时性最差。

为了比较不同电流控制策略的动态性能, 上述五种电流控制策略在负载突变时的速度响应曲线如图 27 所示。

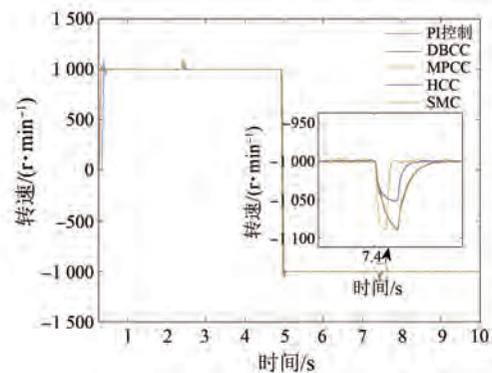


图 27 不同控制策略下的速度响应曲线

Fig. 27 Speed response curves under different control strategies

由图 27 可知, 在转速跌落方面, HCC 最小, 为 50 r/min, 其余四种控制策略转速跌落基本相当。在恢复时间方面, MPCC 达到稳定状态所需时间最短, HCC 次之, 其余三种控制策略所需时间基本相当。

6 结语

综合对比 PMSM 五种电流控制策略, 可得 SVPWM 的 DBCC 性能最优, 理论可实现零误差, 且实时性最佳。HCC 动态响应快, 负载突变时转速跌落最小, 但电流脉动较大; MPCC 恢复时间最短, 但实时性最弱。PI 与 SMC 控制性能居中, 设计复杂度较高。整体而言, DBCC 在精度与速度之间取得最佳平衡, 综合优势显著。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李耀华负责论文核心思想, 王钦政和李明睿共同完成仿真编程工作, 李岩松、李欣睿、雷济瑀、王宇辰和许浩参与了论文撰写, 丁红对全文进行了校核。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The core idea of the paper was proposed by Li Yaohua. The simulation programming was jointly completed by Wang Qinzheng and Li Mingrui. The paper was written by Li Yansong, Li Xinrui, Lei Jiyu, Wang Yuchen, and Xu Hao. The final manuscript was proofread by Ding Hong. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] Sadegh V Z. Control of permanent magnet synchronous motors [M]. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [2] Cai W, Wu X G, Zhou M H, et al. Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles [J]. Automotive Innovation, 2021, 4(1): 3-22.
- [3] 林程, 徐垚, 张虹, 等. 车用 PMSM 无位置传感器控制的瞬态性能提升方法 [J]. 汽车工程, 2025, 47(5): 875-887.
- Lin C, Xu Y, Zhang H, et al. Transient performance enhancement method for position sensorless control for automotive PMSMs [J]. Automotive Engineering, 2025, 47(5): 875-887.
- [4] 冯江华. 轨道交通永磁电机牵引系统关键技术及发展趋势 [J]. 机车电传动, 2018(6): 9-17.
- Feng J H. Key technology and development trend of permanent magnet motor traction system for rail transit [J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(6): 9-17.
- [5] Liu C H, Luo Y X. Overview of advanced control strategies for electric machines [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 3(2): 53-61.
- [6] 李耀华, 吴俊, 郭巧娟, 等. 永磁同步电机矢量控制的两种实现方法比较 [J]. 微电机, 2012, 45(1): 25-28.
- Li Y H, Wu J, Guo Q J, et al. Comparison of two ways to implement the FOC for PMSM [J]. Micromotors, 2012, 45(1): 25-28.
- [7] Yao H, Yan Y, Shi T N, et al. A novel SVPWM scheme for field-oriented vector-controlled PMSM drive system fed by cascaded H-bridge inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8988-9000.
- [8] 李耀华, 王自臣, 何雨颀, 等. 基于超螺旋滑模控制的永磁同步电机磁场定向控制研究 [J]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 527-539.
- Li Y H, Wang Z C, He Y X, et al. Field-oriented control of permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode control [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 527-539.
- [9] 邱腾飞, 白龙, 王晓帆. 轨道交通车辆永磁牵引控制技术研究 [J]. 电力电子技术, 2025, 59(10): 126-130.
- Qiu T F, Bai L, Wang X F. Research on permanent magnet traction control technology for rail transit vehicles [J]. Power Electronics, 2025, 59(10): 126-130.
- [10] 张寿鹤, 白锐. 基于硬件在环系统的永磁同步电机控制算法 [J]. 控制工程, 2025, 32(11): 2087-2095.
- Zhang S H, Bai R. Control of permanent magnet synchronous motor based on hardware in loop control [J]. Control Engineering of China, 2025, 32(11): 2087-2095.
- [11] 丁承君, 王宇坤. 永磁同步电机改进超螺旋滑模观测器矢量控制 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25

- (16): 6774-6780.
- Ding C J, Wang Y K. Improved super-twisting sliding mode observer vector control for PMSM [J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(16): 6774-6780.
- [12] Rodriguez J, Garica C, Mora A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives—Part I: Basic concepts and advanced strategies [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(4): 3927-3942.
- [13] Rodriguez J, Garica C, Mora A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives—Part II: Applications and benchmarking with classical control methods [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(5): 5047-5061.
- [14] 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.
- Zhu R, Wu D, Chen J F, et al. A review on research on motor system model predictive control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(8): 1-10.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李耀华, 种国臣, 郭伟超, 等. 永磁同步电机两步模型预测电流控制精简控制集研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(5): 540-550.
- Li Y H, Chong G C, Guo W C, et al. Research on streamlined control sets for two-step model predictive current control in permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(5): 540-550.
- [18] 李耀华, 高赛, 郭伟超, 等. 永基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机有限状态集 MPC [J]. *微特电机*, 2025, 53(12): 47-53.
- Li Y H, Gao S, Guo W C, et al. Research on the multi-step model predictive current control for PMSM [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2025, 53(12): 47-53.
- [19] 李耀华, 郭伟超, 种国臣, 等. 基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机有限状态集 MPC [J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(6): 596-607.
- Li Y H, Guo W C, Chong G C, et al. The FCS-MPC for PMSM based on MRAS parameter identification [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(6): 596-607.
- [20] 徐海, 米彦青, 王艳阳, 等. 带有参数在线辨识的永磁同步电机模型预测控制研究[J]. *电气传动*, 2025, 55(2): 3-12.
- Xu H, Mi Y Q, Wang Y Y, et al. Model predictive control study of permanent magnet synchronous motor with parameters online identification [J]. *Electric Drive*, 2025, 55(2): 3-12.
- [21] 张懿, 徐斌, 魏海峰, 等. 新型模型参考自适应的 PMSM 无差拍电流预测控制[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(9): 157-167.
- Zhang Y, Xu B, Wei H F, et al. New model reference adaptive deadbeat predictive current control of PMSM [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(9): 157-167.
- [22] 徐红运, 郭凯凯. 基于增强型 LESO 的无差拍电流预测控制系统研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(2): 210-220.
- Xu H Y, Guo K K. Research on deadbeat predictive current control system based on enhanced LESO [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(2): 210-220.
- [23] 刘建强, 郝文瑾, 陈爱峰, 等. 永磁同步电机无差拍预测电流控制策略研究[J]. *铁道学报*, 2021, 43(8): 62-72.
- Liu J Q, Hao W J, Chen A F, et al. Research on deadbeat predictive current control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(8): 62-72.
- [24] 孙静, 刘旭东. 基于无差拍预测控制和扰动观测器的永磁同步电机电流控制[J]. *电机与控制应用*, 2017, 44(10): 25-28.
- Sun J, Liu X D. Deadbeat predictive current control

- of permanent magnet synchronous motor based on disturbance observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2017, 44(10): 25-28.
- [25] 徐睿琦, 张昆鹏, 林欣魄, 等. 基于高阶滑模观测器的永磁同步电机无差拍预测电流控制[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(11): 1990-1998.
Xu R Q, Zhang K P, Lin X P, et al. Deadbeat predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on higher order sliding mode observer [J]. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(11): 1990-1998.
- [26] 曲星宇, 闫盛硕, 彭成坤, 等. 改进增量式无差拍电流预测的永磁同步电机控制研究[J]. *电机与控制学报*, 2025, 29(10): 116-126.
Qu X Y, Yan S S, Peng C K, et al. Research on improved incremental deadbeat current predictive control for PMSM [J]. *Electric Machines and Control*, 2025, 29(10): 116-126.
- [27] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞, 等. 自适应变电压矢量PMSM直接转矩控制开关表[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(9): 75-83.
Li Y H, Yang Q D, Qu Y F, et al. Adaptive variable voltage vectors switching table in direct torque control for PMSM [J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(9): 75-83.
- [28] Rodriguez J, Cortes P. *Predictive control of power converters and electrical drives* [M]. Hoboken, New Jersey: Wiley Press, 2012.
- [29] 李耀华, 刘子焜, 刘东梅, 等. 永磁同步电机直接转矩控制与模型预测转矩控制比较研究[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(7): 18-24.
Li Y H, Liu Z K, Liu D M, et al. Comparison between DTC and MPTC for PMSM [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(7): 18-24.

收稿日期:2025-06-19

收到修改稿日期:2025-09-23

作者简介:

李耀华(1980—),男,博士,副教授,研究方向为电机电控与新能源汽车技术,nuaaliyaohua@126.com;

*通信作者:李耀华(1980—),男,博士,副教授,研究方向为电机电控与新能源汽车技术,nuaaliyaohua@126.com。