

模糊占空比调制永磁同步电机模型预测转矩控制*

李耀华, 邓益志, 张鑫泉, 童瑞齐, 丁红, 郭伟超, 王钦政
(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 传统模型预测转矩控制(MPTC)电压矢量作用于整个采样周期,会造成较大的磁链和转矩脉动。因此,提出模糊占空比调制永磁同步电机 MPTC,采用 MPTC 选择施加的电压矢量,采用模糊控制确定电压矢量占空比。仿真表明模糊占空比调制 MPTC 系统运行良好。与传统 MPTC、磁链和转矩无差拍模型预测控制以及磁链和转矩无差拍控制占空比调制相比,模糊占空比调制 MPTC 可减小稳态转矩脉动均方根误差(RMSE)、磁链脉动 RMSE 均值及定子电流总谐波失真(THD)。由于降低了磁链和转矩脉动,MPTC 更多地选择零电压矢量,因此虽然采用占空比调制,平均开关频率反而有所减小。

关键词: 永磁同步电机(PMSM); 模型预测转矩控制(MPTC); 占空比调制; 模糊控制; 无差拍控制
中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)06-0021-09
doi: 10.12177/emca.2023.050

Model Predictive Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Using Fuzzy Duty Cycle Modulation*

LI Yaohua, DENG Yizhi, ZHANG Xinquan, TONG Ruiqi, DING Hong,
GUO Weichao, WANG Qinzheng
(School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The voltage vector is applied for the whole sampling period in conventional model predictive torque control (MPTC), which causes large stator flux and torque ripple. Therefore, a MPTC system for permanent magnet synchronous motor (PMSM) using fuzzy duty cycle modulation is proposed. The MPTC is used to select the applying voltage vector and fuzzy control is used to determine duty cycle of the voltage vector. The simulation results show that the fuzzy duty cycle modulation MPTC system operates well. Compared with the conventional MPTC, flux and torque deadbeat model predictive control and flux and torque deadbeat control with duty cycle modulation, the MPTC using fuzzy duty cycle modulation can decrease steady-state root mean square error (RMSE) of torque ripple, mean RMSE of flux ripple and total harmonic distortion (THD) of stator current. Due to the decrease of flux and torque ripple, MPTC chooses zero voltage vector more, so the average switching frequency is reduced although duty cycle modulation is used.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive torque control (MPTC); duty cycle modulation; fuzzy control; deadbeat control

0 引言

有限状态集模型预测转矩控制(MPTC)将逆变器所有电压矢量遍历代入预测模型,计算得到

磁链和转矩未来时刻的预测值,并根据成本函数最小选择最优,在永磁同步电机领域受到关注^[1-3]。由于传统模型预测控制仅优化选择的电压矢量,并未优化施加电压矢量的作用时间,施加

收稿日期: 2023-02-02; 收到修改稿日期: 2023-02-17

* 基金项目: 西安市碑林区科技计划项目(GX2252)

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。

电压作用时间为固定采样周期,导致磁链和转矩脉动较大。文献[4-5]通过增加备选电压矢量来减小脉动,但增大了系统计算负担。文献[6-9]通过无差拍控制计算得到施加电压矢量的理想作用时间。文献[10]运用成本函数确定最佳占空比。文献[11]基于上一时刻和当前时刻的最优电压矢量及作用时间,优化采样周期占空比。以上研究可有效降低脉动,但存在计算复杂、参数依赖性强等问题。

模糊控制适用于难以精确量化的控制领域,无需精确模型,设计简单,鲁棒性强。文献[12-14]采用模糊控制取代直接转矩控制开关表来优化电压矢量的选择。文献[15-18]采用模糊控制对直接转矩控制选择的电压矢量作用时间进行优化。文献[19]采用模糊控制对模型预测电流控制选择的电压矢量作用时间进行优化。以上研究表明模糊控制可用于电压矢量占空比优化。本文建立模糊占空比调制永磁同步电机 MPTC 系统,采用 MPTC 选择施加的电压矢量,采用模糊控制优化调节电压矢量占空比,通过仿真验证模糊占空比调制 MPTC 的可行性和优越性。

1 永磁同步电机 MPTC

定子坐标系下,表贴式永磁同步电机定子磁链矢量与转矩预测模型如下所示,转矩角采用反解转矩方程获取^[20]:

$$\begin{cases} \psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \\ q = \frac{V_s \cdot T_s}{\psi_s(k)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T_e(k+1) &= \frac{3p\psi_f\psi_s(k+1)\psi_f}{2L_d}\sin\theta(k+1) = \\ &= \frac{3p\psi_f\psi_s(k)}{2L_d}\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \cdot \\ &\sin\left[\theta(k) + \arcsin\frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}}\right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ψ_s 、 T_e 和 θ 分别为定子磁链矢量幅值、转矩和转矩角; V_s 和 α 为施加电压矢量幅值和施加电压矢量与定子磁链矢量夹角; k 和 $k+1$ 表示当前和下一采样时刻。

两电平三相逆变器共有 7 个备选电压矢量,如式(3)所示,其中以开关次数最小原则确定零

电压矢量开关状态为 000 或 111。

$$V_s \in \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (3)$$

为消除权重系数,定义磁链变化率和转矩变化率 12 范数形式的成本函数如下所示:

$$g = \sqrt{\left[\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*}{\psi_s^*}\right]^2 + \left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*}\right]^2} \quad (4)$$

式中: ψ_s^* 和 T_e^* 为磁链和转矩的参考值。

永磁同步电机 MPTC 系统框图如图 1 所示,其中 $\theta_s(k)$ 为当前时刻定子磁链角位置。

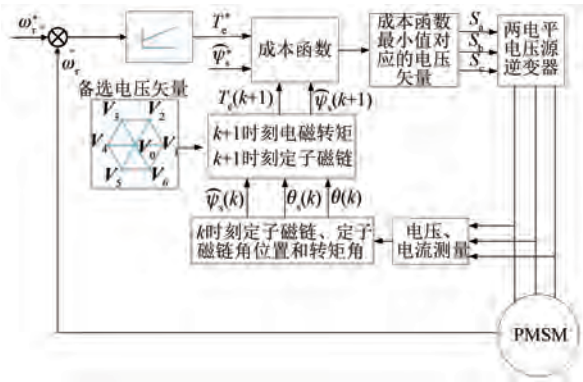


图 1 永磁同步电机 MPTC 系统

基于 MATLAB/Simulink 建立表贴式永磁同步电机 MPTC 离散仿真模型,采样频率为 20 kHz,直流母线电压为 312 V,参考转速初始值为 100 r/min,2 s 时阶跃至 -100 r/min,负载转矩初始值为 15 N·m,1 s 阶跃至 -15 N·m,3 s 阶跃至 15 N·m,仿真时长为 4 s。永磁同步电机 MPTC 仿真系统参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机 MPTC 系统仿真参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
d 轴电感 L_d/H	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
极对数 p	4
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.089
黏滞阻尼 $F/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.005
转速环 PI 调节器 K_p	50
转速环 PI 调节器 K_i	10
参考转矩上下限 $(\text{N}\cdot\text{m})$	$[-30, 30]$

永磁同步电机 MPTC 仿真波形如图 2~图 5 所示。

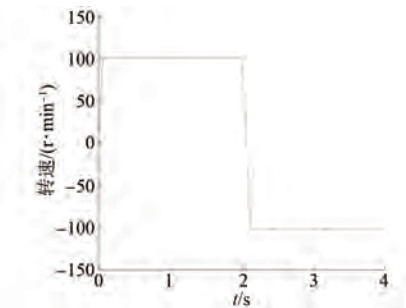


图 2 MPTC 电机转速

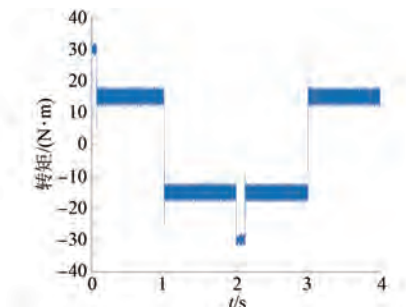


图 3 MPTC 电机转矩

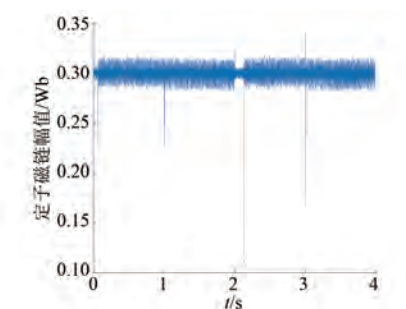


图 4 MPTC 定子磁链幅值

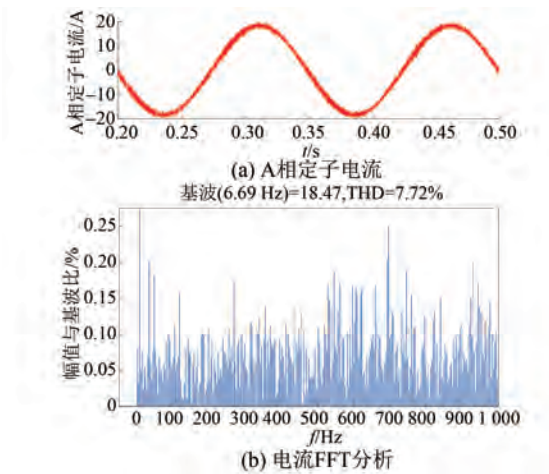


图 5 MPTC 电流 FFT

定义转矩脉动均方根误差 (RMSE)、磁链脉动 RMSE 和平均开关频率分别如下所示:

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \tag{5}$$

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \tag{6}$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \tag{7}$$

式中: n 为采样点数; $N_{switching}$ 为上下桥臂开关总次数; t 为仿真时长。

永磁同步电机 MPTC 系统控制性能如表 2 所示。

表 2 永磁同步电机 MPTC 系统控制性能

参数名称	0.2~ 1.0 s	1.2~ 2.0 s	2.2~ 3.0 s	3.2~ 4.0 s	平均
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	1.436 5	1.413 8	1.435 6	1.408 2	1.423 5
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.005 0	0.005 0	0.004 9	0.005 1	0.005 0
THD/%			7.72		
f_{ave}/kHz			5.62		

2 模糊占空比调制 MPTC

为减小磁链和转矩脉动,在不改变原 MPTC 的条件下,采用模糊控制器动态调节 MPTC 选择电压矢量的占空比,实现不同状态下施加电压矢量的作用时间的不同。永磁同步电机模糊占空比调制 MPTC 系统如图 6 所示。

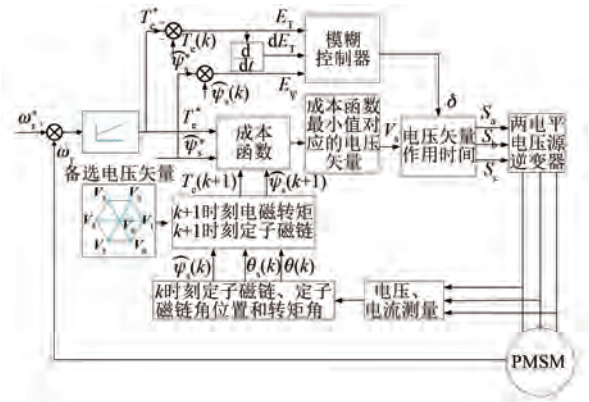


图 6 永磁同步电机模糊占空比调制 MPTC 系统

由图 6 可知,占空比模糊控制器的输入为转矩误差 E_T 、转矩误差变化率 dE_T 和磁链误差 E_ψ ,

输出为占空比 δ 。

转矩误差 E_T 模糊论域为 $[-0.5, 0.5]$ ，分为 $\{NB, NS, Z, PS, PB\}$ 5 个模糊子集，其隶属度函数如图 7 所示。

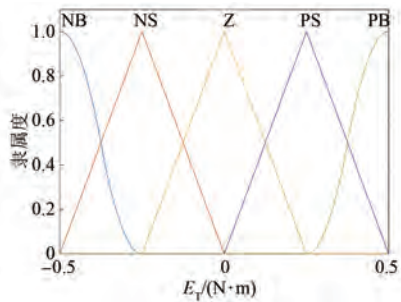


图 7 转矩误差隶属度函数

转矩误差变化率 dE_T 模糊论域为 $[-2, 2]$ ，分为 $\{NB, NS, Z, PS, PB\}$ 5 个模糊子集，其隶属度函数如图 8 所示。

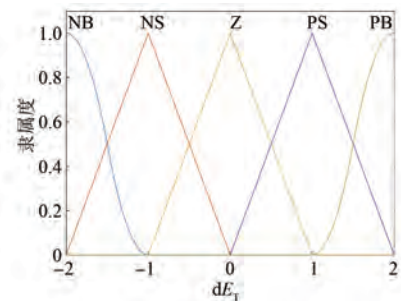


图 8 转矩误差变化率隶属度函数

磁链误差 E_ψ 模糊论域为 $[-0.01, 0.01]$ ，分为 $\{N, Z, P\}$ 3 个模糊子集，其隶属度函数如图 9 所示。

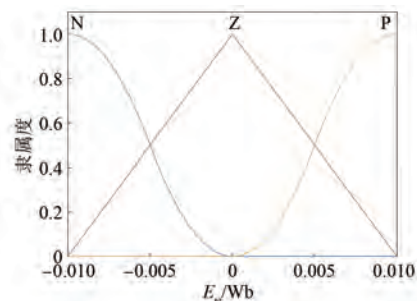


图 9 磁链误差隶属度函数

电压矢量占空比 δ 模糊论域为 $[0, 1]$ ，分为 $\{ZL, SL, ML, RL, VL\}$ 5 个模糊子集，其隶属度函数如图 10 所示。

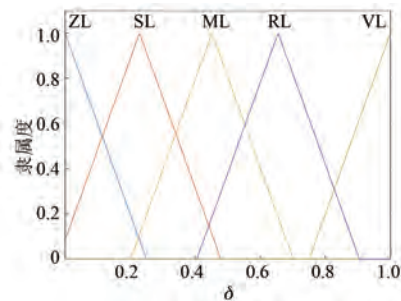


图 10 电压矢量占空比隶属度函数

当磁链误差为 N 或 P 时，模糊控制规则表如表 3 所示；当磁链误差为 Z 时，模糊控制规则表如表 4 所示。采用 Mamdani 型推理进行模糊推理，采用 max-min 取小法解模糊，取最大隶属度对应的输出量为输出电压矢量占空比 δ 。

表 3 模糊控制规则表(磁链误差为 N 或 P 时)

		转矩误差变化率 dE_T				
转 矩 误 差 E_T	NB	NB	NS	Z	PS	PB
	NB	VL	VL	VL	VL	VL
	NS	RL	ML	SL	SL	ML
	Z	ML	ML	ML	ML	ML
	PS	ML	ML	ML	ML	RL
	PB	VL	VL	VL	VL	VL

表 4 模糊控制规则表(磁链误差为 Z 时)

		转矩误差变化率 dE_T				
转 矩 误 差 E_T	NB	NB	NS	Z	PS	PB
	NB	VL	VL	VL	VL	VL
	NS	RL	ML	SL	SL	ML
	Z	ZL	ZL	ZL	ZL	ZL
	PS	ML	SL	SL	ML	RL
	PB	VL	VL	VL	VL	VL

相同仿真条件下，永磁同步电机模糊占空比调制 MPTC 系统仿真波形如图 11~图 14 所示。

模糊占空比调制 MPTC 系统控制性能如表 5 所示。

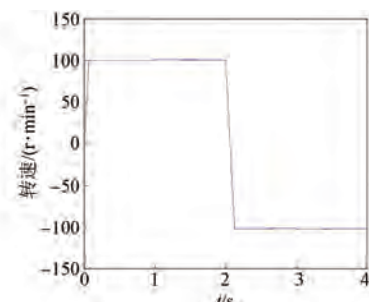


图 11 模糊占空比调制 MPTC 电机转速

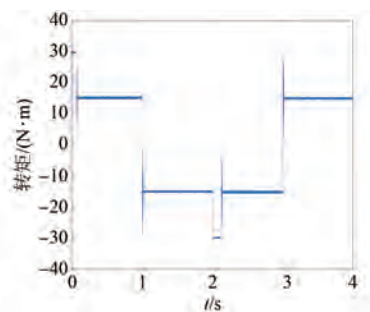


图 12 模糊占空比调制 MPTC 电机转矩

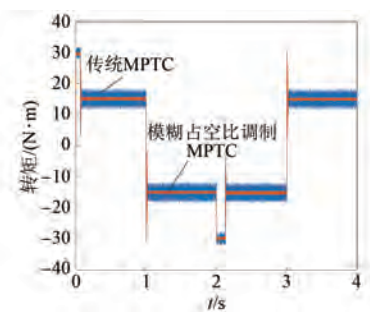


图 15 传统 MPTC 和模糊占空比调制 MPTC 电机转矩

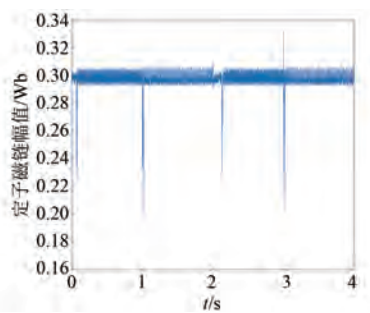


图 13 模糊占空比调制 MPTC 定子磁链幅值

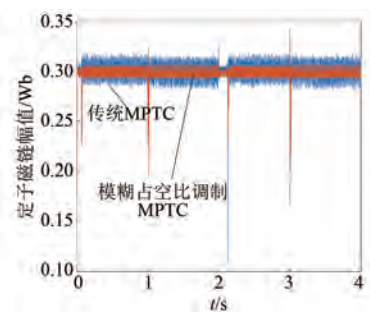


图 16 传统 MPTC 和模糊占空比调制 MPTC 定子磁链幅值

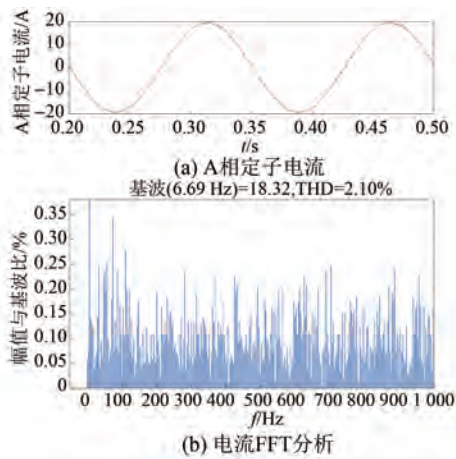


图 14 模糊占空比调制 MPTC 电流 FFT

表 5 模糊占空比调制 MPTC 系统控制性能

参数名称	0.2~ 1.0 s	1.2~ 2.0 s	2.2~ 3.0 s	3.2~ 4.0 s	平均
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	0.406 5	0.292 2	0.407 0	0.294 6	0.350 1
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.002 8	0.003 8	0.002 8	0.003 7	0.003 3
THD/%			2.10		
f_{ave}/kHz			3.26		

传统 MPTC 和模糊占空比调制 MPTC 的电机转矩和定子磁链幅值如图 15、图 16 所示。

由仿真结果可知,模糊占空比调制 MPTC 系统可实现四象限运行,电机运行良好。与传统

MPTC 相比,模糊占空比调制 MPTC 可显著降低转矩和磁链脉动、定子电流 THD 和平均开关频率,转矩脉动 RMSE 和磁链脉动 RMSE 平均值分别减小 75.41% 和 34.00%,定子电流 THD 减小 72.80%,平均开关频率减小 41.99%。

模糊占空比调制 MPTC 下,一个采样周期作用一个 MPTC 选择的电压矢量和一个零电压矢量,比传统 MPTC 多作用一个电压矢量,开关频率应有所增大。但如果 MPTC 选择为零电压矢量,此时一个采样周期实际也只施加零电压矢量,并未增加开关切换次数。由于施加零电压矢量对磁链和转矩的改变较小,当磁链或转矩误差较小时,MPTC 选择零电压矢量的概率较大^[21-22]。由上文可知,模糊占空比调制 MPTC 下,转矩和磁链脉动大幅降低,使零电压矢量使用率增大。经统计,传统 MPTC 系统共选择 16 013 次零电压矢量,占比为 20.02%。模糊占空比调制 MPTC 系统共选择 55 097 次零电压矢量,占比为 68.87%,共选择 14 078 次占空比为 1 的非零电压矢量,占比为 17.60%,仅有 10 826 个采样周期需施加 2 个电压矢量,占比为 13.53%。因此,虽然占空比调制一个采样周期作用 2 个电压矢量,但由于其减小了磁链和转矩脉动,增大了零电压矢量利用率,平均

开关频率反而降低。

为进一步比较模糊占空比调制 MPTC 性能,建立永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制^[23]。磁链和转矩无差拍控制可根据磁链和转矩误差计算得到理想电压矢量。在获得理想电压矢量后,采用 MPTC 选择距离理想电压矢量最近的基本电压矢量。模型预测控制采用 12 范数形式的成本函数,如下所示:

$$g = \sqrt{(V_{\alpha} - V_{\alpha}^*)^2 + (V_{\beta} - V_{\beta}^*)^2} \quad (8)$$

式中: $V_{\alpha\beta}$ 和 $V_{\alpha\beta}^*$ 为基本电压矢量和理想电压矢量在 α - β 静止坐标系的分量。

相同仿真条件下,永磁同步电机磁链和转矩无差拍模型预测控制(MPC)系统仿真波形如图 17~图 20 所示。

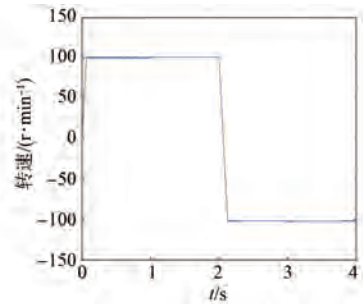


图 17 磁链和转矩无差拍 MPC 电机转速

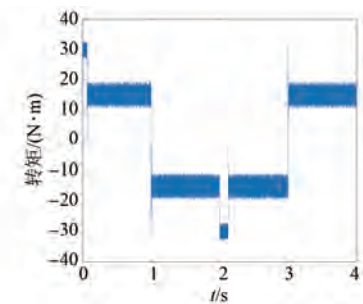


图 18 磁链和转矩无差拍 MPC 电机转矩

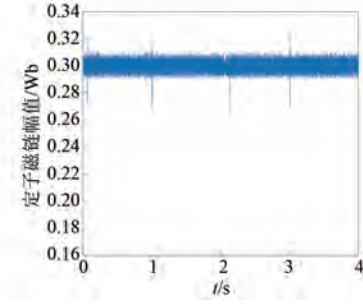


图 19 磁链和转矩无差拍 MPC 定子磁链幅值

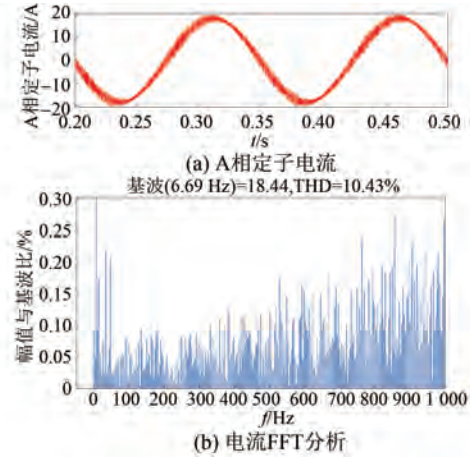


图 20 磁链和转矩无差拍 MPC 电流 FFT

磁链和转矩无差拍 MPC 系统控制性能如表 6 所示。

表 6 磁链和转矩无差拍 MPC 系统控制性能

参数名称	0.2~ 1.0 s	1.2~ 2.0 s	2.2~ 3.0 s	3.2~ 4.0 s	平均
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	2.144 0	2.128 5	2.141 6	2.124 7	2.134 7
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.003 7	0.003 7	0.003 7	0.003 7	0.003 7
THD/%			10.43		
f_{ave}/kHz			4.53		

磁链和转矩无差拍 MPC 和模糊占空比调制 MPTC 的电机转矩和定子磁链幅值如图 21、图 22 所示。

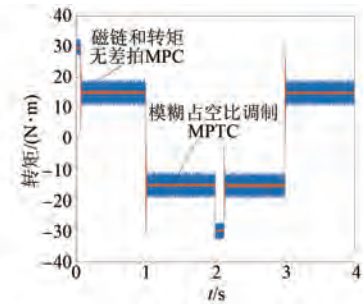


图 21 磁链和转矩无差拍 MPC 和模糊占空比调制 MPTC 电机转矩

由仿真结果可知,与磁链和转矩无差拍 MPC 相比,模糊占空比调制 MPTC 可显著降低转矩和磁链脉动、定子电流 THD 和平均开关频率,转矩脉动 RMSE 和磁链脉动 RMSE 平均值分别减小 83.60% 和 10.81%,定子电流 THD 减小 79.87%,

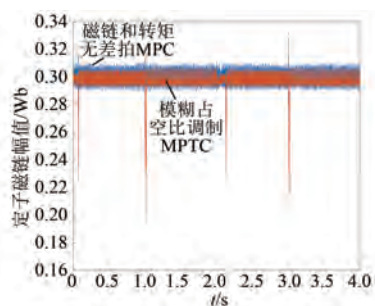


图 22 磁链和转矩无差拍 MPC 和模糊占空比调制 MPTC 定子磁链幅值

平均开关频率减小 28.03%。

在磁链和转矩无差拍 MPC 确定理想电压矢量后,也可采用空间矢量调制技术使用 2 个非零电压矢量和 1 个零电压矢量生成理想电压矢量,但一个周期需作用 3 个电压矢量,开关频率较高。为降低磁链和转矩无差拍 MPC 的磁链和转矩脉动,可对施加的基本电压矢量进行占空比调制,从而一个周期仅作用 1 个基本电压和 1 个零电压矢量。为简化计算,根据理想电压矢量的幅值来判断施加零电压矢量或非零电压矢量。如果理想电压矢量幅值小于 $U_{dc}/3$,则施加零电压矢量,否则施加非零电压矢量。若施加非零电压矢量,根据理想电压矢量角度选择具体施加的非零电压矢量,如下所示:

$$\begin{cases} V_s = V_1 & \text{if } -30^\circ \leq \angle V_s^* < 30^\circ \\ V_s = V_2 & \text{if } 30^\circ \leq \angle V_s^* < 90^\circ \\ V_s = V_3 & \text{if } 90^\circ \leq \angle V_s^* < 150^\circ \\ V_s = V_4 & \text{if } 150^\circ \leq \angle V_s^* < 210^\circ \\ V_s = V_5 & \text{if } 210^\circ \leq \angle V_s^* < 270^\circ \\ V_s = V_6 & \text{if } 270^\circ \leq \angle V_s^* < 330^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\angle V_s^*$ 为理想电压矢量在静止 $\alpha\beta$ 坐标系的角度。

施加非零电压矢量占空比 δ 如下所示:

$$\begin{cases} \delta = \frac{3\hat{V}_s^*}{2U_{dc}} & \text{if } \hat{V}_s^* \leq \frac{2}{3}U_{dc} \\ \delta = 1 & \text{if } \hat{V}_s^* > \frac{2}{3}U_{dc} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\hat{V}_s^*$ 为理想电压矢量幅值。

相同仿真条件下,永磁同步电机磁链和转矩

无差拍控制占空比调制系统仿真波形如图 23~图 26 所示。

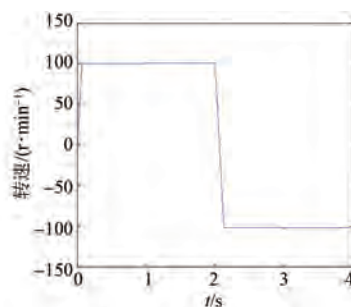


图 23 磁链和转矩无差拍控制占空比调制电机转速

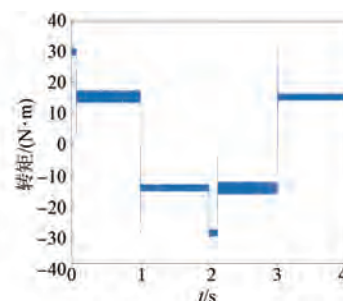


图 24 磁链和转矩无差拍控制占空比调制电机转矩

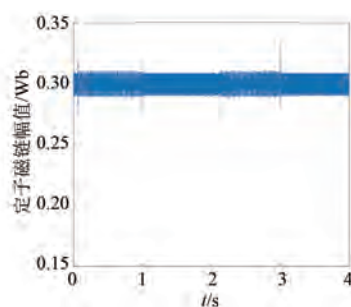


图 25 磁链和转矩无差拍控制占空比调制定子磁链幅值

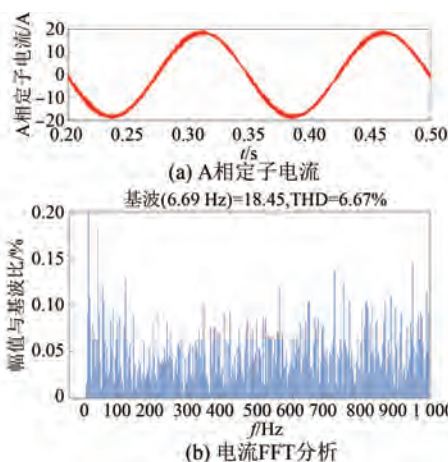


图 26 磁链和转矩无差拍控制占空比调制电流 FFT

磁链和转矩无差拍控制占空比调制系统控制性能如表 7 所示。

表 7 磁链和转矩无差拍控制占空比调制系统控制性能

参数名称	0.2~ 1.0 s	1.2~ 2.0 s	2.2~ 3.0 s	3.2~ 4.0 s	平均
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	1.165 0	0.863 9	1.159 4	0.863 9	1.013 1
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.005 1	0.006 7	0.005 2	0.006 7	0.005 9
THD/%			6.67		
f_{ave}/kHz			12.25		

磁链和转矩无差拍控制占空比调制和模糊占空比调制 MPTC 的电机转矩和定子磁链幅值如图 27、图 28 所示。

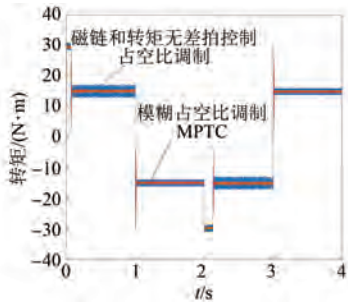


图 27 电机转矩对比

由仿真结果可知，与磁链和转矩无差拍控制占空比调制相比，模糊占空比调制 MPTC 可显著降低转矩和磁链脉动、定子电流 THD 和平均开关频率，转矩脉动 RMSE 和磁链脉动 RMSE 平均值

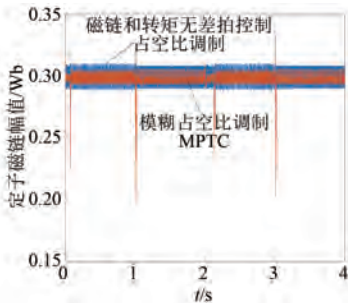


图 28 定子磁链幅值对比

分别减小 65.44% 和 44.07%，定子电流 THD 减小 68.52%，平均开关频率减小 73.39%。经统计，磁链和转矩无差拍控制占空比调制施加 5 373 次零电压矢量，占比为 6.72%，施加占空比为 1 的非零电压矢量共计 34 330 次，占比 42.91%，其余 40 298 次采样周期均需施加两个电压矢量，占比 50.37%，开关频率较高。

分别将电机参数设置为 $2R_s$ 、 $0.5R_s$ 、 $2L$ 、 $0.5L$ 、 $2\psi_f$ 和 $0.5\psi_f$ 。参数失配条件下，MPTC、模糊占空比调制 MPTC、磁链和转矩无差拍 MPC 及磁链和转矩无差拍控制占空比调制控制的永磁同步电机系统稳态转矩脉动 RMSE 和磁链脉动 RMSE 均值如表 8 所示^[24]。由表 8 可知，由于 MPC 和无差拍控制均依赖电机参数，鲁棒性不强。当电机电阻和定子磁链参数失配时，系统均失控。当电机电感参数变大，无差拍控制失控，MPTC 可运行，但脉动增大。当电机电感参数变小，无差拍控制和 MPTC 均可运行，但脉动增大。

表 8 参数失配下电机系统控制性能

控制策略	性能指标	$2R_s$	$0.5R_s$	$2L$	$0.5L$	$2\psi_f$	$0.5\psi_f$
MPTC	$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	失控	失控	7.118 7	7.223 4	失控	失控
	ψ_{rip_RMSE}/Wb			0.003 1	0.014 8		
模糊占空比 调制 MPTC	$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	失控	失控	7.146 8	4.536 0	失控	失控
	ψ_{rip_RMSE}/Wb			0.002 9	0.003 2		
磁链和转矩 无差拍 MPC	$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	失控	失控	失控	4.409 5	失控	失控
	ψ_{rip_RMSE}/Wb				0.004 7		
磁链和转矩无差 拍控制占空比调制	$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	失控	失控	失控	2.859 6	失控	失控
	ψ_{rip_RMSE}/Wb				0.004 5		

3 结 语

本文提出一种永磁同步电机模糊占空比调制 MPTC，采用 MPTC 选择施加的电压矢量，采用模

糊控制确定施加电压矢量占空比。仿真结果表明模糊占空比调制 MPTC 系统可实现四象限运行，电机运行良好。与传统 MPTC、磁链和转矩无差拍 MPC 及磁链和转矩无差拍控制占空比调制相

比,均可显著降低转矩和磁链脉动及定子电流 THD。由于减小转矩和磁链脉动,MPTC 更多选择零电压矢量,平均开关频率有所降低。由于 MPTC 和无差拍控制均依赖电机参数,参数鲁棒性不强。当电机电阻和定子磁链参数失配,系统均失控。当电机电感参数变大,无差拍控制失控,MPTC 可运行,但脉动增大。当电机电感参数变小,无差拍控制和 MPTC 均可运行,但脉动增大。

【参考文献】

- [1] RODRIGUEZ J, GARCIA 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.
- [2] RODRIGUEZ J, GARCIA 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.
- [3] 王治国,郑泽东,李永东,等. 交流电机模型预测控制综述[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 14.
- [4] 谢云辉,郑常宝,胡存刚,等. 永磁同步电机模型预测的优化控制策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(7): 39.
- [5] 李耀华,孟祥臻,师浩浩,等. 基于双变量预测控制的表贴式永磁同步电机直接转矩控制系统[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 15.
- [6] ZHANG Y, YANG H. Model predictive control of induction motor drives with optimal duty cycle control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6593.
- [7] 李耀华,陈桂鑫,王孝宇,等. 基于占空比调制的感应电机直接转矩控制与模型预测转矩控制研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(12): 7.
- [8] 刘述喜,孙超俊,杜文睿,等. 改进的永磁同步电机双矢量模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 30.
- [9] 徐殿胜,张志锋. 一种改进永磁同步电机双矢量模型预测控制策略[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(11): 1.
- [10] 张晋. 基于离散占空比的永磁同步电机转矩控制研究[J]. 电气传动, 2021, 51(17): 10.
- [11] 唐文博. 基于优化占空比的永磁同步电机模型预测控制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(2): 73.
- [12] 付主木,高爱云. 电动汽车用永磁同步电机模糊直接转矩控制[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 19.
- [13] 姬嗣龙,刘文生. 永磁同步电机变论域模糊直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 27.
- [14] 李耀华,秦玉贵,赵承辉,等. 基于模糊控制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 13.
- [15] ROMERAL L, ARIAS A, ALDABAS E, et al. Novel direct torque control (DTC) scheme with fuzzy adaptive torque-ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(3): 487.
- [16] 刘军,刘丁,吴浦升,等. 基于模糊控制调节电压矢量作用时间策略的永磁同步电机直接转矩控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 148.
- [17] 李耀华,秦玉贵,赵承辉,等. 自适应改进模糊调节电压矢量占空比永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(11): 25.
- [18] 李冰,刘石,陈英慧. 无刷双馈电机的模糊占空比直接转矩控制[J]. 自动化仪表, 2017, 38(11): 31.
- [19] BOZORGI A M, FARASAT M, JAFARISHIADEH S. Model predictive current control of surface-mounted permanent magnet synchronous motor with low torque and current ripple [J]. IET Power Electronics, 2017, 10(10): 1120.
- [20] 李耀华,陈桂鑫,王孝宇. 表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制系统预测模型研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 16.
- [21] 王莹,胡育文,杨建飞. 零矢量在永磁同步电机直接转矩控制中的作用及其仿真研究[J]. 微电机, 2011, 44(5): 48.
- [22] 李耀华,赵承辉,秦玉贵,等. DTC 与 MPTC 自适应切换的表贴式永磁同步电机控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(2): 9.
- [23] 李耀华,周逸凡,赵承辉,等. 表贴式永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制系统[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 1.
- [24] 李耀华,刘子焜,刘东梅,等. 永磁同步电机有限状态集模型预测控制对比研究[J]. 微电机, 2021, 54(11): 76.