

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*

李耀华, 刘子焜, 刘东梅, 陈桂鑫, 王孝宇, 任超
(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 对永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)系统和基于定子磁链坐标系的模型预测转矩控制(MPTC)系统的控制性能、平均开关频率、参数鲁棒性等进行比较。DTC系统结构简单,平均开关频率较低,但磁链和转矩脉动大于MPTC。MPTC性能较好,但计算复杂,实时性较差。同时,两者均存在参数失配鲁棒性较差和开关频率不恒定的共性问题。针对开关频率不恒定的问题,提出一种开关频率固定的PMSM MPTC方法,可将每个采样周期开关切换次数固定为2次。仿真结果表明:该方法可使开关频率固定为采样频率的1/3,且将备选开关状态减少为3个。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; 模型预测转矩控制; 开关频率

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)07-0018-08

doi: 10.12177/emca.2021.039

Comparision Between DTC and MPTC for PMSM*

LI Yaohua, LIU Zikun, LIU Dongmei, CHEN Guixin, WANG Xiaoyu, REN Chao
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Control performances, average switching frequency and parameter robustness of the direct torque control (DTC) and model predictive torque control (MPTC) based on stator flux coordinate system for permanent magnet synchronous motor (PMSM) are compared. It is shown that DTC has simpler structure and lower switching frequency. The ripples of flux and torque of DTC are higher than MPTC. MPTC has better control performances, but poor real-time performance. Poor parameter robustness and variable switching frequency are common drawbacks for DTC and MPTC. To overcome the drawbacks, an MPTC strategy is proposed, which can fix switching times at 2 in each sampling period with given candidate switching states. Simulation results show that the switching frequency of the inverter is fixed, which is 1/3 of the sampling frequency, and the number of candidate switching states is decreased to 3.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); direct torque control (DTC); model predictive torque control (MPTC); switching frequency

0 引言

永磁同步电机(PMSM)因其高效率、高功率密度、高功率因数等优势,在新能源汽车、高铁牵引等领域得到广泛应用^[1-2]。矢量控制作为交流电机经典控制理论在PMSM领域应用较为成熟,

但其需要连续转子位置信息和旋转坐标变换^[3-4]。基于静止坐标系的DTC技术采用滞环比较器,通过开关表确定电压矢量,无需坐标变换,结构简单,易于实现,在PMSM领域也得到了广泛应用^[5-8]。近年来,随着微处理器计算能力的提升,以成本函数为评价指标,将逆变器所有开关状态

收稿日期: 2021-03-19; 收到修改稿日期: 2021-04-30

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51207012); 陕西省自然科学基金项目(2021JM-163); 陕西省重点研发项目(2020GY-164, 2019ZDLGY15-06)

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。

遍历代入至电机预测模型,从中选择控制效果最优的开关状态有限状态集模型预测控制在 PMSM 控制领域受到关注^[9-15]。PMSM 模型预测控制可基于转子旋转坐标系,也可以基于定子坐标系实现,前者与矢量控制相同,需要坐标变换和转子位置,后者则需要转矩角实时信息;被控对象可以为定子电流分量,也可以为磁链和转矩,前者的成本函数无需权重系数,后者需要设计和调整权重系数^[16-22]。

PMSM DTC 和基于定子坐标系的模型预测转矩控制(MPTC)均以磁链和转矩作为被控对象,采用逆变器生成的电压矢量作为控制变量,具有一定的共性。本文从控制性能、平均开关频率和参数鲁棒性等方面对这 2 种策略进行比较研究。针对 MPTC 开关频率不恒定的问题,提出开关频率固定的 PMSM MPTC 策略,可将开关频率固定为采样频率的 1/3,且将备选开关状态减小为 3 个,从而优化系统实时性。

1 PMSM DTC

定子坐标系下,表面式 PMSM 转矩方程如下:

$$T_e = \frac{3p\psi_s}{2L_d}\psi_f \sin\delta \quad (1)$$

式中: T_e 为电机转矩; p 为电机极对数; ψ_s 为定子磁链幅值; ψ_f 为永磁体磁链; L_d 和 L_q 为电机 d 轴和 q 轴电感,两者相等; δ 为定转子磁链的夹角,即为转矩角。

PMSM DTC 原理即通过施加电压矢量改变转矩角,从而改变电机转矩。DTC 根据电压矢量对定子磁链和转矩角的增减效果,采用开关表来选择电压矢量以实现磁链和转矩的控制。因此,DTC 本质上是一种定性控制,只考虑施加电压矢量增大或减小,控制方式简单粗放。

静止坐标系下,PMSM 转矩、定子磁链幅值及定子磁链角位置如下:

$$T_e = \frac{3p}{2}(\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int (U_\alpha - i_\alpha R_s) dt + \psi_{\alpha 0} \\ \psi_\beta = \int (U_\beta - i_\beta R_s) dt + \psi_{\beta 0} \end{cases} \quad (3)$$

$$\psi_s = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \quad (4)$$

$$\angle\psi_s = \arctan\left(\frac{\psi_\alpha}{\psi_\beta}\right) \quad (5)$$

式中: ψ_α 和 ψ_β 为定子磁链 α 轴和 β 轴分量; i_α 和 i_β 为定子电流 α 轴和 β 轴分量; U_α 和 U_β 为施加电压矢量 α 轴和 β 轴分量; R_s 为定子电阻; $\angle\psi_s$ 为定子磁链角位置。

由于永磁体的存在,PMSM 定子磁链初始值不为零,由永磁体和转子初始位置决定:

$$\begin{cases} \psi_{\alpha 0} = \psi_f \cos\theta_{i0} \\ \psi_{\beta 0} = \psi_f \sin\theta_{i0} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\psi_{\alpha 0}$ 和 $\psi_{\beta 0}$ 为定子磁链 α 轴和 β 轴初始值分量; θ_{i0} 为静止坐标系下转子磁链角位置。

因此,PMSM DTC 虽然不需要连续转子位置信息和旋转坐标变换,但需要转子初始位置信息以确定定子磁链积分的初始值^[23]。

将定子磁链角位置划分为 6 个扇区,如式(7)所示。在一个定子磁链扇区内,始终同时满足磁链和转矩增减组合控制要求的非零电压矢量唯一。

$$\begin{cases} \theta_1: -30^\circ \leq \angle\psi_s < 30^\circ \\ \vdots \\ \theta_6: 270^\circ \leq \angle\psi_s < 330^\circ \end{cases} \quad (7)$$

基于不同扇区下电压矢量对磁链和转矩的增减控制效果,PMSM DTC 开关表如表 1 所示,其中 φ 和 τ 的值由磁链和转矩滞环比较器决定,1 表示需增加,0 表示需减小^[24]。

表 1 PMSM DTC 开关表

φ	τ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
1	0	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
0	1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
0	0	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

PMSM DTC 系统如图 1 所示,其中 ω_r 和 ω_r^* 分别表示电机实际转速和参考转速。

由图 1 可知,PMSM DTC 为定性控制。由开关表确定的电压矢量可满足对磁链和转矩的增减控制要求。由于下一时刻的开关切换次数由当前时刻系统状态确定,开关频率不恒定。

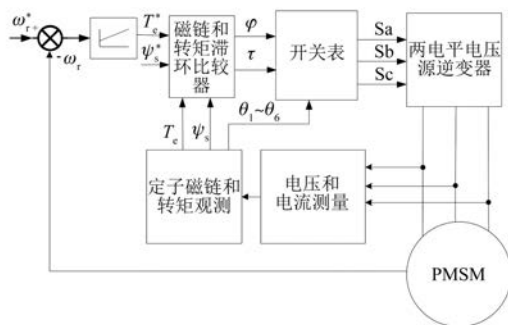


图 1 DTC 系统

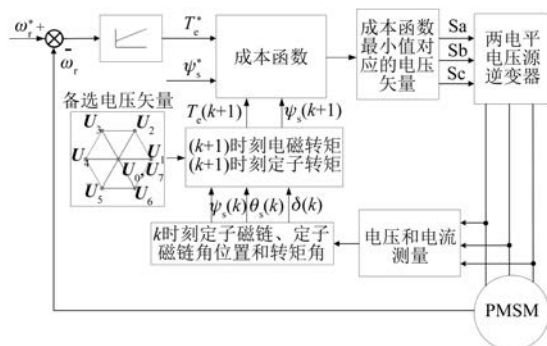


图 2 基于定子坐标系 PMSM MPTC 系统

2 基于定子坐标系的 MPTC

定子磁链坐标系下,表面式 PMSM 定子磁链和转矩预测模型如下:

$$\begin{aligned} \psi_s(k+1) &= \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}, \\ q &= \frac{U_s(k) \cdot \Delta t}{\psi_s(k)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_t\psi_s(k)}{2L_d}\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \cdot \sin\left[\delta(k) + \arcsin\frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+a^2+2a\cos\alpha}}\right] \quad (9)$$

式中: $\psi_s(k)$ 、 $T_e(k)$ 和 $\mathbf{U}_s(k)$ 为当前时刻的定子磁链、转矩和施加的电压矢量; $\psi_s(k+1)$ 和 $T_e(k+1)$ 分别为下一时刻的转矩和定子磁链预测值; α 为施加电压矢量与定子磁链的夹角; $\delta(k)$ 为当前时刻的转矩角; Δt 为采样周期^[25-26]。

MPTC 使用逆变器产生的全部电压矢量:

$$U_s \in \{U_0, U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7\} \quad (10)$$

式中: U_0 和 U_7 均为零电压矢量, 由 000 和 111 2 个开关状态产生, 具体以开关次数最小原则选择^[27]。

MPTC 的成本函数 g 如下:

$$g = \sqrt{\left(\frac{T_e(k+1) - T_e^*}{T_e^*}\right)^2 + \left(\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*}{\psi_s^*}\right)^2} \quad (11)$$

式中: T_e^* 和 ψ_s^* 分别为当前时刻转矩和定子磁链参考值, 无需权重系数的设计和调整。

基于定子坐标系的 PMSM MPTC 系统如图 2 所示。

由图 2 可知, MPTC 采用成本函数对电压矢量控制效果定量评价, 并选择控制效果最优的电

压矢量。因此, MPTC 并不一定满足对磁链和转矩的定性控制要求。与 DTC 类似, MPTC 系统每一采样时刻的开关切换次数并不固定, 开关频率也不恒定。

3 仿真对比

基于 MATLAB/Simulink 建立表面式 PMSM DTC 和 MPPTC 仿真模型。仿真模型为离散模型, 采样周期为 $50 \mu\text{s}$ 。直流母线电压为 312 V , 转速 PI 调节器 $K_p = 5$, $K_i = 100$, 输出上下限为 $[-30 \text{ N}\cdot\text{m}, 30 \text{ N}\cdot\text{m}]$ 。仿真用表面式 PMSM 参数如表 2 所示。

表 2 仿真用表面式 PMSM 参数

电机参数	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
d 轴电感 L_d/H	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
极对数	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

3.1 四象限运行

参考转速初始为 500 r/min, 2 s 时阶跃至 -500 r/min。负载转矩初始为 10 N·m, 1 s 时阶跃至 -10 N·m, 3 s 时阶跃至 10 N·m。参考定子磁链幅值为 0.3 Wb。仿真时长为 4 s。PMSM DTC 和 MPTC 仿真波形如图 3~图 8 所示。

定义转矩脉动均方根误差(RMSE)和磁链脉动均方根误差如下:

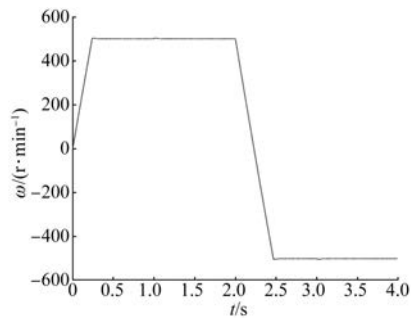


图3 DTC 下电机转速

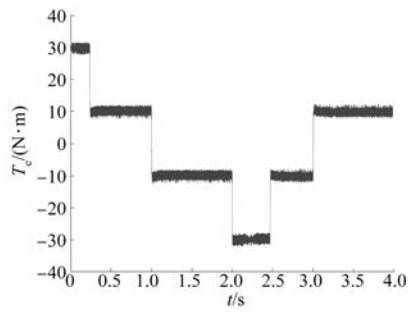


图7 MPTC 下电机转矩

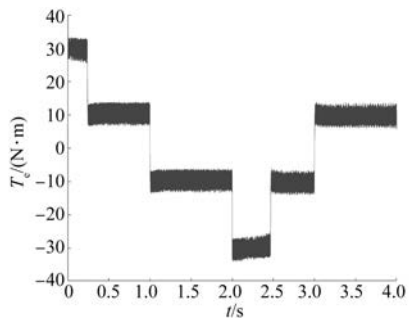


图4 DTC 下电机转矩

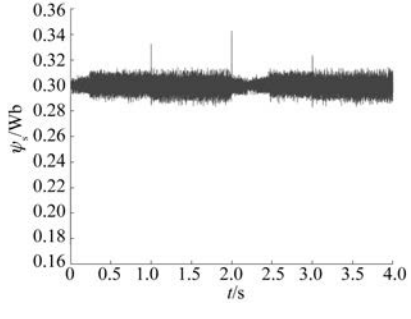


图8 MPTC 下定子磁链幅值

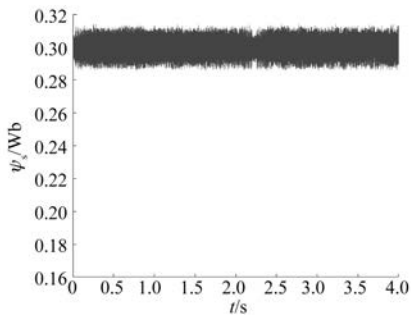


图5 DTC 下定子磁链幅值

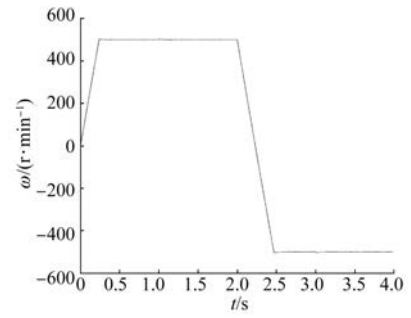


图6 MPTC 下电机转速

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (12)$$

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (13)$$

式中: n 为采样个数。
不同策略下,电机系统控制性能如表 3 所示。

表 3 电机系统控制性能		
控制策略	$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	ψ_{rip_RMSE}/Wb
DTC	1.791 2	0.005 3
MPTC	0.955 1	0.004 3

由仿真结果可知,DTC 和 MPTC 均可使电机四象限运行。与 DTC 相比,模型预测控制转矩脉动误差和磁链脉动误差更小。转矩动态变化下,DTC 选择的电压矢量兼顾磁链和转矩控制,MPTC 更偏重转矩控制,导致磁链有较大的波动。
对 DTC 系统,并行运行 MPTC。相同条件下,DTC 选择的电压矢量在 MPTC 的排序如表 4 所示。

表 4 DTC 选择电压矢量在 MPTC 排序							
排序位置	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
电压矢量数量	37 377 17 257 7 668 5 925 4 534 3 390 3 849						
占比/%	46.72	21.57	9.59	7.41	5.67	4.24	4.81

由表 4 可知,DTC 选择的电压矢量在 MPTC 中各个排序位置的占比逐级递减,作为 MPTC 的最优或次优电压矢量情况占比达到 68.29%,这也是 MPTC 性能优于 DTC 的原因。当磁链或转矩误差较小时,虽然 DTC 选择的电压矢量正确增减磁链或转矩,但由于电压矢量作用时间固定,控制效果反而不佳,造成更大的脉动,从而使有时成本函数排序较靠后,甚至排序处于第 6 位或第 7 位。

3.2 平均开关频率

定义平均开关频率如下:

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \tag{14}$$

式中: $N_{switching}$ 为开关次数; t 为仿真时间。

设定参考转速和参考转矩为不同的稳定值及上文的复合仿真工况,仿真时长均为 4 s。电机系统平均开关频率如表 5 所示。

由表 5 可知,直接转矩的平均开关频率要低于 MPTC。经统计,在复合工况,DTC 系统有 40 764 个采样时刻选择与上一时刻相同的电压矢量,开关切换次数为 0,MPTC 系统仅有 24 111 个采样时刻选择的压矢量与上一时刻相同。因此,DTC 的平均开关频率更低。由于两者开关频率不恒定,不同工况下的平均开关频率也有所不同。

3.3 参数失配鲁棒性

DTC 与 MPTC 均需要磁链和转矩计算模型,对电机系统参数有较强依赖性。由于测量误差和

表 5 电机系统平均开关频率

$\omega_r/(r \cdot \min^{-1})$	$T_e/(N \cdot m)$	f_{DTC}/kHz	f_{MPTC}/kHz
500	20	5.03	5.61
	10	5.10	6.48
	0	5.14	8.42
	-10	5.18	6.92
	-20	5.13	6.18
250	20	5.25	6.61
	10	5.36	7.38
	0	5.40	7.35
	-10	5.49	7.34
	-20	5.39	6.23
50	20	5.37	6.04
	10	5.48	6.63
	0	5.52	6.26
	-10	5.49	6.09
	-20	5.48	6.16
复合工况		5.13	6.43

参数时变特性,势必会造成模型参数失配,影响控制效果^[28-34]。基于上文仿真模型,预测模型参数不变,分别将电机定子电阻、定子电感和永磁体磁链设定为原参数的 0.5 倍和 2 倍。设定参考转速为 100 r/min,负载转矩为 10 N·m。仿真时长为 4 s。DTC 与 MPTC 下,电机系统控制性能如表 6 所示。

表 6 电机系统控制性能

控制策略	性能指标	正常	0.5R _s	2R _s	0.5ψ _f	2ψ _f	0.5L	2L
DTC	$T_{rip-rmse}/(N \cdot m)$	1.680 5	失控	失控	失控	失控	3.314 3	失控
	$\psi_{rip-rmse}/Wb$	0.005 4					0.005 4	
MPTC	$T_{rip-rmse}/(N \cdot m)$	1.098 8	失控	失控	失控	失控	3.975 6	3.808 1
	$\psi_{rip-rmse}/Wb$	0.005 2					0.006 8	0.003 9

仿真结果表明:DTC 和 MPTC 对定子电阻和磁链参数失配敏感。定子电感变大会使 DTC 失控,使 MPTC 转矩脉动增大。定子电感变小,DTC 和 MPTC 转矩脉动增大,磁链影响较小。

4 开关频率固定的 MPTC

由上文可知,DTC 和传统 MPTC 存在开关频率不恒定的共性问题。基于模型预测控制具有柔

性控制的特点,这里提出一种开关频率固定的 MPTC。逆变器开关频率固定即每一时刻的开关切换次数为固定值。逆变器的开关切换次数为 0 次、2 次、4 次或 6 次。为了减小开关损耗,开关切换次数越小越好,但如果设定为 0 次,则将始终保持初始开关状态,系统失控。因此,设定开关切换次数为 2 次。以开关切换次数 2 次为原则,PMSM MPTC 的备选开关状态如表 7 所示。

表 7 备选开关状态

上一时刻开关状态	备选开关状态		
000(U_0)	100(U_1)	010(U_3)	001(U_5)
100(U_1)	000(U_0)	110(U_2)	101(U_6)
110(U_2)	010(U_3)	100(U_1)	111(U_7)
010(U_3)	110(U_2)	000(U_0)	011(U_4)
011(U_4)	111(U_7)	001(U_5)	010(U_3)
001(U_5)	000(U_0)	011(U_4)	101(U_6)
101(U_6)	001(U_5)	111(U_7)	100(U_1)
111(U_0)	011(U_4)	101(U_6)	110(U_2)

由表 7 可知,此时 MPTC 可用的备选开关状态为 3 个,确保每次采样周期的开关切换次数为 2 次,同时与使用 7 个备选开关状态的传统 MPTC 相比,只需 3 次遍历预测计算,实时性得到优化。开关频率固定的 PMSM MPTC 系统如图 9 所示。

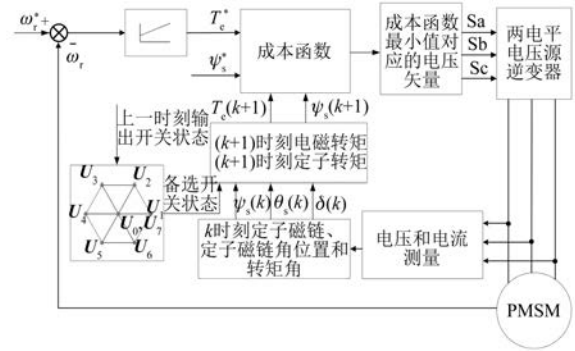


图 9 开关频率固定的 PMSM MPTC 系统

在与上文相同的复合工况仿真条件下,开关频率固定的 PMSM MPTC 系统仿真波形如图 10~图 12 所示。

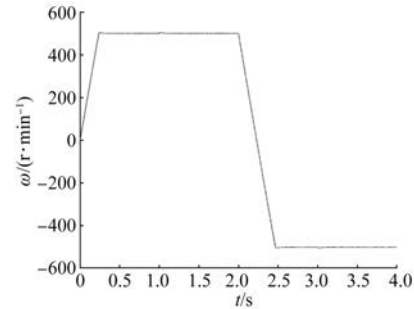


图 10 开关频率固定 MPTC 电机转速

开关频率固定的 PMSM MPTC 系统控制性能如表 8 所示。

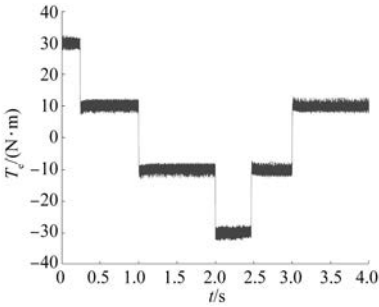


图 11 开关频率固定 MPTC 电机转矩

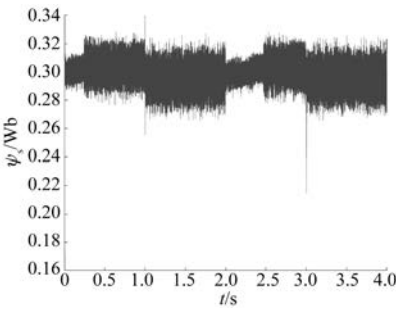


图 12 开关频率固定 MPTC 定子磁链幅值

表 8 电机系统控制性能

$T_{rip-RMSE}/(N \cdot m)$	$\psi_{rip-RMSE}/Wb$	f_{ave}
1.013 8	0.009 6	6.67

仿真结果表明,开关频率固定的 PMSM MPTC 系统可正常运行。由于备选开关状态有所减小,转矩和磁链脉动较传统 MPTC 有所增大,平均开关频率有所增大,但此时开关频率固定为采样频率的 1/3。

对开关频率固定的 PMSM MPTC 系统,并行运行传统 MPTC。相同条件下,开关频率固定的 MPTC 系统选择的电压矢量在传统 MPTC 的排序如表 9 所示。

表 9 开关频率固定 MPTC 系统电压矢量排序

排序位置	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
电压矢量数量	36 998	29 235	9 669	4 098	0	0	0
占比/%	46.25	36.54	12.09	5.12	0	0	0

由表 9 可知,开关频率固定的 MPTC 系统选择的电压矢量作为 MPTC 的最优或次优电压矢量情况占比达到 82.79%,表明选择的电压矢量质量较好。

5 结 语

基于 PMSM DTC 和 MPTC 比较结果,得出结论如下:

(1) PMSM DTC 和基于定子坐标系 MPTC 均可实现四象限运行,电机运行良好。

(2) PMSM DTC 为定性控制,简单粗放,所选择的电压矢量并不一定是最优电压矢量,转矩脉动和磁链脉动较大,但结构简单,易于实现,且平均开关频率较低。

(3) PMSM MPTC 采用成本函数对电压矢量控制效果定量评价,选择控制效果最优的电压矢量,所选电压矢量并不一定满足对磁链和转矩的增减控制。与 DTC 相比,需要遍历所有电压矢量,计算量较大,实时性差。

(4) 定子电阻和永磁体磁链参数失配下, PMSM DTC 和模型预测控制鲁棒性均较差。DTC 在电感参数增加时失控,电感参数减小时转矩波动较大, MPTC 在电感参数失配时,也有较大的转矩脉动。

(5) DTC 和传统 MPTC 的开关频率均不固定。由于 MPTC 灵活,可通过设定备选开关状态,固定模型预测转矩开关频率。本文提出开关频率固定的 PMSM MPTC 策略,可将每个采样周期开关切换次数固定为 2 次。仿真结果表明:该方法可使开关频率固定为采样频率的 1/3,且将备选开关状态减小为 3 个,实时性得到优化。

【参考文献】

- [1] 刘洪涛,严世榕,张甫圆. 纯电动汽车 PMSM 驱动控制[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 741.
- [2] 温旭辉,刘钧,赵峰,等. 车用高性能 PMSM 驱动系统的研发[J]. 汽车工程, 2011, 33(10): 880.
- [3] 柏建勇,腾青芳,杜永栋,等. PMSM 控制策略比较研究[J]. 控制工程, 2015, 22(3): 490.
- [4] CASADEI D, PROFUMO F, SERRA G, et al. FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 779.
- [5] 许家群,欧阳明高,唐任远. 电动汽车用永磁同步牵引电动机 DTC(英文)[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 94.
- [6] 韩建群,郑萍. 一种用于电动汽车的 PMSM DTC 的简化方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 76.
- [7] 杨建飞,胡育文. PMSM 最优 DTC[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 109.
- [8] 邱鑫,黄文新,卜飞飞,等. 电动汽车用 IPMSM DTC 系统效率优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 30(22): 42.
- [9] CORTES P, KAZMIERKOWSKI M P, KENNEL R M, et al. Predictive control in power electronics and drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4312.
- [10] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control: a simple and powerful method to control power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1826.
- [11] RODRIGUEZ J, KENNEL R M, ESPINOZA J R, et al. High-performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 812.
- [12] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1003.
- [13] KOURO S, PEREZ M A, RODRIGUEZ J, et al. Model predictive control: MPC's role in the evolution of power electronics [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2015, 9(4): 8.
- [14] VAZQUEZ S, RODRIGUEZ J, RIVERA M, et al. Model predictive control for power converters and drives: advances and trends [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 935.
- [15] NIU F, WANG B, BABEL A S, et al. Comparative evaluation of direct torque control strategies for permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1408.
- [16] 牛峰,李奎,王尧. PMSM 模型预测 DTC[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(12): 60.
- [17] 颜学龙,谢刚,孙天夫,等. 基于模型预测控制的 PMSM 电流控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 1.
- [18] 何婷,乔俊强,包建勤,等. 永磁同步电机 FCS-MPC 和 CCS-MPC 对比研究[J]. 微电机, 2020, 53(10): 52.

- [19] 李耀华, 师浩浩, 孟祥臻. 表面式 PMSM DTC 系统简化预测控制策略[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 96.
- [20] 李耀华, 刘洋, 孟祥臻. 一种表面式 PMSM 有限状态集模型预测 DTC[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 33.
- [21] 李耀华, 杨启东, 刘洋, 等. 表面式 PMSM 模型预测 DTC 备选电压矢量集合研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 87.
- [22] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. PMSM 模糊自适应变开关次数权重系数 MPTC[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 102.
- [23] 韦鲲, 金辛海. 表面式 PMSM 初始转子位置估计技术[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 104.
- [24] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. A direct torque controller for permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 637.
- [25] 李耀华, 马建, 刘晶郁, 等. PMSM DTC 电压矢量选择区域[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(1): 95.
- [26] 李耀华, 马建, 刘晶郁, 等. 电动汽车用 PMSM DTC 电压矢量选择策略[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(4): 43.
- [27] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞, 等. 自适应变电压矢量 PMSM DTC 开关表[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 75.
- [28] WANG F, LI S, MEI X, et al. Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: an experimental evaluation of PTC and PCC methods [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(3): 671.
- [29] ZHANG X, ZHANG L, ZHANG Y. Model predictive current control for PMSM drives with parameter robustness improvement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1645.
- [30] SIAMI M, KHABURI D A, RODRIGUEZ J. Torque ripple reduction of predictive torque control for PMSM drives with parameter mismatch [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7160.
- [31] ZHANG C, WU G, RONG F, et al. Robust fault-tolerant predictive current control for permanent magnet synchronous motors considering demagnetization fault [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5324.
- [32] 郝剑奇, 何凤有, 陈俊磊. 模型失配 PMSM 模型预测控制研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(10): 31.
- [33] 李键, 牛峰, 黄晓艳, 等. PMSM 有限集模型预测电流控制预测误差分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 1.
- [34] 钟灼臻, 曾岳南, 罗伟维. PMSM 鲁棒有限集模型预测电流控制算法[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 17.

[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |