

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

李耀华，秦玉贵，赵承辉，周逸凡，苏锦仕，秦辉
(长安大学汽车学院, 西安 710064)

摘要：设计了模糊调节电压矢量占空比永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC),采用开关表选择电压矢量,采用模糊控制器确定电压矢量占空比。仿真结果表明,与传统DTC相比,可有效抑制磁链和转矩脉动,但也存在转矩较大时开关表控制失效引起转矩脉动的问题。针对开关表控制失效问题,提出了采用电压矢量选择策略取代开关表来选择电压矢量的改进控制策略。仿真结果表明:改进控制策略可有效抑制因开关表失效引起的转矩脉动,但动态性能较差。因此,进一步提出采用开关表与模糊调节电压矢量占空比的自适应切换控制。动态下,系统采用开关表控制;稳态下,系统采用改进模糊调节电压矢量占空比控制。仿真结果表明,自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制可在保证良好稳态性能的基础上提升动态性能。

关键词：永磁同步电机；模糊控制；直接转矩控制；占空比

中图分类号：TM 351 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-6540(2020)11-0025-09

doi: 10.12177/emca.2020.130

Adaptive Improved Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Fuzzy Control to Adjust Duty Ratio of Voltage Vector

LI Yaohua, QIN Yugui, ZHAO Chenghui, ZHOU Yifan, SU Jinshi, QIN Hui
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) direct torque control (DTC) system using fuzzy control to adjust duty ratio of voltage vector is proposed. The applying voltage vector is determined by switching table and the duty ratio of voltage vector is adjusted by fuzzy controller. Simulation results show that, compared with conventional DTC, the proposed fuzzy control system can suppress stator flux and torque ripples. But in the condition of large torque, there will be the torque ripple resulting from the failure of switching table. Aiming at this problem, an improved vector selection control strategy eliminating the switching table is put forward. This control strategy can suppress torque ripple, but its dynamic response is poor. Therefore, an adaptive control strategy is proposed, which uses switching table at the dynamic state and the improved vector selection control at the steady state. Simulation results show that the adaptive control strategy can improve the dynamic response and maintain the steady state performance of the system.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); fuzzy control; direct torque control (DTC); duty ratio

收稿日期：2020-06-08；收到修改稿日期：2020-08-23

*基金项目：国家自然科学基金项目(51207012)；陕西省工业科技攻关项目(2016GY-069)；陕西省微特电机及驱动技术重点实验室开放基金项目(2013SSJ2002)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102228201)；陕西省自然科学基金项目(2020JQ-385)

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。

0 引言

直接转矩控制(DTC)采用滞环控制器对电机的磁链和转矩进行砰-砰控制,结构简单,系统响应速度快,在永磁同步电机(PMSM)领域得到广泛应用^[1-3]。DTC 转矩和磁链调节采用滞环控制器进行定性控制,使得转矩和磁链误差较大和较小时,输出的电压矢量和电压矢量作用时间均相同,因此产生较大的转矩脉动。文献[4-5]表明开关表也无法始终满足对转矩的控制要求。当转矩角较大时,开关表失控,会造成转矩脉动。模糊控制设计简单,鲁棒性强,可用于解决 DTC 控制粗糙的问题。文献[6-8]以模糊控制器替代开关表用于产生电压矢量,取得较好的效果,但由于模糊控制可以使用的电压矢量个数离散有限,且电压矢量对磁链和转矩的作用会出现矛盾,难以设计理想的模糊控制规则表,对控制效果改善有限。文献[9-12]在开关表控制的基础上引入模糊控制调节电压矢量占空比。由于占空比调节连续无限,且占空比与磁链和转矩呈正相关关系,因此取得了更好的控制效果。

本文设计了模糊调节电压矢量占空比 PMSM DTC 系统,采用开关表选择电压矢量,采用模糊控制器确定电压矢量占空比。仿真结果表明,与传统 DTC 相比,其可有效抑制磁链和转矩脉动,但在转矩较大时,开关表控制失效会引起转矩脉动。针对开关表控制失效问题,提出了采用电压矢量选择策略取代开关表来选择电压矢量的改进控制策略。但该方法的动态性能较差。因此,进一步提出采用开关表与模糊调节电压矢量占空比的自适应切换控制。即,动态下,系统采用开关表控制;稳态下,系统采用模糊调节电压矢量占空比控制。仿真结果表明改进型控制方法可在保证良好稳态性能的基础上,提升动态性能。

1 PMSM DTC

PMSM DTC 系统采用开关表对磁链和转矩进行控制,如图 1 所示。开关表如表 1 所示,其中, ϕ 和 τ 是定子磁链和转矩滞环比较器输出, $\theta_1 \sim \theta_6$ 为定子磁链扇区信号, $U_1 \sim U_6$ 为 6 个电压矢量^[1]。

基于 MATLAB/Simulink 建立了 PMSM DTC 系统仿真模型。仿真参数如下:系统采样周期为

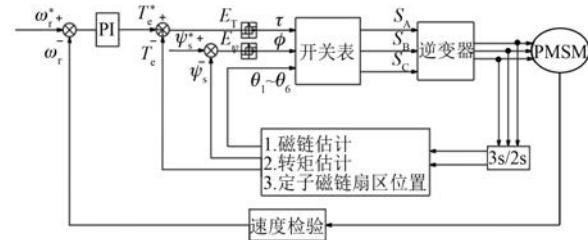


图 1 PMSM DTC 系统

表 1 PMSM 直接转矩控制开关表

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

5×10^{-5} s, 参考转速为 50 r/min, 参考转矩初始为 11 N·m, 0.5 s 时阶跃至 33 N·m。参考定子磁链幅值为 0.3 Wb, 仿真时长为 1 s。仿真用 PMSM 参数如表 2 所示。

表 2 仿真用 PMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
d 轴电感 L_d/H	0.0085
q 轴电感 L_q/H	0.0085
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
极对数 p	4
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.089
黏滞阻尼 $F/(N \cdot m \cdot s)$	0.005

DTC 下, PMSM 转速、电机转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹如图 2~图 5 所示。

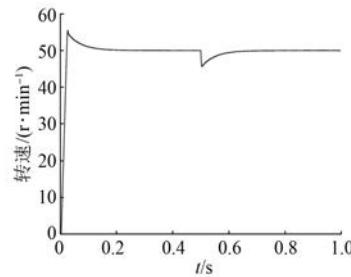


图 2 DTC 下的电机转速

仿真结果验证了基于开关表的 DTC 可行性。但在图 3 中, 当转矩较大时(转矩角约为 63°), 出

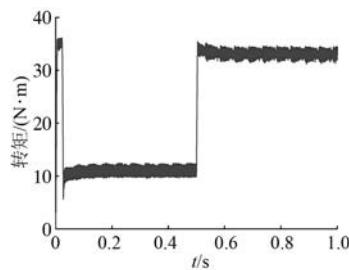


图 3 DTC 下的电机转矩

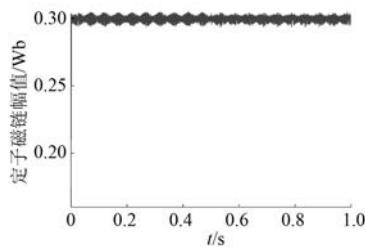


图 4 DTC 下的定子磁链幅值

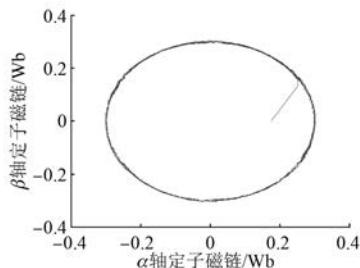


图 5 DTC 下的定子磁链轨迹

现了因开关表失效引起的转矩脉动。

2 模糊调节电压矢量占空比控制

采用开关表的 DTC 输出电压矢量占空比恒定为 1, 当转矩和磁链误差较小时, 过大的占空比会造成转矩和磁链脉动。为了减小磁链和转矩脉动, 本文使用模糊控制器调节电压矢量占空比, 实现对转矩和磁链的精细化控制。模糊调节电压矢量占空比 PMSM DTC 系统结构如图 6 所示。由图 6 可知, 系统采用表 1 所示开关表确定输出电压矢量, 采用模糊控制器确定输出电压矢量占空比。当占空比不为 1 时, 采样周期内输出电压矢量作用时间以外的时间由零电压矢量填充, 零电压矢量开关状态选择以开关次数最小为原则^[13-14]。

调节电压矢量占空比的模糊控制器由模糊化、模糊推理和解模糊 3 部分组成, 输入量为转矩

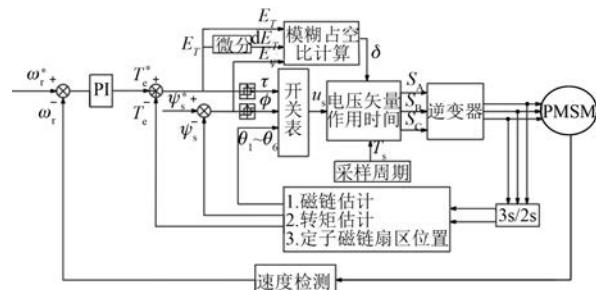


图 6 模糊调节电压矢量占空比 PMSM DTC 系统

误差 E_T 、转矩误差变化率 dE_T 和定子磁链误差 E_ψ , 输出量为电压矢量占空比 δ ($0 \leq \delta \leq 1$)。

转矩误差 E_T 、转矩误差变化率 dE_T 、磁链误差 E_ψ 的论域由文献[8]所述的方法, 通过仿真实验确定最优化域。隶属度函数曲线形状较尖的模糊子集, 分辨率较高, 控制灵敏度高; 隶属度函数曲线形状较平缓的模糊子集, 控制特性比较平缓, 稳定性能较好。本文选用具有较高分辨率的隶属度函数, 以期得到较高的控制精度。因此, 输入和输出隶属度函数均选用灵敏度较高的三角形隶属度函数。输入和输出隶属度函数模糊子集的范围由仿真结果得到的最小转矩脉动均方根误差, 并同时兼顾磁链脉动均方根误差作为指标进行调整获得。本文最终确定的转矩误差 E_T 、转矩误差变化率 dE_T 、磁链误差 E_ψ 隶属度函数如图 7~图 9 所示。

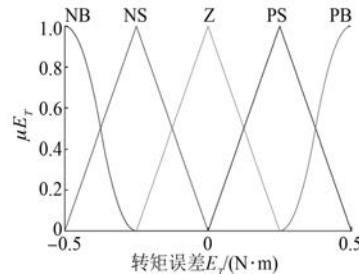


图 7 转矩误差隶属度函数

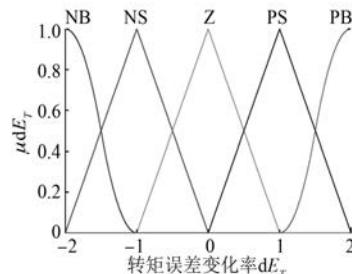


图 8 转矩误差变化率隶属度函数

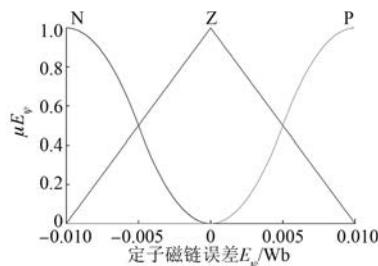


图 9 磁链误差隶属度函数

电压矢量占空比 δ 的取值范围为 $[0, 1]$, 故电压矢量占空比的论域为 $[0, 1]$, 分为 5 个模糊子集 $\{\text{ZL}, \text{SL}, \text{ML}, \text{RL}, \text{VL}\}$, 隶属度函数如图 10 所示。

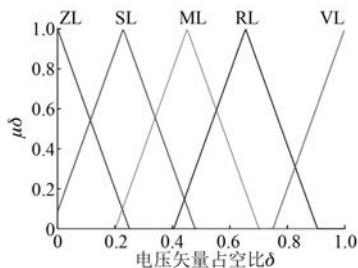


图 10 电压矢量占空比隶属度函数

模糊控制调节电压矢量占空比的模糊控制规则制定如下。

当磁链误差为 Z 时, 说明此时磁链误差较小, 不考虑磁链误差的影响, 只考虑转矩误差和转矩误差变化率。转矩误差为 Z 时, 说明要保持转矩不变, 选择电压矢量占空比 ZL。此时, 输出占空比为零, 等价于输出零电压矢量以保持转矩。转矩误差为 NB、转矩误差变化率为 NB 时, 即需要转矩较大地减小、转矩误差变化率较大地减小时, 转矩误差与转矩误差变化率的变化方向一致, 且均为 NB, 对转矩变化需求较大, 选择最大的电压矢量占空比 VL 以满足需求。当转矩误差为 NB、转矩误差变化率为 NS 时, 由于转矩误差变化率较小地减小, 则不需要选择最大的电压矢量占空比, 选择 RL 即可满足需求。当转矩误差为 NB、转矩误差变化率为 Z 时, 即转矩需要较大地减小, 但转矩误差变化率保持不变, 减小转矩的需求更小, 选择 ML 即可满足要求。当转矩误差为 NB、转矩误差变化率为 PS 时, 即需要转矩较大地减小、转矩误差变化率较小地增大时, 由于转矩误差变化率会抵消一部分转矩的需求, 选择 ML 可满

足要求。当转矩误差为 NB、转矩误差变化率为 PB 时, 转矩需要较大地减小, 转矩误差变化率则需较大地增大, 抵消了很大一部分转矩需求, 因此选择 SL 即可满足要求。由此可得磁链误差为 Z 时, 调节电压矢量占空比模糊控制规则表如表 3 所示。

表 3 调节电压矢量占空比模糊控制规则表
(磁链误差为 Z 时)

电压矢量 占空比 δ	转矩误差变化率 dE_T				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	VL	RL	ML	ML	SL
转矩 误差 E_T	NS	RL	ML	SL	SL
Z	ZL	ZL	ZL	ZL	ZL
PS	ML	SL	SL	ML	RL
PB	SL	ML	RL	VL	VL

当磁链误差为 N 或 P 时, 磁链误差较大, 不能忽略磁链误差的影响。当转矩误差为 Z 时, 施加电压矢量占空比为 ZL, 即施加零电压矢量, 只满足了转矩需求, 不完全满足磁链需求, 会产生较大的磁链波动。因此, 将表 3 中的 ZL 变为 ML, 提高电压矢量的占空比快速满足磁链的要求, 使磁链误差快速变为 Z, 系统再施加零电压矢量。当转矩误差为 PS 或 PB 时, 基本电压矢量模糊控制器所选择的电压矢量能够满足快速增大转矩的需求, 但不能快速增加或减少磁链。因此, 将表 3 中的 SL 变为 ML, 保证磁链能够迅速增大或减小。当转矩误差为 NS 或 NB 时, 基本电压矢量模糊控制器所选择的电压矢量可以满足快速减小转矩和增大或减小磁链的要求, 无需对表 3 进行调整。由此可得, 磁链误差为 N 或 P 时, 调节电压矢量占空比模糊控制规则表如表 4 所示。

表 4 调节电压矢量占空比模糊控制规则表
(磁链误差为 P 或 N 时)

电压矢量 占空比 δ	转矩误差变化率 dE_T				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	VL	RL	ML	ML	SL
转矩 误差 E_T	NS	RL	ML	SL	ML
Z	ML	ML	ML	ML	ML
PS	ML	ML	ML	ML	RL
PB	ML	ML	RL	VL	VL

表 4 中第 i 条控制规则如下:

$$R_i: \text{if } E_T = A_j \text{ and } dE_T = B_k \text{ and } E_\psi = C_m \text{ then } \delta = \delta_n \\ j = 1 \sim 5, k = 1 \sim 5, m = 1 \sim 3, n = 1 \sim 5 \quad (1)$$

式中: A_j, B_k, C_m, δ_n 分别属于 $E_T, dE_T, E_\psi, \delta$ 论域中的模糊变量。

模糊推理采用 Mamdani 型推理, 输出电压矢量占空比如下:

$$\delta = \max_{1 \leq i \leq 50} [u_A(E_T) \cap u_B(dE_T) \cap u_\delta(\delta)] \quad (2)$$

式中: u_A, u_B, u_δ 分别为转矩误差、转矩误差变化率和输出电压矢量占空比的隶属度; \cap 为 Mamdani 推理的取小算子; δ 为输出电压矢量占空比。

解模糊采用 max-min 取小法, 取最大隶属度对应的输出量为输出电压矢量占空比。

相同仿真条件下, 模糊调节电压矢量占空比 PMSM DTC 系统电机转速、电机转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹如图 11~图 14 所示。开关表控制和模糊调节电压矢量占空比控制下的转矩误差和磁链误差如图 15、图 16 所示。

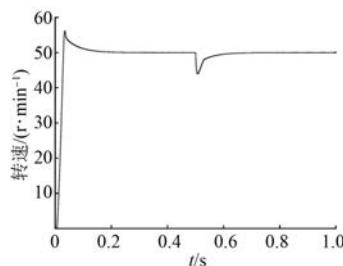


图 11 模糊调节电压矢量占空比控制下的电机转速

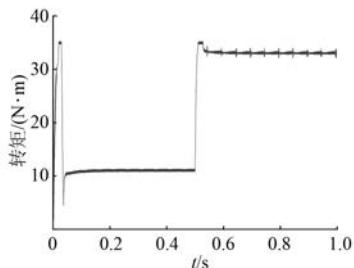


图 12 模糊调节电压矢量占空比控制下的电机转矩

仿真结果验证了模糊调节电压矢量占空比 PMSM DTC 的可行性。由图 3 可知, 当转矩较大时, 开关表失效同样会引起转矩脉动。由图 15 可知, 与开关表相比, 模糊调节电压矢量占空比可显著减小转矩脉动, 开关表控制在 0.5 s 转矩突变后经过 0.004 4 s 回到稳态, 但模糊调节电压矢量占

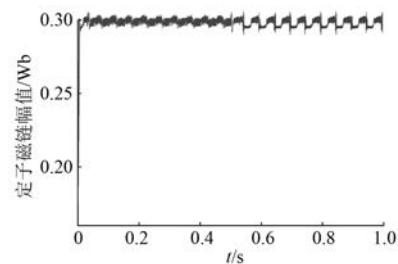


图 13 模糊调节电压矢量占空比控制下的定子磁链幅值

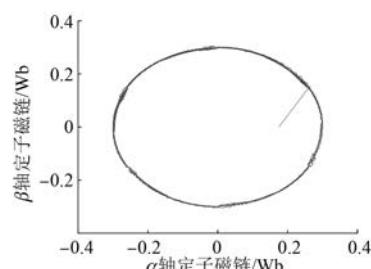


图 14 模糊调节电压矢量占空比控制下的定子磁链轨迹

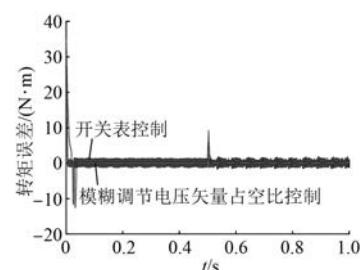


图 15 开关表控制和模糊调节电压矢量占空比控制下的转矩误差

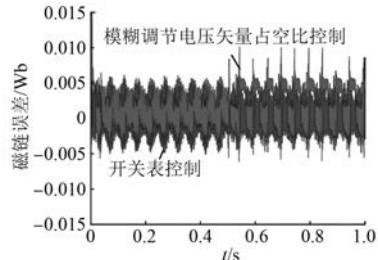


图 16 开关表控制和模糊调节电压矢量占空比控制下的磁链误差

空比控制在 0.5 s 后需经过 0.032 5 s 才能回到稳态, 故开关表动态性能更好。由图 16 可以看出, 当转矩较小时, 模糊调节电压矢量占空比可减小磁链脉动。但当转矩较大时, 开关表失效引起的转矩脉动增大。由于模糊控制规则制定原则以转矩控制为主, 此时会牺牲磁链控制, 产生较大的磁链脉动。

3 改进模糊调节电压矢量占空比控制

上文表明模糊调节电压矢量占空比控制可有效抑制转矩脉动。但由于其采用开关表选择电压矢量,当转矩较大时,开关表无法一直满足转矩控制。仿真结果表明当转矩较大时,开关表失效对模糊调节电压矢量占空比控制也产生影响,产生转矩脉动,磁链脉动也有所增大。为了抑制因开关表失效引起的转矩脉动,本文提出一种改进模糊调节电压矢量占空比控制,如图 17 所示。

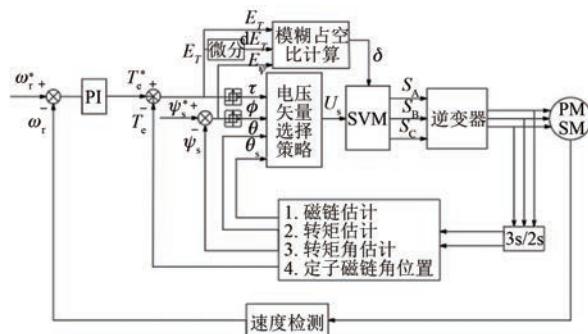


图 17 改进模糊调节电压矢量占空比 PMSM DTC

由图 17 可知,系统依然采用模糊控制器调节电压矢量占空比,但采用电压矢量选择策略来确定施加电压矢量。电压矢量选择策略如下:

$$\begin{cases} \angle U_{11} = 45^\circ \\ \angle U_{10} = 135^\circ - \frac{\theta}{2} \\ \angle U_{00} = 225^\circ \\ \angle U_{01} = 315^\circ - \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\angle U_{11}$ 、 $\angle U_{10}$ 、 $\angle U_{00}$ 、 $\angle U_{01}$ 分别为增加转矩、增加磁链电压矢量,增加转矩、减少磁链电压矢量,减少转矩、减少磁链电压矢量和减少转矩、增加磁链电压矢量在定子坐标系的角度; θ 为转矩角。

由式(3)可知,输出电压矢量角度为电压矢量选择区域的角平分线,从而确保输出电压矢量能够同时满足对磁链和转矩的增减定性控制^[15-16]。为了最大程度利用母线电压,令输出电

$$压矢量幅值为 \frac{\sqrt{3}}{3} U_{dc}。$$

相同仿真条件,改进模糊输出电压矢量占空比 PMSM DTC 系统电机转速、电机转矩、定子磁

链幅值和定子磁链轨迹如图 18~图 21 所示。模糊调节电压矢量占空比控制和改进模糊调节电压矢量占空比控制下转矩误差和磁链误差如图 22、图 23 所示。

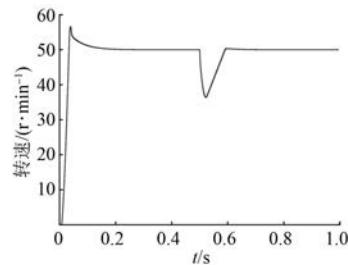


图 18 改进模糊调节电压矢量占空比控制下的电机转速

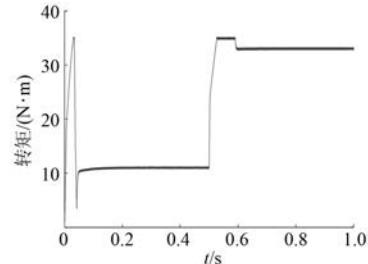


图 19 改进模糊调节电压矢量占空比控制下的电机转矩

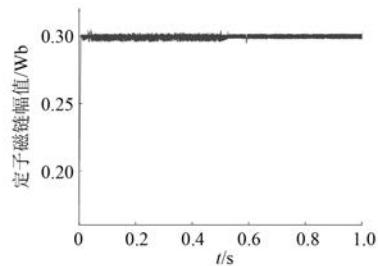


图 20 改进模糊调节电压矢量占空比控制下的定子磁链幅值

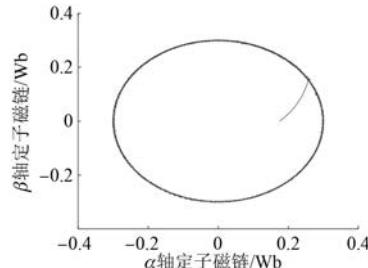


图 21 改进模糊调节电压矢量占空比控制下的定子磁链轨迹

仿真结果验证了改进模糊调节电压矢量占空

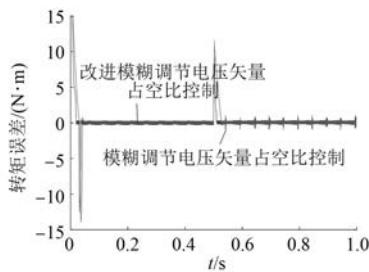


图 22 模糊调节电压矢量占空比控制和改进模糊调节电压矢量占空比控制下的转矩误差

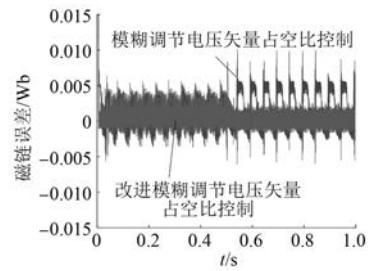


图 23 模糊调节电压矢量占空比控制和改进模糊调节电压矢量占空比控制下的磁链误差

比 PMSM DTC 的可行性。图 22 表明,由于采用电压矢量选择策略来选择电压矢量,改进模糊调节电压矢量占空比控制有效地抑制了大转矩下因开关表失效引起的转矩脉动。图 23 表明,使用电压矢量选择策略输出的电压矢量能够同时满足对磁链和转矩的增减定性控制,改进模糊调节电压矢量占空比控制可减小磁链脉动。但由图 22 可知,改进模糊调节电压矢量占空比控制在 0.5 s 后经过 0.092 8 s 才回到稳态,其转矩动态性能变差。

4 自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制

上文表明改进模糊调节电压矢量占空比控制可进一步减小转矩和磁链脉动,但动态性能较差。为了保证动态性能,本文提出自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制。当系统处于稳态时,采用改进模糊调节电压矢量占空比控制,以减小磁链和转矩脉动;当系统处于动态时,采用开关表控制,以提高动态性能。可采用转矩误差来判断系统状态。当转矩误差绝对值大于 0.5 N·m 时,系统处于动态,反之,系统处于静态^[17-18]。

相同仿真条件,自适应改进模糊输出电压矢

量占空比控制下,PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值、定子磁链误差和定子磁链轨迹如图 24~图 27 所示。

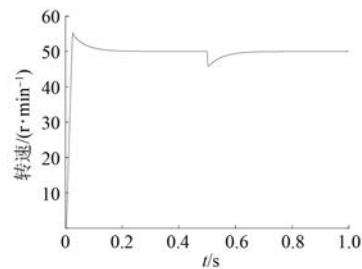


图 24 自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制下的电机转速

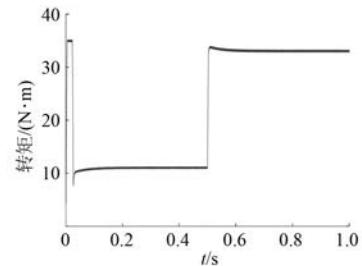


图 25 自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制下的电机转矩

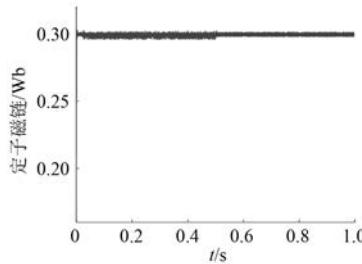


图 26 自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制下的定子磁链幅值

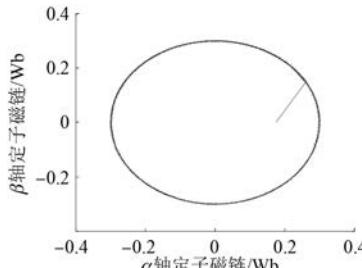


图 27 自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制下的定子磁链轨迹

定义转矩脉动均方根误差(RMSE)和磁链脉动均方根误差如下:

$$T_{\text{rip_RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (4)$$

$$\psi_{\text{rip_RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (5)$$

式中: n 为采样总个数。

定义转矩脉动系数 T_{RF} 和磁链脉动系数 F_{RF} 如下:

$$T_{\text{RF}} = \frac{\Delta T_{\text{PP}}}{T_{\text{av}}} \quad (6)$$

表 5 不同控制策略下的稳态仿真结果

控制策略	DTC	模糊调节占空比控制	改进模糊控制	自适应改进模糊控制
转矩脉动 RMSE/(N·m)	0.1~0.5 s	0.642 0	0.159 5	0.126 2
	0.6~1.0 s	0.002 1	0.003 6	0.000 8
磁链脉动 RMSE/Wb	0.1~0.5 s	0.002 2	0.001 9	0.001 7
	0.6~1.0 s	0.002 1	0.003 6	0.000 8
$\Delta T_{\text{PP}}/(N\cdot m)$	0.1~0.5 s	2.899 2	0.724 7	0.604 1
	0.6~1.0 s	3.393 8	2.044 5	0.535 3
$\Delta F_{\text{PP}}/\text{Wb}$	0.1~0.5 s	0.011 2	0.009 5	0.007 0
	0.6~1.0 s	0.011 3	0.015 9	0.004 0
T_{RF}	0.1~0.5 s	0.263 5	0.065 9	0.055 0
	0.6~1.0 s	0.102 8	0.061 9	0.016 2
F_{RF}	0.1~0.5 s	0.037 2	0.031 8	0.023 3
	0.6~1.0 s	0.037 7	0.053 5	0.013 3

表 5 表明:与 DTC 相比,模糊调节电压矢量占空比控制可有效减小转矩脉动 RMSE 和磁链脉动 RMSE。而改进模糊调节电压矢量占空比控制可进一步有效减小转矩脉动 RMSE 和磁链脉动 RMSE。当转矩较大时,开关表失效引起转矩脉动峰-峰值增大;模糊调节电压矢量占空比控制可有效抑制转矩脉动,但同样存在转矩较大时,开关表失效使得转矩脉动峰-峰值变大的问题。采用改进模糊调节电压矢量占空比控制可进一步减小磁链和转矩脉动,消除因开关表失效引起的转矩脉动。自适应改进模糊调节占空比控制的稳态控制效果与改进模糊调节电压矢量占空比控制基本相当。

上文仿真条件下,自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制与改进模糊调节电压矢量占空比

$$F_{\text{RF}} = \frac{\Delta F_{\text{PP}}}{F_{\text{av}}} \quad (7)$$

式中: ΔT_{PP} 为转矩脉动峰-峰值; T_{av} 为平均转矩; ΔF_{PP} 为磁链脉动峰-峰值; F_{av} 为与平均磁链。

稳态下,DTC、模糊调节电压矢量占空比控制、改进模糊调节电压矢量占空比控制和自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制下的 PMSM 系统转矩脉动 RMSE、磁链脉动 RMSE、转矩脉动峰-峰值 ΔT_{PP} 、磁链脉动峰-峰值 ΔF_{PP} 、转矩脉动系数 T_{RF} 和磁链脉动系数 F_{RF} 仿真结果如表 5 所示。

控制下的电机转速和电机转矩如图 28、图 29 所示。

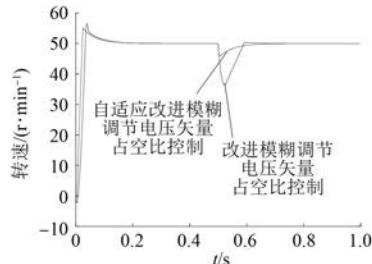


图 28 自适应改进模糊调节电压矢量占空比与改进模糊调节电压矢量占空比控制下的转速波形对比

图 28 和图 29 表明自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制在 0.5 s 后经过 0.004 4 s 回到稳态,比改进模糊控制经过 0.092 8 s 才回到稳态,动态性能提升了 95%,从而在保证稳态控制性能

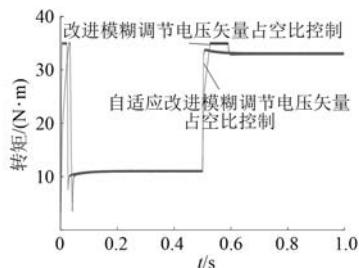


图 29 自适应改进模糊调节电压矢量占空比与改进模糊调节电压矢量占空比控制下的转矩波形对比

良好的基础上,有效地提升了动态性能。

5 结语

本文设计了模糊调节电压矢量占空比 PMSM DTC 系统,采用开关表选择电压矢量,采用模糊控制器确定电压矢量占空比。仿真结果表明,与传统 DTC 相比,可有效抑制磁链和转矩脉动,但同样存在转矩较大时开关表控制失效引起的转矩脉动问题。针对开关表控制失效问题和动态性能差的问题,2 次改进控制方法,最终,采用开关表与模糊调节电压矢量占空比的自适应切换控制:动态下,系统采用开关表控制,稳态下,系统采用模糊调节电压矢量占空比控制。仿真结果表明自适应改进模糊调节电压矢量占空比控制可在保证良好稳态性能的基础上,提升动态性能。

【参考文献】

- [1] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3) : 528.
- [2] 李耀华,马建,刘晶郁,等.电动汽车用永磁同步电机驱动系统控制策略比较研究 [J].汽车工程, 2013, 35(5) : 413.
- [3] 许家群,欧阳明高,唐任远.电动汽车用永磁同步牵引电动机直接转矩控制 [J].电工技术学报, 2006, 21(7) : 94.
- [4] 李耀华,刘卫国.永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动 [J].电机与控制学报, 2007, 11(2) : 148.
- [5] 李耀华,刘卫国.永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动抑制研究 [J].西北工业大学学报, 2007, 25(5) : 667.
- [6] 孙丹,贺益康,智大为.基于模糊逻辑的永磁同步电动机直接转矩控制 [J].电工技术学报, 2003, 18(1) : 33.
- [7] 卢达,赵光宙,李楠.包含零矢量的永磁同步电机直接转矩控制 [J].电机与控制学报, 2010, 14(9) : 1.
- [8] 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.
- [9] MIR S, ELBULUK M E. Precision torque control in inverter-fed induction machines using fuzzy logic [C]//Proceedings of PESC' 95-Power Electronics Specialist Conference, 1995.
- [10] BIRD I G, DE LA PARRA H Z. Fuzzy logic torque ripple reduction for DTC based AC drives [J]. Electronics Letters, 1997, 33(17) : 1501.
- [11] 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) : 150.
- [12] ROMERAL L, ARIAS A, ALDABAS E. Novel direct torque control (DTC) scheme with fuzzy adaptive torque-ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(3) : 487.
- [13] 李耀华,曲亚飞,孟祥臻,等.一种优化的永磁同步电动机直接转矩控制开关表 [J].微电机, 2017, 50(12) : 57.
- [14] 李耀华,曲亚飞,师浩浩,等.一种基于开关次数最小的含零电压矢量永磁同步电机直接转矩控制开关表 [J].电机与控制应用, 2018, 45(2) : 34.
- [15] 李耀华,马建,刘晶郁,等.永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域 [J].长安大学学报 (自然科学版), 2012, 32(1) : 95.
- [16] 李耀华,马建,刘晶郁,等.电动汽车用永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择策略 [J].电机与控制学报, 2012, 16(4) : 43.
- [17] 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.
- [18] 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.