

永磁同步电机变论域模糊直接转矩控制

姬嗣龙, 刘文生

(大连交通大学 电气信息学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 直接转矩控制(DTC)相比矢量控制转矩响应快,能够很好地适应对转矩响应要求较高的应用场合。但常规 DTC 存在转矩脉动、磁链脉动大和谐波电流较大的缺点,可能导致更高的定子铜耗,从而降低驱动效率。针对这一问题,以 DTC 基本原理为出发点,提出一种用磁链和转矩模糊控制器代替传统滞环比较器的控制策略。常规模糊控制器可能会出现模糊规则不足或得不到充分应用的情况,导致模糊控制效果变差,针对这一不足在转矩环加入变论域模糊控制。使用 MATLAB/Simulink 对变论域模糊 DTC 系统进行仿真。仿真结果表明:该变论域模糊控制系统能够有效地抑制转矩脉动、磁链脉动和谐波电流。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; 转矩脉动; 谐波电流; 模糊控制; 变论域

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)06-0027-06

Fuzzy Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor with Variable Domain

Ji Silong, Liu Wensheng

(School of Electronics and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The torque response of direct torque control (DTC) was faster than that of vector control. But conventional DTC had the disadvantages of torque ripple, flux ripple and large harmonic current, which may lead to higher copper loss of stator and lower driving efficiency. Based on the basic principle of DTC, a new control strategy, which used flux chain and torque fuzzy controller instead of traditional hysteresis comparator, was proposed to solve this problem. The conventional fuzzy controller may have insufficient fuzzy rules or insufficient application, which led to the deterioration of fuzzy control effect. The torque loop was added to the variable domain fuzzy control. The fuzzy DTC system was simulated by MATLAB/Simulink. The simulation results showed that the fuzzy control system could effectively suppress torque ripple, flux ripple and harmonic current.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); direct torque control (DTC); torque ripple; harmonic current; fuzzy control; variable domain

0 引言

随着永磁材料的不断发展,永磁同步电机(PMSM)在各种国民经济活动中逐渐得到广泛应用。相比异步电机, PMSM 功率密度提升了 18%~34%;功率因数达到 0.95;人均百公里能耗节能 7.32%。PMSM 转矩脉动会带来速度的波动,共振和声学噪声等问题,影响设备的可靠性。转矩脉动仅受转矩滞环宽度的影响,几乎与磁通

滞环的宽度无关。转矩脉动随转矩滞环带宽的变化而变化。然而,由于控制系统的离散特性,即使滞环控制器零带宽,仍可能存在转矩波动。另外,如果带宽减小,则逆变器开关频率增加,成比例地增加其开关损耗^[1]。

抑制转矩脉动引起振动的技术通常分为两种:(1)基于电机的最佳设计,短节距或分数槽节距绕组提供了良好的抑制转矩脉动的能力^[2];(2)抑制转矩脉动技术,基于不同控制器技术的

作者简介: 姬嗣龙(1994—),男,硕士研究生,研究方向为电力牵引与传动控制。

刘文生(1961—),男,硕士,教授,研究方向为电力牵引与传动控制。

主动控制方案。针对 PMSM 直接转矩控制 (DTC) 系统在抑制转矩脉动方面的研究, 专家学者们提出了多种方法。文献[3-6]介绍了几种较为典型控制方法: 基于离散空间矢量的 PMSM DTC 控制、基于空间矢量调制技术的 DTC 控制、基于占空比的 DTC 控制、基于模糊控制的 DTC 控制。基于离散空间矢量的 PMSM DTC 控制在一定程度上有效的抑制了系统的转矩脉动, 但随着转矩脉动的减小, 开关电压矢量选择表变得更加复杂, 从而使得控制系统更加复杂, 难以对系统的转矩脉动进行进一步的有效抑制。基于空间矢量调制技术的 DTC 控制通过空间矢量脉宽调制技术使逆变器的开关频率恒定, 系统的转矩、磁链脉动和谐波电流都能得到有效的改善, 但需要大量的计算, 影响了系统的实时性^[7]。基于占空比的 DTC 控制在对占空比系数进行计算时计算量较大^[8], 对系统的实时性产生影响。模糊控制具有良好的适应性, 广泛应用于实际工程, 但其受干扰和系统参数变化的影响, 物理论域并非固定不变, 而是随着系统干扰和参数的变化而变化, 导致固定论域的模糊控制器可能会存在模糊规则不足或得不到充分应用的情况, 不能充分发挥模糊控制系统的优势。文献[9-12]针对这一问题在矢量控制和永磁同步直线电机中采用了变论域模糊 PI 的方法, 通过模糊控制器对 PI 参数值及固定论域范围实时进行调整, 有效提高了模糊控制系统的控制性能。本文针对固定论域模糊控制器的不足, 在模糊 DTC 系统的转矩环中也引入变论域的控制方式, 以实现论域的自整定。

1 PMSM DTC

1.1 PMSM 数学模型

为了建立 PMSM 在 $dq0$ 坐标系下的数学模型, 首先假设: 忽略电机铁心的饱和; 不计电机中的涡流和磁滞损耗; 电机的电流为对称的三相正弦交流电等情况^[13]。

可得电压方程为

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q + R_s i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d + R_s i_q \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

式中: u_d, u_q —— d, q 轴定子电压分量;

ψ_d, ψ_q —— d, q 轴定子磁链分量;

ω_r ——转子角速度;

i_d, i_q —— d, q 轴定子电流分量;

L_d, L_q —— d, q 轴电感;

ψ_f ——转子磁链;

T_e ——电磁转矩;

p ——极对数。

1.2 DTC 系统

DTC 通过实时检测电机定子电压和电流来计算电磁转矩和定子磁链的大小, 并将通过计算得到的磁链、转矩大小与系统给定值进行比较, 可得定子磁链和电磁转矩偏差。根据其偏差来获得滞环控制器的输出信号。当偏差超过所设定的滞环控制器的环宽时, 根据定子磁链所处的空间位置, 通过对开关电压矢量表进行查询, 选取恰当的空间电压矢量来对逆变器进行控制^[14], 从而达到对电磁转矩迅速控制的目的。DTC 系统框图如图 1 所示。

2 模糊控制器的设计

由于 PMSM DTC 系统是一个非线性系统^[15], 难以精确地计算其数学模型, 同时难以对电磁转矩和定子磁链误差量给出最佳的分段边界, 因此采用基于语言规则的模糊推理方法来解决这一问题。变论域模糊逻辑的 PMSM DTC 方法将 PMSM 定子磁链误差和转矩误差模糊化为若干个模糊子集, 然后作为模糊控制器的输入, 通过模糊控制规则输出相应的信号。模糊控制器的引入克服了传统滞环控制的转矩脉动和磁链脉动的问题。将 PMSM 转矩误差和转矩误差变化率模糊化为若干个模糊子集作为变论域模块的输入量, 经过模糊运算输出相应的信号, 通过输出信号的改变来实现变论域的目的^[16]。

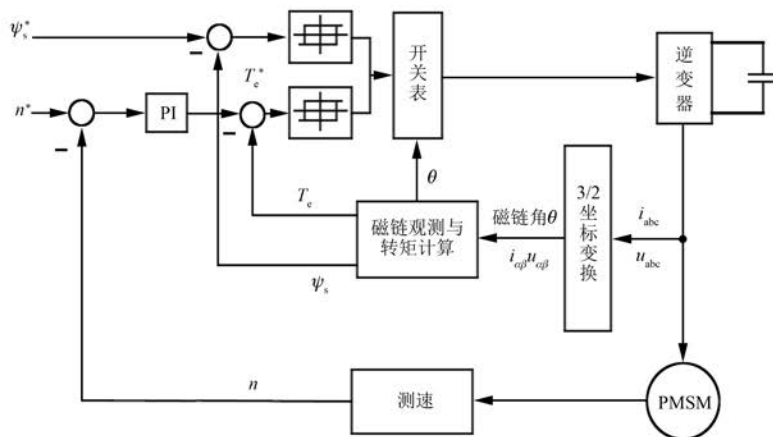


图 1 DTC 系统框图

2.1 $\Delta\varphi$ 和 ΔT_e 模糊控制器的设计

文献[17]采用三输入、单输出的模糊控制器,模糊规则多达 180 条。文献[18]采用三输入、单输出的模糊控制器,模糊规则为 32 条。模糊规则数量过多,在一定程度上增加了模糊控制器的复杂度,导致系统的响应速度降低。为了简化控制算法同时保持 DTC 系统快速的动态响应能力的优势,采用双输入、单输出的模糊控制器,其模糊规则可减少到 20 条,降低了模糊控制器的复杂度,提高了系统的动态响应能力。

系统磁链误差较小,模糊子集设定为“负大(NB)”、“负小(NS)”、“正小(PS)”、“正大(PB)”,其模糊论域设为 $[-0.01, 0.01]$ 。转矩误差的模糊子集设定为“负大(NB)”、“负小(NS)”、“零(Z)”、“正小(PS)”、“正大(PB)”,其模糊论域设为 $[-2, 2]$ 。

隶属度函数的类型决定了模糊控制的灵敏度,但关于其类型的选取没有统一的标准,需要在实际仿真过程中不断进行尝试。为了减小计算负担,采用常用的三角形隶属度函数,同时为了保证系统由远离平衡点的方向快速趋向于平衡点附近以及平衡点附近的控制精度,采用不等宽的等腰三角形隶属度函数,如图 2 所示。

采用普遍使用的 Mamdani 型模糊控制器,模糊推理采用 min-max 合成法则,则第 i 条规则的加权因子 α_i ^[19]:

$$\alpha_i = \min[\mu_{Ai}(\Delta\psi), \mu_{Bi}(\Delta T_e)] \quad (4)$$

$$\mu'_{p_i}(p) = \max[\alpha_i, \mu_{p_i}(P)] \quad (5)$$

根据磁链误差和转矩误差与模糊控制器输出

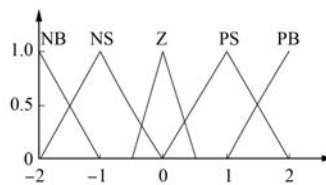


图2 隶属度函数分布图

量的关系,可以建立模糊控制器的模糊控制规则,如表 1 所示。

表 1 $\Delta\psi$ 和 ΔT_e 的模糊控制规则表

$\Delta\psi$	ΔT_e				
	PB	PS	Z	NS	NB
PB	P_1	P_1	P_2	P_3	P_3
PS	P_1	P_1	P_2	P_3	P_3
NS	P_4	P_4	P_5	P_6	P_6
NB	P_4	P_4	P_5	P_6	P_6

模糊规则采用语言型模糊规则: if ($\Delta\psi_i$ is A_i) and (ΔT_{ei} is B_i) then (output is P_i)。表 1 中 $P_1 \sim P_6$ 为模糊控制器的输出, 该输出要求为数值 1~6 的离散值, 故解模糊时采用适用于离散模糊论域的最大隶属度平均值法, 即:

$$u_{\text{mom}} = \frac{\sum_{j=1}^n u_j}{n} \quad (6)$$

2.2 变论域模块设计

把清晰值从物理论域 X 变换到模糊论域 N 上的变换系数,称为量化因子 k_j ;由模糊论域 N 再到物理论域 U 的变换系数称为比例因子 k_u [20]。

k_j 、 k_u 相当于对信号进行放大或缩小,量化因子和比例因子的过大或过小都会对系统产生不利影响,最终导致整个控制系统的控制性能降低。

在模糊论域不变的情况下,可以通过调节量化因子和比例因子来改变输入和输出的物理论域的范围,从而达到变论域的目的,改善系统的控制性能。

设量化因子和比例因子的初始值为 k_{j0} 、 k_{u0} ,经调整后分别为 k_j 、 k_u ,则:

$$\begin{cases} k_j = lk_{j0} \\ k_u = lk_{u0} \end{cases} \quad (7)$$

式中: l ——输出量伸缩因子。

常用单变量模糊控制器按维数可分为一维、二维和三维模糊控制器。一维模糊控制器的动态性能较差;三维模糊控制器的控制更加精细,但结构复杂,模糊推理时间较长。本文采用最常使用的二维模糊控制器,以转矩误差和转矩误差变化率作为该二维模糊控制器的 2 个输入,变论域模块的模糊控制器设计和 $\Delta\psi$ 、 ΔT_e 模糊控制器的设计相类似。定义转矩误差和转矩误差变化率的模糊集合均为 {NB、NS、Z、PS、PB},变论域模糊控制器的输出量伸缩因子 l 的模糊集合为 {B、M、S},变论域模糊控制器的模糊控制规则如表 2 所示。

图 3 所示为模糊控制器的输出量曲面观测图,在整个论域上直观地显示了输入量与输出量之间的关系。

3 系统仿真及分析

根据以上分析,在 MATLAB/Simulink 中建立

表 2 e 和 ec 的模糊规则控制表

e	ec				
	PB	PS	Z	NS	NB
B	S	S	M	S	S
PS	S	M	B	M	S
Z	M	B	B	B	M
NS	S	M	B	M	S
NB	S	S	M	S	S

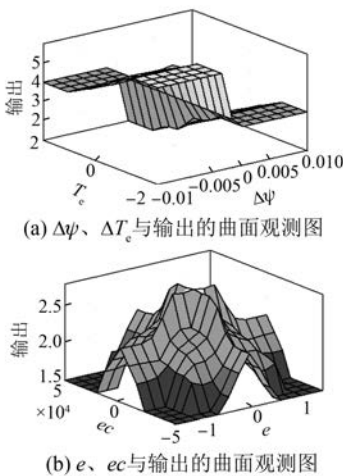


图 3 输出量曲面观测图

PMSM DTC 系统的模型。该系统使用模糊控制器代替常规 DTC 控制系统中的滞环,并在转矩环加入变论域模糊控制器,如图 4 所示。

仿真用 PMSM 主要参数如表 3 所示。

仿真时电机空载起动,在 0.05 s 时突加 1.5 N·m 负载,可得 3 种不同控制方式下的圆形

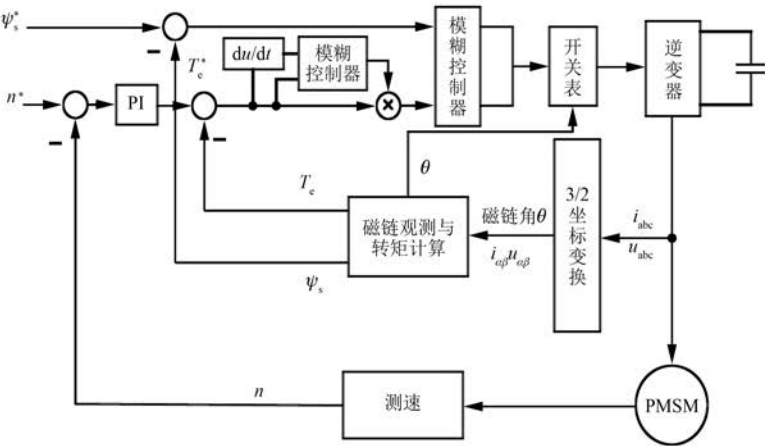


图 4 变论域模糊 DTC 控制系统框图

表 3 电机主要参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	1.2
d, q 轴电感 $L_d, L_q/H$	0.008 5
磁链 ψ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.000 8
极对数 p	4

旋转磁链,如图 5 所示。图 6 所示为 3 种控制方式下系统的电磁转矩误差图。图 7 所示为电机转速曲线及其局部放大图。

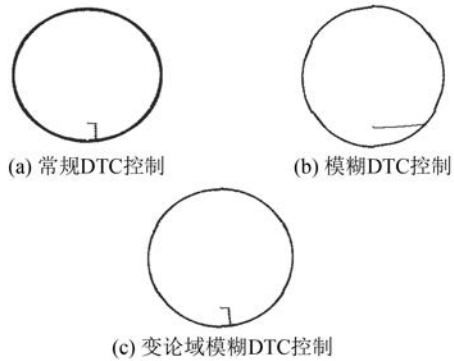


图 5 不同控制方式下磁链波形

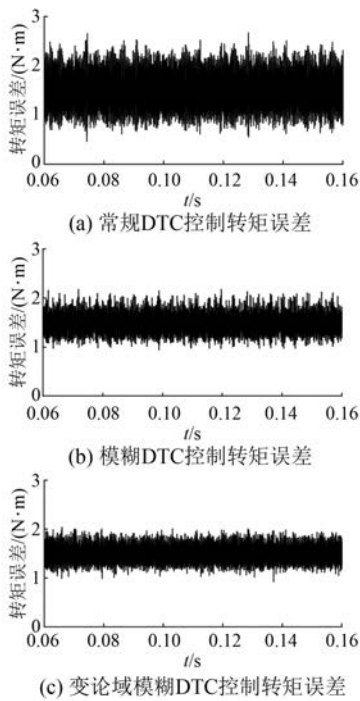


图 6 电磁转矩误差图

由图 5 可知,模糊 DTC 控制的磁链脉动明显

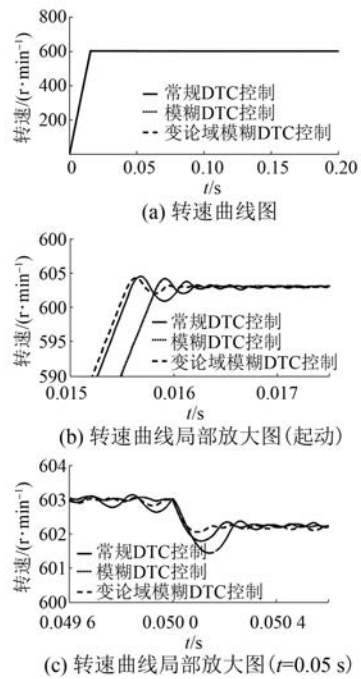


图 7 转速曲线及其局部放大图

小于常规 DTC 控制,变论域模糊 DTC 控制相比模糊 DTC 控制磁链得到了进一步的优化。由图 6 可知,变论域模糊 DTC 控制转矩脉动明显小于模糊 DTC 控制和常规 DTC 控制。同时,相比常规 DTC 控制,变论域模糊 DTC 控制的转矩超调量更小。由图 7 可知,变论域模糊 DTC 控制转速脉动得到了有效的抑制:由图 7(a)、图 7(b)可知,在起动过程中,变论域模糊 DTC 控制的超调量和转速波动小,能快速进入稳定状态。在 0.05 s 时突加负载转矩,变论域模糊 DTC 控制能够使速度和电磁转矩响应时间更快,波动更小。由上述结果可知,相比常规 DTC 控制,变论域模糊 DTC 控制动态响应、稳定性、鲁棒性等性能更好。

通过对常规 DTC 控制、模糊 DTC 控制、变论域模糊 DTC 控制方式下的定子电流进行 FFT 分析,可得 3 种控制方式下谐波电流的大小,如表 4 所示。

表 4 各控制方式谐波电流 %

控制方式	THD
常规 DTC 控制	7.34
模糊 DTC 控制	5.78
变论域模糊 DTC 控制	5.39

由表 4 可知,变论域模糊 DTC 控制相比常规 DTC 控制谐波电流减少了约 27%,有效地减小了系统的谐波电流。

4 结 语

本文分析了常规 PMSM DTC 的原理。为了减小常规 DTC 控制中转矩脉动、磁链脉动和谐波电流较大的问题,以及常规模糊控制 DTC 存在的论域固定的问题,提出了一种基于转矩环的变论域模糊 DTC 控制策略。通过 MATLAB/Simulink 仿真环境,对 3 种控制方式分别进行了建模仿真。仿真结果表明:变论域模糊 DTC 控制算法相比其他两种控制算法在一定程度上有效地减小了系统的转矩脉动、磁链脉动以及谐波电流,具有较好的稳态、动态性能和鲁棒性。稳态性能和动态性能的优化可以使整个系统运行更加平稳;同时,谐波电流的有效抑制,可以减少对供电网的污染以及对各电气设备的不利影响。

【参 考 文 献】

- [1] UDDIN M, HAFEEZ M. FLC-based DTC scheme to improve the dynamic performance of and IM drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 823.
- [2] JAHNS T M, SOONG W L. Pulsating torque minimisation for permanent magnet AC motor drives a review [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(2): 321.
- [3] 徐艳平, 钟彦儒. 基于离散空间矢量调制的永磁同步电机 DTC 方案 [J]. 电气传动, 2008, 38(9): 14.
- [4] KIRANKUMAR B, REDDY Y V S, VIJAYAKUMAR M. Multilevel inverter with space vector modulation: intelligence direct torque control of induction motor [J]. IET Power Electronics, 2017, 10(10): 1129.
- [5] ZHANG Y, ZHU J. A novel duty cycle control strategy to reduce both torque and flux ripples for DTC of permanent magnet synchronous motor drives with switching frequency reduction [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 3055.
- [6] 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.
- [7] 张华强, 王新生, 魏鹏飞, 等. 基于空间矢量调制的直接转矩控制算法研究 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(6): 13.
- [8] 孙德明, 杜明星, 刘志宏, 等. 一种改进的永磁同步电机直接转矩控制方法 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(2): 47.
- [9] 刘爽. 永磁同步电机伺服系统的自适应模糊控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [10] 崔家瑞, 李擎, 张波, 等. 永磁同步电机变论域自适应模糊 PID 控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊 1): 190.
- [11] 谢潜伟. 永磁同步直线电机的变论域模糊 PID 控制 [D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [12] ZHAO H, LUO P, WANG N, et al. Brushless DC motor control via fuzzy systems with variable contraction-expansion factor [C] // Chinese Control and Decision Conference, IEEE, 2018: 6199.
- [13] 於锋, 程明, 花为, 等. 基于 NPC 三电平九相磁通切换永磁电机的控制 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21(2): 18.
- [14] 石运才. 永磁同步电机直接转矩控制优化研究 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [15] 王辉航, 赵朝会, 万东灵, 等. 基于非奇异快速终端滑模的永磁同步电机转速和电流控制 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(11): 28.
- [16] 赵天宇, 苏庆于. 基于变论域模糊控制的无刷直流电机转速问题 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11): 6.
- [17] 王吉. 模糊直接转矩控制系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [18] 卢达. 永磁同步电机调速系统控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [19] GDAIM S, MTIBAA A, MIMOUNI M F. Design and experimental implementation of DTC of an induction machine based on fuzzy logic control on FPGA [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(3): 644.
- [20] 石辛民. 模糊控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

收稿日期: 2019-01-14