

基于模糊控制的永磁同步电机直接转矩控制^{*}

李耀华, 秦玉贵, 赵承辉, 周逸凡, 杨启东, 任佳越
(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 设计了基于模糊控制的永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)系统,采用模糊控制器取代了传统DTC系统中的磁链和转矩滞环比较器及开关表。仿真结果表明:模糊控制PMSM DTC系统运行良好,可实现四象限运行,与传统开关表相比,可有效减小转矩脉动和平均开关频率。研究了转矩误差论域和零电压矢量对模糊控制性能的影响,并基于转矩角对电压矢量作用的影响规律,提出了考虑转矩角的PMSM模糊直接转矩控制。仿真结果表明:在转矩角较大时,考虑转矩角的PMSM模糊DTC系统可有效减小转矩和磁链脉动,改善控制性能。

关键词: 永磁同步电机;模糊控制;直接转矩控制;转矩误差论域;零电压矢量;转矩角

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)11-0013-07

Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Torque Control Using Fuzzy Control^{*}

LI Yaohua, QIN Yugui, ZHAO Chenghui, ZHOU Yifan, YANG Qidong, REN Jiayue
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) direct torque control (DTC) system using fuzzy control was proposed which used fuzzy controllers to replace the hysteresis comparators for stator flux and torque and the switching table. Simulation results show that the proposed fuzzy control system can work properly and realize four-quadrant operation. Compared with the conventional switching table, fuzzy controller could decrease torque ripple and average switching frequency. The effects of universe of torque error and use of zero voltage vector on fuzzy control system were analyzed. Based on the effects of torque angle on voltage vector, a novel fuzzy control PMSM DTC system which took torque angle as the input parameter was proposed. Simulation results show that under large torque angles, the novel fuzzy control system can decrease the ripple of stator flux and torque and improve the control performance compared with conventional fuzzy control.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); fuzzy control; direct torque control (DTC); universe of torque error; zero voltage vector; torque angle

0 引言

直接转矩控制(DTC)采取定子磁链定向,利用离散的两点式滞环控制器直接对电机的磁链和转矩进行控制,使电机转矩响应快速,广泛应用于永磁同步电机(PMSM)^[1-2]。传统DTC中转矩和磁链调节均采用滞环控制器,使得转矩和磁链误

差在较大和较小时均选择同一电压矢量,导致系统转矩响应迟钝和转矩脉动增大。因此,DTC电压矢量选择应采用有差别控制策略。由于模糊控制适用于较难精确量化的控制领域,设计简单,鲁棒性强,可用于解决PMSM DTC传统开关表控制较为粗糙等问题。文献[3-6]采用模糊控制器替代DTC传统开关表,取得较好的控制效果,验

^{*} 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项目(300102228201)

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。

证了模糊控制的可行性。为了提升模糊控制性能,文献[7-8]将零电压矢量引入模糊控制,有效抑制了转矩脉动。文献[9]在传统开关表基础上引入模糊控制调节电压矢量作用时间,从而减小了转矩脉动。模糊控制的论域对控制性能具有重要的作用。不同于传统模糊控制论域固定,文献[10]设计了变论域的模糊控制器,提高了系统控制性能。

本文采用模糊控制器取代了传统 DTC 系统中的磁链和转矩滞环比较器及开关表;研究了转矩误差论域和零电压矢量对模糊控制性能的影响;基于转矩角对电压矢量作用的影响规律,设计了考虑转矩角输入的模糊控制器。仿真结果表明:转矩角较大时,考虑转矩角的 PMSM 模糊 DTC 系统可有效减小转矩和磁链脉动,改善控制性能。

1 基于模糊控制的 PMSM DTC 系统

基于模糊控制的 PMSM DTC 系统使用模糊控制器取代传统 DTC 中的磁链和转矩滞环比较器及开关表,如图 1 所示。

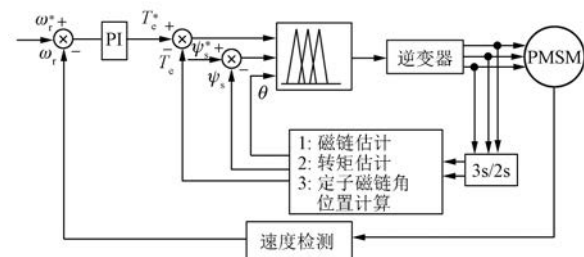


图 1 基于模糊控制的 PMSM DTC 系统

模糊控制控制器由模糊化、模糊推理和解模糊 3 部分组成,输入量为定子磁链误差 E_ψ 、转矩误差 E_T 和定子磁链角位置 θ ,输出量为逆变器开关状态信号,对应 7 个基本电压矢量。

磁链误差模糊量 E_ψ 论域为 $[-0.01, 0.01]$, 分为 3 个模糊子集 $\{P, Z, N\}$ 。磁链误差隶属度函数如图 2 所示。

转矩误差模糊量 E_T 论域为 $[-2, 2]$, 分为 5 个模糊子集 $\{PL, PS, Z, NS, NL\}$, 转矩误差隶属度函数如图 3 所示。

定子磁链角度 θ 模糊量论域为 $[-\pi, \pi]$, 可分为 12 个模糊子集 $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{12}\}$, 定子磁链

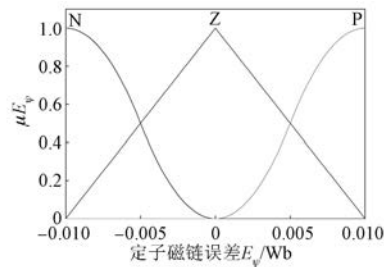


图 2 磁链误差隶属度函数

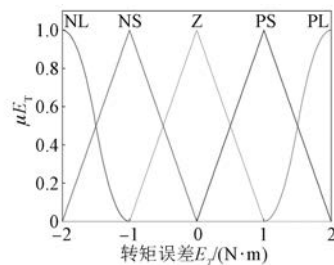


图 3 转矩误差隶属度函数

角位置隶属度函数如图 4 所示。

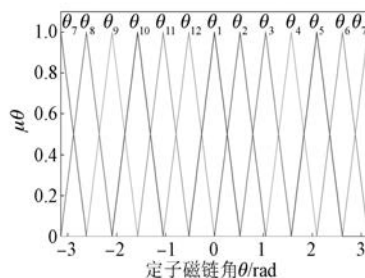


图 4 定子磁链角位置隶属度函数

模糊控制器输出为逆变器离散的 7 个电压矢量 $\{U_0, U_1, U_2, \dots, U_6\}$, 采用连续隶属度函数取代离散点集。电压矢量隶属度函数如图 5 所示。

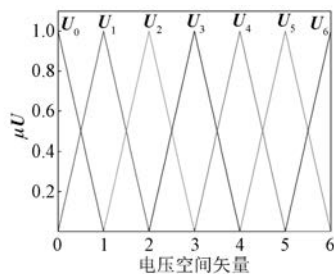


图 5 电压矢量隶属度函数

模糊控制规则基于 DTC 系统已有的控制经验确定,共包含 180 条规则,如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

E_ψ	E_T	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
N	NL	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5
	NS	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4
	Z	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	PS	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3
Z	PL	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2
	NL	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	NS	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	Z	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
P	PS	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2
	PL	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2
	NL	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	NS	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6
P	Z	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	PS	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1
	PL	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1

表 1 中的第 i 条控制规则为

R_i : 设 if $E_\psi = A_i$; $E_T = B_i$, $\theta = C_i$, 则 $U = U_i$ 。

其中 A_i 、 B_i 、 C_i 、 U_i 分别属于 E_ψ 、 E_T 、 θ 、 U 论域中的一个模糊变量。

模糊推理采用 Mamdani 型推理, 输出电压矢量如式(1)所示:

$$u_u(u) = \max_{1 \leq i \leq 180} [u_A(E_T) \cap u_B(E_\psi) \cap u_C(\theta) \cap u_u(U)] \tag{1}$$

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 、 u_u ——磁链误差、转矩误差、定子磁链角度和输出电压矢量的隶属度;

$\cap$ ——Mamdani 推理的取小算子;

u_u ——输出电压矢量。

解模糊采用 max-min 法, 取最大隶属度对应的输出量为输出电压矢量。

基于 MATLAB/Simulink 建立表贴式 PMSM 模糊 DTC 系统仿真模型。仿真参数如下: 系统采样周期为 5×10^{-5} s; 参考转速初始为 50 r/min, 5.0 s 时阶跃至 -50 r/min; 参考转矩初始为 4 N·m, 2.5 s 时阶跃至 -4 N·m, 7.5 s 时阶跃至 4 N·m; 参考定子磁链幅值为 0.3 Wb, 模糊控制器的转矩误差论域为 $[-2 \text{ N}\cdot\text{m}, 2 \text{ N}\cdot\text{m}]$, 磁链误差论域为 $[-0.01 \text{ Wb}, 0.01 \text{ Wb}]$ 。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	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
极对数 p	3
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

在表 1 的模糊控制规则表控制下, PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹仿真曲线如图 6~图 9 所示。

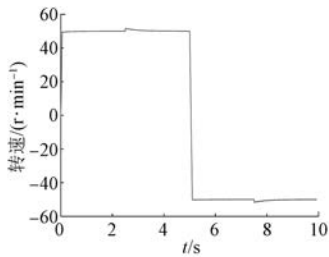


图 6 模糊控制转速仿真曲线

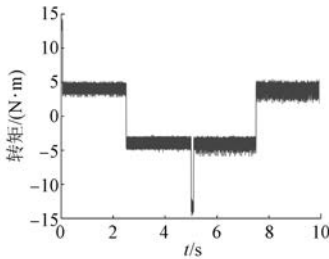


图 7 模糊控制转矩仿真曲线

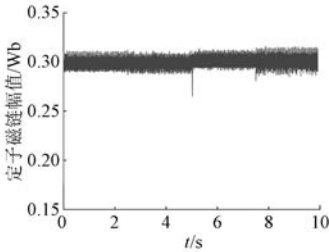


图 8 模糊控制定子磁链幅值仿真曲线

仿真结果表明: 模糊控制 PMSM DTC 系统运行良好, 且可实现四象限运行。

相同仿真环境条件下, 采用传统 DTC 开关表

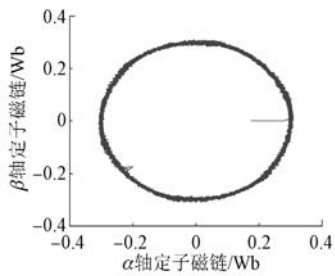


图9 模糊控制定子磁链轨迹仿真曲线

控制的 PMSM 定子磁链和转矩如图 10、图 11 所示。DTC 传统开关表如表 3 所示。 ϕ 和 τ 分别是定子磁链和转矩滞环比较器输出结果。

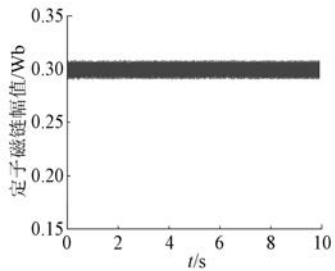


图10 传统开关表定子磁链波形

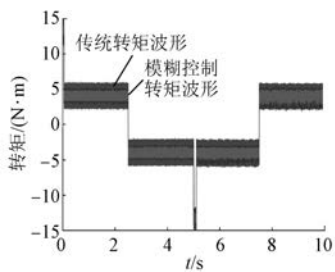


图11 模糊控制与传统开关表转矩波形对比

表3 DTC 传统开关表

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

稳态下 (0.2~2.4 s), 采用模糊控制与传统 DTC 开关表控制的转矩均方根误差 (RMSE)、磁链 RMSE 误差及平均开关频率如表 4 所示。转矩 RMSE、磁链 RMSE 和平均开关频率如式 (2)~式 (4) 所示:

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

$$\psi_{\text{rip_RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \tag{3}$$

$$f_{\text{ave}} = \frac{N_{\text{switching}}}{6 \times t} \tag{4}$$

式中: n ——采样个数;
 $N_{\text{switching}}$ ——逆变器开关总次数;
 t ——仿真时长。

表4 模糊控制与传统开关表控制下的仿真结果

控制策略	稳态转矩 RMSE/(N·m)	稳态磁链 RMSE/Wb	平均开关 频率/kHz
模糊控制	0.417 1	0.004 1	1.01
传统开关表	0.915 6	0.004 0	3.19

仿真结果表明:模糊控制的磁链控制性能与传统开关表基本相当,可有效减小转矩脉动和平均开关频率。

2 转矩误差论域的影响

由于 DTC 以转矩控制优先于磁链控制,磁链误差论域的变化对系统性能影响较小,但转矩误差论域的变化对系统性能有较大的影响。磁链误差论域为 $[-0.01 \text{ Wb}, 0.01 \text{ Wb}]$ 。不同转矩误差论域下的仿真结果如表 5 所示。

表5 不同转矩误差论域下的仿真结果

转矩误差 论域/(N·m)	稳态转矩 RMSE/(N·m)	稳态磁链 RMSE/Wb	平均开关 频率/kHz
$[-0.5, 0.5]$	0.817 1	0.006 3	4.14
$[-1, 1]$	0.730 7	0.005 1	3.46
$[-2, 2]$	0.417 1	0.004 1	1.01
$[-2.5, 2.5]$	0.418 1	0.004 4	0.83
$[-3, 3]$	0.468 3	0.004 5	0.79
$[-3.5, 3.5]$	0.546 3	0.004 5	0.79
$[-4, 4]$	0.638 9	0.004 4	0.78
$[-4.5, 4.5]$	0.742 3	0.004 5	0.80
$[-5, 5]$	0.850 1	0.004 5	0.79

由表 5 可知,随着转矩误差论域的增大,稳

态转矩 RMSE 先减小后增大,稳态磁链 RMSE 与开关频率减小到一定范围后基本保持稳定。因此,转矩误差的论域应合理设置。如果论域设置过小,则较少使用中间状态,减小使用零电压矢量来保持转矩,模糊控制规则表退化为传统开关表;如果论域设置过大,则当转矩脉动较大时,依然采用零电压矢量,无法实现调节转矩的效果,造成转矩脉动较大。综合考虑稳态转矩 RMSE、磁链 RMSE 与开关频率,本文将转矩误差论域设定为 $[-2\text{ N}\cdot\text{m}, 2\text{ N}\cdot\text{m}]$ 。

3 零电压矢量的影响

零电压矢量可减小磁链和转矩,且可通过选择开关状态有效减小开关次数,可有效用于 PMSM 模糊 DTC^[11-12]。本文设计了不含零电压矢量的模糊控制器,并与含零电压矢量的模糊控制器对比,验证了零矢量对提升模糊控制性能的重要性。

不含零电压矢量的模糊控制器输出电压矢量隶属度函数如图 12 所示。不含零电压矢量的模糊控制规则表如表 6 所示。

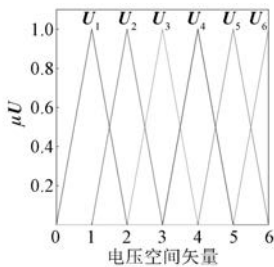


图 12 不含零电压矢量的模糊控制器输出电压矢量隶属度函数

磁链误差论域为 $[-0.01\text{ Wb}, 0.01\text{ Wb}]$,不同转矩误差论域下的不含零电压矢量模糊控制仿真结果如表 7 所示。

综合考虑稳态转矩 RMSE、磁链 RMSE 与开关频率,将不含零电压矢量模糊控制器的转矩误差论域设定为 $[-1\text{ N}\cdot\text{m}, 1\text{ N}\cdot\text{m}]$ 。不含零电压矢量模糊控制定子磁链幅值如图 13 所示。不含零电压矢量模糊控制与含零电压矢量模糊控制转矩波形对比如图 14 所示。

在转矩误差最优论域下,含零电压矢量模糊控制与不含零电压矢量模糊控制仿真结果如表 8 所示。

表 6 不含零电压矢量模糊控制规则表

E_ψ	E_T	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
N	NL	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5
	NS	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4
	Z	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4
	PS	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3
Z	PL	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2
	NL	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	NS	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4
	Z	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4
P	PS	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2
	PL	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2
	NL	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	NS	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6
	Z	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1
	PS	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1
	PL	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1

表 7 不含零电压矢量模糊控制仿真结果

转矩误差 论域/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	稳态转矩 RMSE/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	稳态磁链 RMSE/Wb	平均开关 频率/kHz
$[-0.25, 0.25]$	0.864 9	0.006 3	3.98
$[-0.5, 0.5]$	0.839 7	0.005 4	4.20
$[-1, 1]$	0.800 3	0.004 9	4.56
$[-1.5, 1.5]$	0.833 0	0.005 5	4.32
$[-2, 2]$	0.895 3	0.005 4	4.35
$[-3, 3]$	1.042 9	0.005 4	4.31

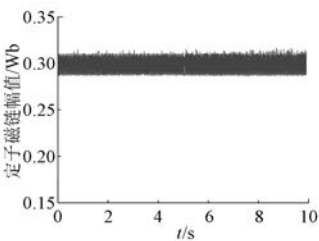


图 13 不含零电压矢量模糊控制定子磁链幅值

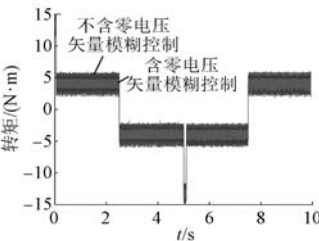


图 14 不含零电压矢量模糊控制与含零电压矢量模糊控制转矩波形对比

表 8 含零电压矢量与不含零电压矢量模糊控制
仿真结果

控制策略	稳态转矩 RMSE/(N·m)	稳态磁链 RMSE/Wb	平均开关 频率/kHz
含零电压矢量 模糊控制	0.417 1	0.004 1	1.01
不含零电压 矢量模糊控制	0.800 3	0.004 9	4.56

仿真结果表明:不含零电压矢量的模糊控制控制性能明显低于含零电压矢量模糊控制。因此,模糊控制规则表的设计应合理加入零电压矢量。

4 考虑转矩角的模糊控制

电压矢量对转矩的作用由施加电压矢量与转子磁链的夹角决定,转矩角会影响电压矢量对转矩的作用规律^[13-15]。基于转矩角对电压矢量作用的影响规律,本文提出考虑转矩角的 PMSM 模糊 DTC,将转矩角作为模糊控制器的一个输入。转矩角模糊量 E_δ 论域为 $[0, \pi/2]$,分为 2 个模糊子集 {P,N}。其隶属度函数如图 15 所示。

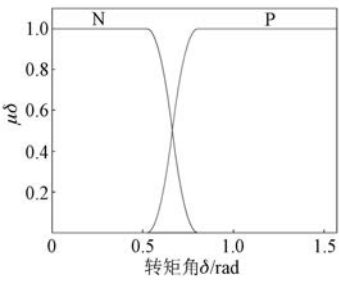


图 15 转矩角隶属度函数

当定子磁链位于 $(15^\circ, 45^\circ)$ 时, U_1 与定子磁链夹角是 $(-15^\circ, -45^\circ)$, 与转子磁链的夹角是 $(-15^\circ+\delta, -45^\circ+\delta)$, U_6 与定子磁链的夹角是 $(-75^\circ, -105^\circ)$, 与转子磁链的夹角是 $(-75^\circ+\delta, -105^\circ+\delta)$ 。转矩角较小时,当需要增大磁链、减小转矩时,模糊控制系统选择 U_1 ,但当转矩角较大时, U_1 可能会增大转矩,此时模糊控制系统应选择 U_6 增大磁链、减小转矩。由此可得考虑转矩角输入下的模糊控制规则表:当转矩角模糊输入为 N 时,模糊规则表与表 1 相同。当转矩角模糊输入为 P 时,模糊规则表如表 9 所示。

表 9 转矩角模糊输入为 P 时模糊规则表

E_ψ	E_T	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
N	NL	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4
	NS	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3
	Z	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	PS	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2
Z	PL	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2
	NL	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5
	NS	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	P	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
P	Z	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	PS	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1
	PL	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1
	NS	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5

设置仿真条件如下:参考转速恒为 50 r/min,参考转矩初始为 11 N·m,对应转矩角模糊输入为 N,1 s 时阶跃至 30 N·m,对应转矩角模糊输入为 P,仿真时长 2 s。考虑转矩角的模糊控制器控制下,PMSM 转矩角、定子磁链幅值和转矩如图 16~图 18 所示。考虑转矩角的表贴式 PMSM 模糊 DTC 系统与传统模糊控制的仿真结果对比如表 10 所示。

表 10 传统模糊控制与考虑转矩角模糊控制
仿真结果对比

名称	控制策略	0.2~0.8 s 时	1.2~2.0 s 时
稳态转矩 RMSE/(N·m)	传统模糊控制	0.423 5	0.442 8
	考虑转矩角模糊控制	0.423 5	0.399 8
稳态磁链 RMSE/Wb	传统模糊控制	0.004 0	0.003 9
	考虑转矩角模糊控制	0.003 9	0.003 2
稳态转矩峰- 峰值/(N·m)	传统模糊控制	2.379 1	2.655 0
	考虑转矩角模糊控制	2.440 1	1.988 8
稳态磁链峰- 峰值/Wb	传统模糊控制	0.022 4	0.021 5
	考虑转矩角模糊控制	0.021 4	0.017 7

仿真结果表明:当转矩角较小时,考虑转矩角的表贴式 PMSM 模糊 DTC 系统与传统模糊控制的控制性能基本相当;当转矩角较大时,考虑转矩角的表贴式 PMSM 模糊 DTC 系统系统可有效减

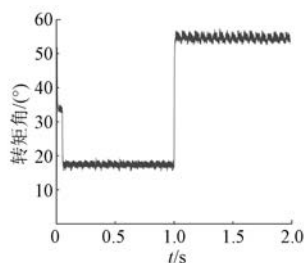


图 16 考虑转矩角模糊控制转矩角波形

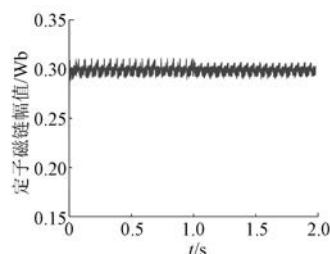


图 17 考虑转矩角模糊控制定子磁链幅值

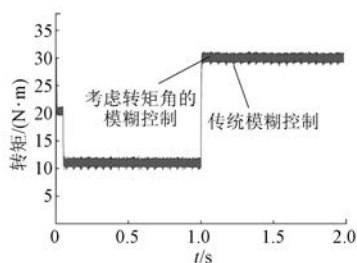


图 18 考虑转矩角模糊控制与传统模糊控制转矩波形对比

小转矩和磁链脉动,改善控制性能。

5 结 语

本文设计了基于模糊控制的 PMSM DTC 系统,采用模糊控制器取代了传统 DTC 系统中的磁链和转矩滞环比较器及开关表;研究了转矩误差论域和零电压矢量对模糊控制性能的影响;并基于转矩角对电压矢量作用的影响规律,提出考虑转矩角的 PMSM 模糊 DTC,得出结论如下。

(1) 本文设计的模糊控制器运行良好,可实现 PMSM 驱动系统的四象限运行。与开关表相比,模糊控制可有效减小转矩脉动和平均开关频率。

(2) DTC 以转矩优先,磁链误差论域的设置对模糊控制效果影响较小,但转矩误差论域对控

制性能具有重要的作用,需合理设置。若论域设置过小,则较少使用零电压矢量来保持转矩,模糊控制规则表实质退化为传统开关表;若论域设置过大,则当转矩脉动较大时依然采用零电压矢量,不能快速调节转矩,从而产生较大的转矩脉动。

(3) 零电压矢量对改善模糊控制 DTC 性能具有重要的作用,模糊控制规则表应合理使用零电压矢量。

(4) 转矩角对电压矢量的作用有一定的影响,也应作为模糊控制器的输入。当转矩角较大时,考虑转矩角的 PMSM 模糊 DTC 系统可有效减小转矩和磁链脉动。

【参考文献】

- [1] ZHONG L, RAHMAN M F, HU WY, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528.
- [2] 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(英文)[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 94.
- [3] 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.
- [4] 杨向宇, 朱卫华, 姚佳. 永磁同步电机模糊直接转矩控制仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 51.
- [5] 程飞, 过学迅, 别辉. 电动车用永磁同步电机的双模糊控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 18.
- [6] 周腊吾, 石书琪. 一种新型的 PMSM 直接转矩控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(8): 40.
- [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] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

(下转第 36 页)

- [3] 陈起旭,王庆元,徐俊,等.电动汽车用内置式 PMSM 的 MTPA 控制算法对比研究[J].微电机, 2017,50(4): 32.
- [4] YANG N, LUO G, LIU W, et al. Interior permanent magnet synchronous motor control for electric vehicle using look-up table [C] // Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012.
- [5] YANG L, YU K, YOU Q, et al. An optimized method based on maximum torque-per-ampere control for permanent magnet synchronous motor [C] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [6] 田以涛,王英.基于最大转矩电流比的永磁同步电动机矢量控制[J].电机与控制应用,2013,40(5): 25.
- [7] MIAO Y, PREINDL M, GE H, et al. MTPA fitting and torque estimation technique based on a new flux-linkage model for interior-permanent-magnet synchronous machines [C] // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2016.
- [8] ZHANG W, HUANG S, GAO J, et al. Curve analog control of maximum torque per ampere for permanent magnet synchronous motor used in electric vehicles [C] // 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011.
- [9] 曹晖,罗峰,周盼,等.永磁同步电机最大转矩电流比控制的仿真研究[J].微电机,2015,48(6): 55.
- [10] 张文娟,冯垚径,黄守道,等.基于迭代法的内置式永磁同步电机最大转矩/电流控制[J].电工技术学报,2013,28(增刊2):402.
- [11] 廖勇,伍泽东,刘刃.车用永磁同步电机的改进 MTPA 控制策略研究[J].电机与控制学报,2012, 16(1): 12.
- [12] 陈坤华,孙玉坤,吉敬华,等.内嵌式永磁同步电动机弱磁控制分段线性化研究[J].电工技术学报, 2015,30(24): 17.
- [13] UDDIN M N, RAHMAN M A. High-speed control of IPMSM drives using improved fuzzy logic algorithms [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007,54(1): 190.
- [14] 陈振锋,钟彦儒,李洁.嵌入式永磁同步电机自适应在线参数辨识[J].电机与控制学报,2010,14(4): 9.

收稿日期: 2019-08-20

(上接第 19 页)

- [11] 李耀华,刘卫国.零电压矢量在 PMSM 直接转矩控制系统中的应用[J].电力电子技术,2010,44(9): 50.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

收稿日期: 2019-07-30

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部