

永磁同步电机直接转矩控制双模糊控制系统*

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

摘 要: 设计了永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)双模糊控制系统,采用模糊控制器同时控制电压矢量角度和电压矢量幅值。一个模糊控制器取代传统DTC系统中的磁链和转矩滞环比较器及开关表来输出基本电压矢量,即电压矢量角度;另一个模糊控制器输出基本电压矢量作用时间,即电压矢量幅值。仿真结果表明:PMSM DTC双模糊控制系统运行良好,可实现四象限运行。与仅采用模糊控制输出电压矢量角度或电压矢量幅值控制相比,双模糊控制系统可有效抑制转矩和磁链脉动。

关键词: 永磁同步电机;模糊控制;直接转矩控制;零电压矢量

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)07-0009-08

doi: 10.12177/emca.2020.061

Double Fuzzy Control of PMSM DTC System*

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

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) direct torque control (DTC) system using double fuzzy control is proposed. Fuzzy control is applied to the determination of both the voltage vector and the time duration of applying voltage vector at the same time. The PMSM DTC system uses one fuzzy controller to replace the hysteresis comparators of torque and stator flux and the switching table in traditional DTC to output basic voltage vectors. Another fuzzy controller is used to determine the time duration of applying voltage vector. Simulation results show that the proposed double fuzzy control system can work properly and four-quadrant operation can be realized. Compared with the system only using one fuzzy controller to output the voltage vector or the time duration of applying voltage vector, the double fuzzy control system can effectively suppress torque and flux ripple.

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

0 引 言

直接转矩控制(DTC)采用定子磁链定向,利用两点式滞环控制器直接对电机的磁链和转矩进行控制,使电机快速响应,目前在永磁同步电机(PMSM)上已获得了广泛的应用^[1-4]。传统DTC中转矩和磁链调节采用滞环控制器,使得在转矩

和磁链误差较大或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。DTC的电压矢量选择应采用有差别的控制策略。并且,在传统DTC控制下,开关表选择的电压矢量作用时间固定,从而导致磁链和转矩实际控制的超调,也需要对电压矢量实际作用时间进行调节。模糊控制以语言变量代替常规的数学模型,推理过程

收稿日期: 2020-03-23; 收到修改稿日期: 2020-05-16

* 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); 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。

模仿人类的控制思维,借鉴专家的知识经验,可以处理复杂的控制问题,在 PMSM DTC 领域成为研究的热点之一。文献[5-7]采用模糊控制器替代传统开关表选择电压矢量。为了提升模糊控制性能,文献[8-9]将零电压矢量引入至模糊控制来减小转矩脉动。文献[10]将转矩角也作为模糊控制器的输入,改善了转矩角较大时的系统性能。上述文献采用模糊控制器取代开关表输出电压矢量,但电压矢量作用时间依然为整个采样周期。文献[11-12]使用模糊控制器控制电压矢量的作用时间,即采用模糊控制器输出电压矢量幅值,电压矢量角度的选择依然采用开关表。

以上研究均只使用一个模糊控制器用于确定输出电压矢量角度或确定输出电压矢量幅值。本文分别研究了模糊输出电压矢量角度和模糊输出电压矢量幅值 PMSM DTC 系统,并设计了 PMSM DTC 双模糊控制系统,采用一个模糊控制器输出电压矢量角度,另一个模糊控制器输出电压矢量幅值。仿真结果表明:PMSM DTC 双模糊控制系统运行良好,可实现四象限运行。与仅采用模糊控制输出电压矢量或电压矢量作用时间控制相比,双模糊控制系统可有效抑制转矩和磁链脉动。

1 模糊输出电压矢量角度 PMSM DTC 系统

模糊输出电压矢量角度 PMSM DTC 系统如图 1 所示。系统采用一个模糊控制器代替传统 DTC 系统中的磁链、转矩滞环比较器和开关表来输出不同角度的基本电压矢量。模糊控制器由模糊化、模糊推理和解模糊 3 部分组成,其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 7 个基本电压矢量 ($U_0 \sim U_6$)。

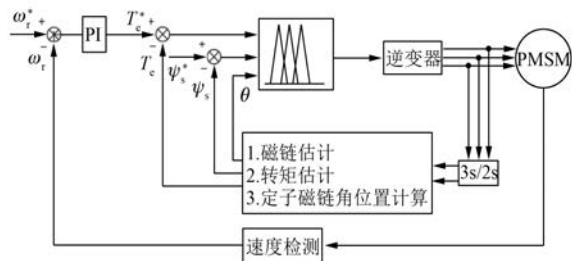


图 1 模糊输出电压矢量角度 PMSM DTC 系统

磁链误差模糊量 E_ψ 论域为 $[-0.01 \text{ Wb},$

$0.01 \text{ Wb}]$,分为 3 模糊子集 $\{P, Z, N\}$,隶属度函数如图 2 所示。

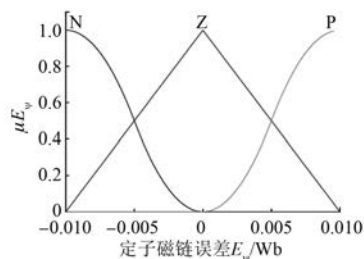


图 2 输出电压矢量角度模糊控制器磁链误差隶属度函数

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

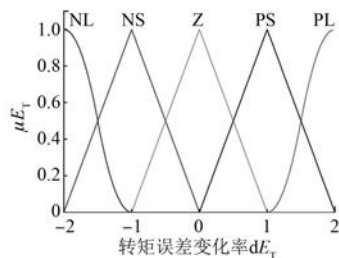


图 3 输出电压矢量角度模糊控制器转矩误差隶属度函数

定子磁链角度模糊量 θ 论域为 $[-\pi, \pi]$ 。为了减少模糊规则数和模糊计算矩阵,将定子磁链角度设置为 6 个模糊子集 $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6\}$,隶属度函数如图 4 所示。

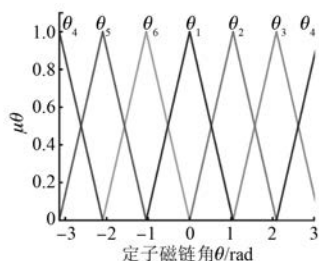


图 4 输出电压矢量角度模糊控制器定子磁链角位置隶属度函数

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,隶属度函数如图 5 所示。

模糊控制规则基于 DTC 系统已有的控制经验确定,如表 1 所示。共包含 90 条规则。由于零电压矢量可由 2 个开关状态(000 或 111)生成,具

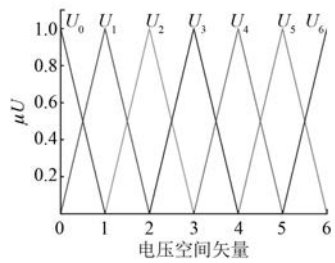


图5 输出电压矢量角度模糊控制器电压矢量隶属度函数

体选择以开关次数最小为原则^[13-14]。

表 1 输出电压矢量角度模糊控制器模糊控制规则表							
E_ψ	E_T	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
N	NL	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4
	NS	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3
	Z	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	PS	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
	PL	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
Z	NL	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
	NS	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
	Z	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	PS	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	PL	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
P	NL	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
	NS	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
	Z	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
	PS	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
	PL	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1

表 1 模糊控制中的第 i 条控制规则如下：
 R_i : 如果 $E_\psi = A_i, E_T = B_j, \theta = C_k$, 则 $U = U_n$
(1)

式中: A_i, B_j, C_k, U_n 分别属于 E_ψ, E_T, θ, U 论域中的一个模糊变量, $i = 1 \sim 3, j = 1 \sim 5, k = 1 \sim 6, n = 0 \sim 6$ 。

模糊推理采用 Mamdani 型推理,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;直流母线电压为 312 V。转速 PI 调节器参数为: $K_p = 5, K_i = 100$, PI 调节器输出上下限为 $[-30, 30]$ 。参考转速初始为 50 r/min, 1 s 时阶跃至 -50 r/min。负载转矩初始为

20 N·m, 0.5 s 时阶跃至 -20 N·m, 1.5 s 时阶跃至 20 N·m。参考定子磁链幅值为 0.3 Wb。仿真总时长为 2 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	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
极对数 p	4
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.089
黏滞阻尼 $F/(N \cdot m \cdot s)$	0.005

在模糊输出电压矢量角度控制下, PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值、定子磁链轨迹和 A 相定子电流如图 6~图 10 所示。

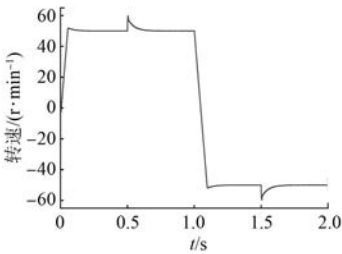


图 6 模糊输出电压矢量角度控制下的电机转速

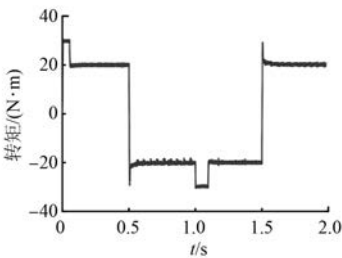


图 7 模糊输出电压矢量角度控制下的电机转矩

仿真结果表明: PMSM 模糊 DTC 系统运行良好, 可实现四象限运行, 但转矩和磁链脉动较大。

2 模糊输出电压矢量幅值 PMSM DTC 系统

为了减小磁链和转矩脉动, 使用开关表确定输出电压矢量角度, 使用模糊控制器确定基本电压矢量幅值, 模糊输出电压矢量幅值 PMSM DTC

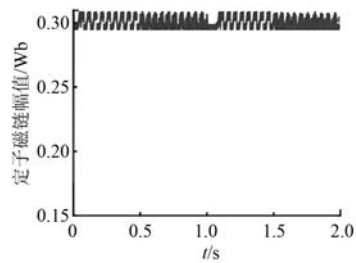


图 8 模糊输出电压矢量角度控制下的定子磁链幅值

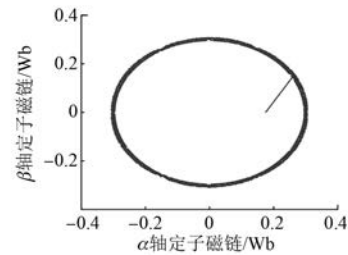


图 9 模糊输出电压矢量角度控制下的定子磁链轨迹

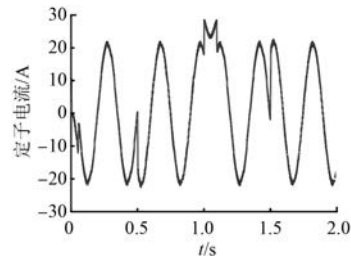


图 10 模糊输出电压矢量角度控制下的 A 相定子电流

系统结构如图 11 所示。

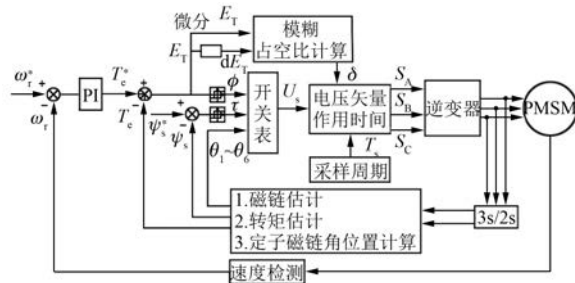


图 11 模糊输出电压矢量幅值 PMSM DTC 系统

输出电压矢量角度的开关表如表 3 所示。其中, ϕ 和 τ 是定子磁链和转矩滞环比较器的输出结果^[15-16]。

确定输出电压矢量幅值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

误差 E_T 和转矩误差变化率 dE_T , 输出量为电压矢量占空比 $\delta(0 \leq \delta \leq 1)$, 其与采样周期相乘即可得到基本电压矢量的实际作用时间。每个采样周期内, 非零电压矢量作用时间以外的时间由零电压矢量填充。

表 3 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

转矩误差模糊量 E_T 论域为 $[-0.5 \text{ N} \cdot \text{m}, 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}]$, 分为 5 个模糊子集 {NB, NS, Z, PS, PB}, 其隶属度函数如图 12 所示。

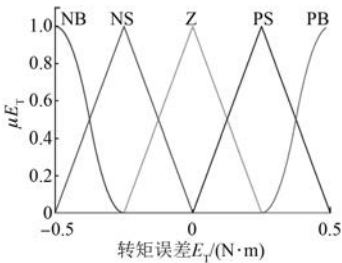


图 12 输出电压矢量幅值模糊控制器
转矩误差隶属度函数

转矩误差变化率 dE_T 论域为 $[-2, 2]$, 分为 5 个模糊子集 {NB, NS, Z, PS, PB}, 其隶属度函数如图 13 所示。

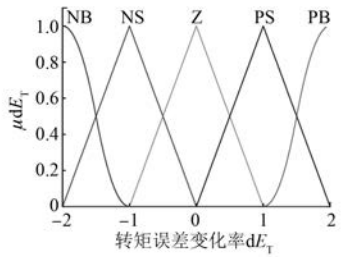


图 13 输出电压矢量幅值模糊控制器
转矩误差变化率隶属度函数

电压矢量占空比 δ 的论域为 $[0, 1]$, 分为 5 个模糊子集 {ZL, SL, ML, RL, VL}, 隶属度函数如图 14 所示。

根据转矩误差和转矩误差变化率, 制定以下模糊控制规则。当转矩误差为 Z 时, 保持转矩不

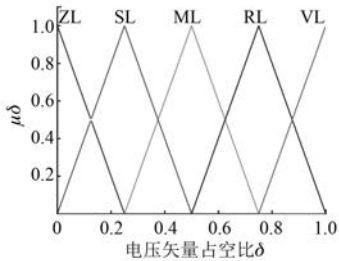


图 14 输出电压矢量幅值模糊控制器电压
矢量占空比隶属度函数

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保持转矩。当转矩误差为 NB、转矩误差变化率为 NB 时,即转矩需要较大减小,转矩误差变化率较大减小时,转矩误差与转矩误差变化率的变化方向一致,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,即转矩需要较大减小、但转矩误差变化率保持不变时,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,即转矩需要较大减小、转矩误差变化率较小地增大,由于转矩误差变化率会抵消部分转矩的需求,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,转矩误差变化率较大地增大,抵消了更大部分转矩需求,选择 SL 可满足要求。由此可推出其他模糊控制规则,如表 4 所示。

表 4 输出电压矢量幅值模糊控制器模糊控制规则表

E_T	dE_T				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	VL	RL	ML	ML	SL
NS	RL	ML	SL	SL	ML
Z	ZL	ZL	ZL	ZL	ZL
PS	ML	SL	SL	ML	RL
PB	SL	ML	RL	VL	VL

表 4 中第 i 条控制规则如下:
 R_i : 如果 $E_T = A_i, dE_T = B_i$, 则 $\delta = \delta_i$ (2)
式中: A_i, B_i, δ_i 分别属于 E_T, dE_T, δ 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:

$$\delta = \max_{1 \leq i \leq 25} [u_A(E_T) \cap u_B(dE_T) \cap u_\delta(\delta)] \quad (3)$$

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。

在相同仿真环境条件下,模糊输出电压矢量幅值控制下的 PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值、定子磁链轨迹和 A 相定子电流如图 15~图 19 所示。

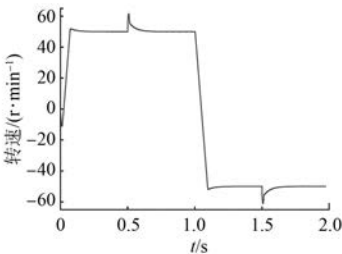


图 15 模糊输出电压矢量幅值控制下的电机转速

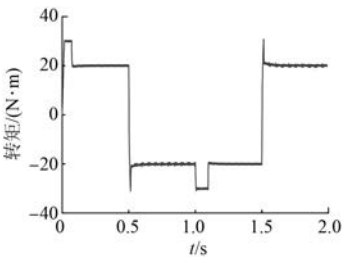


图 16 模糊输出电压矢量幅值控制下的电机转矩

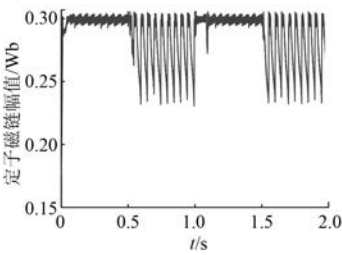


图 17 模糊输出电压矢量幅值控制下的定子磁链幅值

仿真结果表明:模糊输出电压矢量幅值 PMSM DTC 系统运行良好,可实现四象限运行,但在发电状态时,会出现较大的磁链脉动。这是由

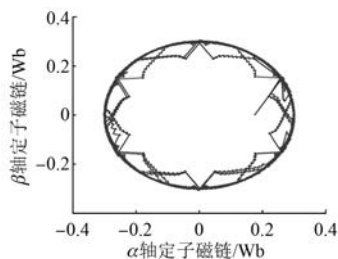


图 18 模糊输出电压矢量幅值控制下的定子磁链轨迹

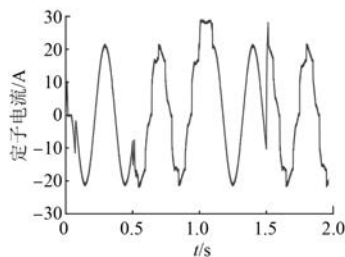


图 19 模糊输出电压矢量幅值控制下的 A 相定子电流

于当电机处于发电状态时,转矩角变化对转矩的影响与定子磁链幅值变化对转矩的影响不一致,减弱了施加零电压矢量对转矩的作用。此时零电压矢量对转矩减小的效果极其微弱。由于模糊控制器没有考虑磁链误差,当转矩误差为 ZL 时,输出占空比为零,等同于输出零电压矢量。由于零电压矢量对转矩影响很小,需要长时间施加零电压矢量,才能跳出该模糊控制规则,从而造成较大的磁链脉动^[17-18]。

3 PMSM 双模糊 DTC 系统

为了进一步减小磁链和转矩脉动,提出 PMSM 双模糊 DTC 系统。分别使用一个模糊控制器确定输出电压矢量角度和一个模糊控制器确定输出电压矢量幅值。PMSM 双模糊 DTC 系统结构如图 20 所示。

双模糊控制系统用于确定输出电压矢量角度的模糊控制器转矩误差论域为 $[-0.5 \text{ N} \cdot \text{m}, 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}]$,隶属度函数如图 21 所示。其余均与上文使用的模糊控制器一致。

为了减小磁链脉动,用于确定输出电压矢量幅值的模糊控制器输入量增加定子磁链误差 E_ψ 。定子磁链误差模糊量 E_ψ 论域为 $[-0.01 \text{ Wb}, 0.01 \text{ Wb}]$,分为 3 个模糊子集 $\{N, Z, P\}$,隶属度

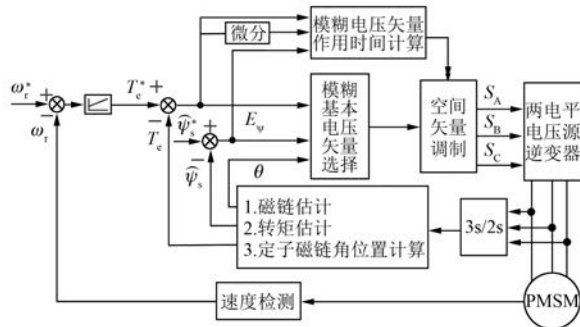


图 20 PMSM 双模糊 DTC 系统

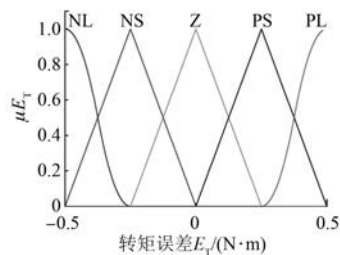


图 21 双模糊系统输出电压矢量角度模糊控制器转矩误差隶属度函数

函数如图 22 所示。

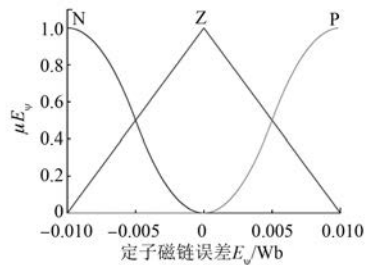


图 22 双模糊系统输出电压矢量幅值模糊控制器磁链误差隶属度函数

输出电压矢量幅值模糊控制器的转矩误差和转矩误差变化率隶属度函数与上文相同。输出电压矢量占空比 δ 论域为 $[0, 1]$,依然分为 5 个模糊子集 $\{ZL, SL, ML, RL, VL\}$,但为了减小转矩波动,将隶属度函数中的 SL、ML 和 RL 子集代表的占空比减小,隶属度函数如图 23 所示。

为了提升系统控制效果,当磁链误差隶属度函数不同时,本文设计了不同的模糊控制表。

当磁链误差为 Z 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,依然采用表 4 的模糊控制规则表。

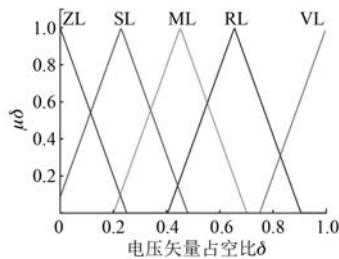


图 23 双模糊系统输出电压矢量幅值模糊控制器
电压矢量占空比隶属度函数

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。表 4 中,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,只满足转矩需求,不完全满足磁链需求,会产生较大的磁链波动,将表 4 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,系统再采用表 4 施加零电压矢量。

在转矩误差 E_T 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,将表 4 中的 SL 变为 ML,保证磁链能够迅速增大或减小。当转矩误差 E_T 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,无需调整。由此可得,当磁链误差为 N 或 P 时,模糊控制表如表 5 所示。模糊推理和解模糊与表 4 方法相同。

表 5 双模糊系统输出电压矢量幅值模糊控制规则表
(磁链误差为 N 或 P)

E_T	dE_T					
	NB	NS	Z	PS	PB	
NB	VL	RL	ML	ML	SL	
NS	RL	ML	SL	SL	ML	
Z	ML	ML	ML	ML	ML	
PS	ML	ML	ML	ML	RL	
PB	ML	ML	RL	VL	VL	

相同仿真环境条件下,双模糊控制下的 PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值、定子磁链轨迹和 A 相定子电流如图 24~图 28 所示。

仿真结果表明:PMSM 双模糊控制系统运行良好,可以实现四象限运行。

定义转矩脉动系数 T_{RF} 和磁链脉动系数 F_{RF}

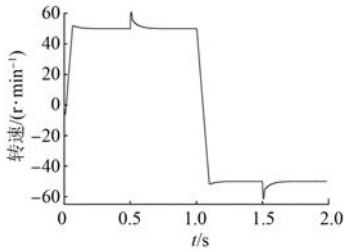


图 24 双模糊控制下电机转速

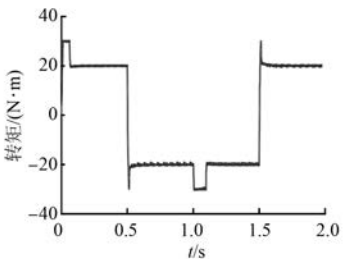


图 25 双模糊控制下电机转矩

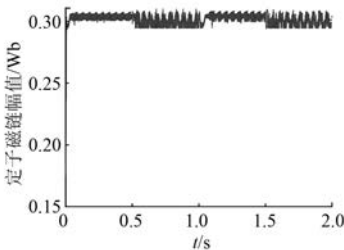


图 26 双模糊控制下定子磁链幅值

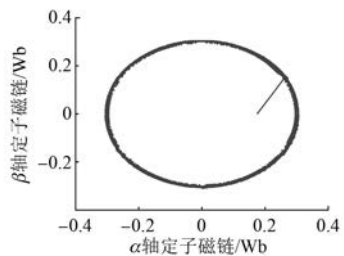


图 27 双模糊控制下定子磁链轨迹

评价电机的转矩脉动和磁链脉动程度。 T_{RF} 和 F_{RF} 分别为转矩峰峰值 ΔT_{PP} 与平均转矩 T_{av} 比值及磁链峰峰值 ΔF_{PP} 与平均磁链 F_{av} 比值,表达式如下:

$$T_{RF} = \frac{\Delta T_{PP}}{T_{av}} \tag{4}$$

$$F_{RF} = \frac{\Delta F_{PP}}{F_{av}} \tag{5}$$

在仅采用模糊输出电压矢量角度、仅采用模

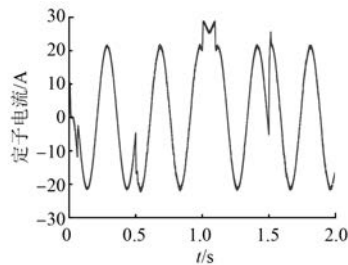


图 28 双模糊控制下 A 相定子电流

模糊输出电压矢量幅值及双模糊控制下,PMSM 系统的转矩脉动系数 T_{RF} 和磁链脉动系数 F_{RF} 分别如表 6~表 8 所示。

表 6 模糊输出电压矢量角度控制下的仿真结果

仿真时间/s	T_{RF}	F_{RF}
0.2~0.4	0.070 0	0.048 2
0.6~0.8	0.155 6	0.047 4
1.2~1.4	0.127 9	0.048 9
1.6~1.8	0.092 2	0.046 1

表 7 模糊输出电压矢量作用幅值控制下的仿真结果

仿真时间/s	T_{RF}	F_{RF}
0.2~0.4	0.043 4	0.023 5
0.6~0.8	0.062 8	0.260 8
1.2~1.4	0.044 7	0.022 1
1.6~1.8	0.054 0	0.230 0

表 8 双模糊控制下的仿真结果

仿真时间/s	T_{RF}	F_{RF}
0.2~0.4	0.032 3	0.027 5
0.6~0.8	0.077 8	0.054 1
1.2~1.4	0.060 2	0.034 7
1.6~1.8	0.054 7	0.051 1

与仅采用模糊控制输出电压矢量角度相比,除个别区域外,双模糊控制系统转矩脉动系数和磁链脉动系数均较小,特别是转矩脉动得到显著抑制。与仅采用模糊控制输出电压矢量幅值相比,双模糊控制系统转矩控制效果基本相当,可明显抑制发电状态时的磁链脉动。个别区域内双模糊控制的转矩脉动系数或磁链脉动系数略大的原因是双模糊控制中输出电压矢量幅值模糊控制器增加了磁链误差输入,不再仅考虑转矩控制。因此,在抑制一方脉动的同时,会牺牲另一方的控制性能,导致转矩脉动或转矩脉动略有增大。

4 结 语

本文分别研究了模糊输出电压矢量角度和模糊输出电压矢量幅值 PMSM DTC 系统,并设计了 PMSM DTC 双模糊控制系统,采用一个模糊控制器输出电压矢量角度,另一个模糊控制器输出电压矢量幅值。仿真结果表明:PMSM DTC 双模糊控制系统运行良好,可实现四象限运行。与仅采用模糊控制输出电压矢量角度或电压矢量作用时间相比,双模糊控制系统可有效抑制转矩和磁链脉动。

【参考文献】

[1] 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.

[2] 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.

[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(英文)[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7): 94.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 王军,彭宏. 永磁同步电动机模糊直接转矩控制的研究 [J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(3): 332.

[10] 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.

(下转第 28 页)

电压均衡控制策略有效性,电压电流混合磁链观测器估算的转速、转子磁链、转子磁链位置角的准确性,以及无速度传感器矢量控制的有效性,为高压大功率传动应用领域提供技术保障。后续研究工作围绕实际 H 桥级联变频器样机拖动笼型异步电机进行变频启动和调速控制展开,验证了文中所采用的核心控制技术的有效性和可靠性。研究了其他拓扑结构的多电平变频器与 H 桥级联变频器的性能差别,以及分别应用在笼型异步电机变频启动、调速场合下的优缺点,为相关技术人员提供借鉴。

【参考文献】

- [1] 李新元,马俊,高鹏,等. 基于级联型逆变器的感应电机无速度传感器矢量控制[J]. 电机与控制应用,2019,46(7):26.
- [2] 钱诗宝,杨奇,张裕峰,等. 级联逆变器异步电机无速度传感器矢量控制[J]. 大电机技术,2013(5):34.
- [3] 高志刚,冬雷,李永东,等. 基于高频变压器的背靠背级联 H 桥型变换器[J]. 电工技术学报,2013,28(6):133.
- [4] 杨景明,王亚超,杨波,等. 基于模糊自适应扩展卡尔曼滤波器的异步电机无速度传感器控制[J]. 电机与控制应用,2019,46(6):44.
- [5] 张家明,张利军. 异步电机旋转高频电压注入无传感器矢量控制[J]. 电力电子技术,2019,53(3):1.
- [6] 刘婷,黄守道,邓秋玲,等. 双馈风力发电机无速度传感器控制研究[J]. 控制工程,2013,20(5):844.
- [7] 杨有涛,彭国平,张普雷,等. 载波移相调制技术在级联 H 桥 STATCOM 中应用[J]. 电力电子技术,2016,50(6):4.
- [8] 吴丽然,吴命利. 级联 H 桥型变频器直流电压均衡控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):100.
- [9] 时维国,桑尧尧. 基于电压电流混合模型的新型磁链观测器[J]. 电机与控制应用,2019,46(7):14.
- [10] 欧阳羿. 异步电机速度自适应磁链观测器的研究[J]. 电气传动,2012,42(10):9.
- [11] 钟建强,游林儒,徐芹文. 一种改进电压模型的异步电机无速度传感器矢量控制方法[J]. 微电机,2009,42(5):16.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李耀华,徐淑萍,刘卫国. 一种新颖的永磁同步电动机直接转矩控制策略[J]. 电气传动,2007,37(6): 20.
- [18] 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.

(上接第 16 页)