

基于模糊控制的动态权重系数表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制系统*

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

摘 要: 传统永磁同步电机(PMSM)模型预测转矩控制(MPTC)未考虑减小开关次数,造成平均开关频率较高。通过将减小开关次数作为表贴式永磁同步电机(SPMSM)MPTC的控制目标之一,设计了开关次数权重系数,提出了一种基于模糊控制的动态权重系数MPTC方法。分析了电机转矩的不同对成本函数开关次数权重系数作用效果的影响,引入模糊控制,根据系统状态信息实时调节成本函数开关次数的权重系数。仿真结果表明,与开关次数权重系数固定的成本函数相比,所提方法进一步降低了平均开关频率,同时抑制了系统转矩脉动与磁链脉动。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 平均开关频率; 权重系数

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)03-0001-07

doi: 10.12177/emca.2019.146

Model Predictive Torque Control of SPMSM with Dynamic Weight Coefficient Based on Fuzzy Control*

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

Abstract: Conventional model predictive torque control (MPTC) of permanent magnet synchronous motor (PMSM) does not concern decreasing switching number, which causes high average switching frequency. The decrease of switching number is considered in the MPTC of surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) as one of the control objects of cost function, and weight coefficient of switching number is designed. The MPTC strategy with dynamic weight coefficient based on fuzzy control is proposed. The effect of different motor torque on switching number weight coefficient is analyzed. Fuzzy control is introduced to adjust the weight coefficient of switching number in real time according to motor system states. Simulation results show that compared with constant weight coefficient of switching number, dynamic weight coefficient based on fuzzy control can reduce the average switching frequency and suppress the torque ripple and flux linkage ripple of system.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive torque control (MPTC); average switching frequency; weight coefficient

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)模型预测转矩控制

(MPTC)可以对定子磁链和转矩进行在线预测,遍历所有可能的开关状态,并选择使成本函数最小化的开关状态,以实现转矩与定子磁链的均衡

收稿日期: 2019-11-11; 收到修改稿日期: 2019-12-13

* 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。

控制^[1-5]。传统 MPTC 的成本函数仅将转矩与磁链作为控制目标,没有考虑减小开关频率,导致系统中逆变器开关频率较高,增加了能量损耗和系统发热^[6-7]。为了兼顾控制性能与系统开关频率,实现多目标优化,国内外学者开展了大量的研究工作。文献[8]根据历史开关状态,以减小开关切换次数为原则确定本周期备选电压矢量集,降低了系统的开关频率,且减少了预测模型的计算负担。但该方法不具有成本函数灵活调节各控制目标重要性的能力,且备选电压矢量集作为基本电压矢量的子集,理论上所筛选出的电压矢量并不一定是最优解。文献[9]提出了一种基于满意优化的成本函数设计方法,为了避免优化无解造成系统的瞬时开关频率过高,提出了约束松弛,但并未给出成本函数设计中权重系数的具体确定方法。文献[10-11]均采用在模型预测成本函数中增加开关次数控制项的方法,并引入相关权重系数调节各控制目标的相对重要性,然而权重系数的设计属于离线设定,单一或少量的几组权重系数无法有效适应多变的系统状态,并且开关频率的降低会带来较大的电流畸变或转矩脉动,限制了成本函数选取较大的权重系数。为了适应多变的系统状态,文献[12]提出了一种模糊动态成本函数,利用模糊控制来实现成本函数中的权重系数动态调节,但模糊控制输入变量为转速偏差和转速变化率,难以直观反映成本函数控制目标的控制效果。文献[13-14]提出了在 MPTC 的基础上,利用模糊算法,以转矩误差和磁链误差作为模糊控制器的输入变量,动态调节成本函数中转矩权重系数与磁链权重系数,以优化对电机转矩与磁链的控制效果。

本文基于表贴式永磁同步电机 (SPMSM) MPTC 系统,提出了一种基于模糊控制的动态权重系数预测控制策略,构建了包括定子磁链控制、转矩控制和开关频率控制在内的多目标优化成本函数。分析了不同转矩下,成本函数中合适的开关次数权重系数选取规律,并以电机转矩绝对值、转矩误差绝对值和磁链误差绝对值作为模糊控制的输入变量,实现了开关次数权重系数在线调节。仿真结果表明,与固定权重系数预测控制相比,所提方法进一步降低了系统开关频率,同时抑制了系统转矩脉动与磁链脉动。

1 MPTC

在定子磁链参考坐标系下,SPMSM 磁链和转矩预测模型^[15-18]为

$$\psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \quad (1)$$

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_t\psi_s(k)}{2L_d} \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \cdot$$

$$\sin\left[\delta(k) + \arcsin \frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}}\right] \quad (2)$$

式中: $\psi_s(k+1)$ 、 $T_e(k+1)$ 为下一时刻的定子磁链幅值和转矩; $\psi_s(k)$ 、 $T_e(k)$ 、 $\delta(k)$ 为当前时刻的定子磁链幅值、转矩、转矩角; p 为电机极对数; ψ_t 为永磁体磁链; L_d 为 d 轴电感; $u_s(k)$ 为施加电压矢量的幅值; α 为电压矢量与定子磁链的夹角; $q = \frac{u_s(k) \cdot \Delta t}{\psi_s(k)}$; Δt 为系统采样周期。

MPTC 备选电压矢量采用逆变器所产生的全部 7 个基本电压矢量可表示为

$$\mathbf{u}_s \in \{\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{u}_4, \mathbf{u}_5, \mathbf{u}_6\} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}_s$ 为施加的电压矢量; $\mathbf{u}_0 \sim \mathbf{u}_6$ 为逆变器产生的 7 个基本电压矢量。

零电压矢量可由 2 个开关状态 (111 或 000) 生成,具体选择以开关次数最小为原则^[19-20]。

传统 MPTC 成本函数不考虑减小开关次数,可表示为

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*(k)}{T_e^*(k)}\right]^2 + \left[\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)}{\psi_s^*(k)}\right]^2} \quad (4)$$

式中: $\psi_s^*(k)$ 、 $T_e^*(k)$ 为当前时刻的定子磁链、转矩的参考值。

因为采用磁链相对误差率和转矩相对误差率实现对磁链和转矩的控制,两者为同一数量级别的无量纲物理量,所以成本函数省去了权重系数设定。

SPMSM MPTC 系统如图 1 所示。

2 固定权重系数的成本函数

考虑到逆变器的能量损耗与发热,本文将降低平均开关频率也设定为成本函数控制目标之一。因为平均开关频率计算周期与磁链和转矩计算周期并不一致,所以采用开关次数来替代平均开关频

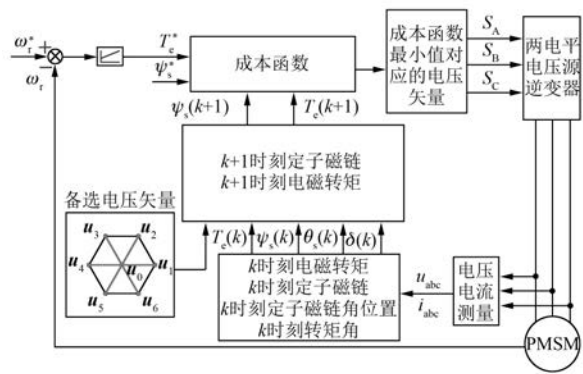


图1 SPMSM MPTC 系统

率,以实现磁链、转矩、开关次数三者计算周期的统一。考虑减小开关次数的 MPTC 成本函数为

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*(k)}{T_e^*(k)} \right]^2 + \left[\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)}{\psi_s^*(k)} \right]^2} + \lambda_{sw} n_{sw} \tag{5}$$

式中： λ_{sw} 为开关次数权重系数； n_{sw} 为施加电压矢量引起的开关切换次数。

2.1 成本函数的权重系数设计

成本函数可通过设定不同的权重系数来调整各控制目标之间的相对重要程度,从而达到不同的控制效果。本文利用搜索法,通过逐步增大权重系数,根据不同权重下磁链、转矩及平均开关频率的变化确定最优权重系数^[8]。

基于 MATLAB/Simulink 建立 SPMSM MPTC 仿真模型。仿真模型为离散模型,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 $K_p = 5$ 、 $K_i = 10$,PI 调节器输出上下限为 $[-35 \text{ N} \cdot \text{m}, 35 \text{ N} \cdot \text{m}]$ 。电机参考转速为 30 r/min,负载转矩为 $15 \text{ N} \cdot \text{m}$,参考定子磁链幅值为 0.3 Wb,仿真时长为 2 s。仿真用 SPMSM 参数如表 1 所示。

表1 仿真用 SPMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.2
d 轴电感/H	0.008 5
q 轴电感/H	0.008 5
转子磁链/Wb	0.175
极对数	4
转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.089
黏滞阻尼/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0.005

定义转矩脉动均方根误差 (RMSE)、磁链脉动 RMSE、平均开关频率和评价函数平均值:

$$T_{\text{rip-RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \tag{6}$$

$$\psi_{\text{rip-RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \tag{7}$$

$$f_{\text{ave}} = \frac{N_{\text{switching}}}{6t} \tag{8}$$

$$m_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left[\frac{T_e - T_e^*}{T_e^*} \right]^2 + \left[\frac{\psi_s - \psi_s^*}{\psi_s^*} \right]^2}}{n} \tag{9}$$

式中： n 为采样总个数； $N_{\text{switching}}$ 为逆变器开关总次数； t 为采样总时长。

令 λ_{sw} 初始值为 0,以步长 0.001 逐步增大权重系数。在不同权重系数 λ_{sw} 下,电机系统性能如表 2 所示,仿真时间 1~2 s 的转矩脉动 RMSE、磁链脉动 RMSE、平均开关频率及评价函数平均值如图 2~图 5 所示。

表2 不同权重系数下电机系统性能

λ_{sw}	$T_{\text{rip-RMSE}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	$\psi_{\text{rip-RMSE}}/\text{Wb}$	$f_{\text{ave}}/\text{kHz}$	m_{ave}
0	1.028 9	0.003 5	6.0	0.058 6
0.001	1.031 2	0.003 7	5.7	0.058 9
0.002	1.046 8	0.004 0	5.7	0.060 7
0.003	0.961 5	0.004 1	4.9	0.054 6
0.004	0.906 8	0.004 5	4.4	0.051 5
0.005	0.883 6	0.004 8	4.1	0.050 7
0.006	0.889 7	0.005 5	4.2	0.052 3
0.007	0.871 8	0.006 0	3.9	0.051 9
0.008	0.928 4	0.016 5	3.2	0.069 1
0.009	0.898 1	0.026 3	2.6	0.085 5
0.010	0.916 2	0.029 7	2.3	0.093 4
0.011	0.942 6	0.035 5	1.9	0.107 8

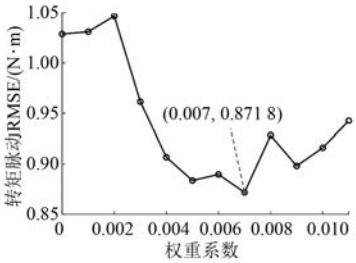


图2 不同权重系数下转矩脉动 RMSE

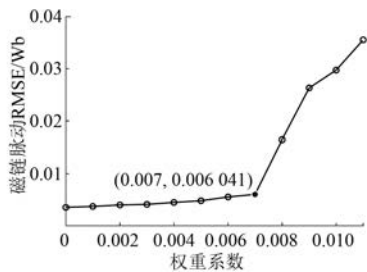


图3 不同权重系数下磁链脉动 RMSE

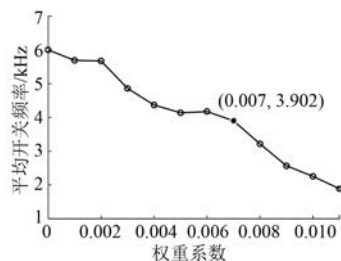


图4 不同权重系数下平均开关频率

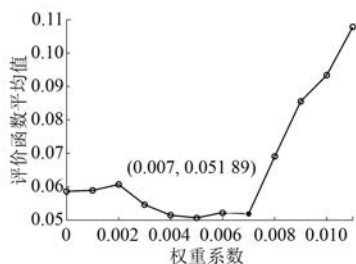


图5 不同权重系数下评价函数平均值

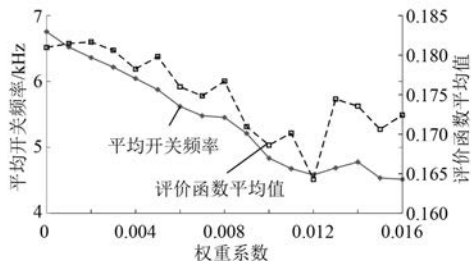
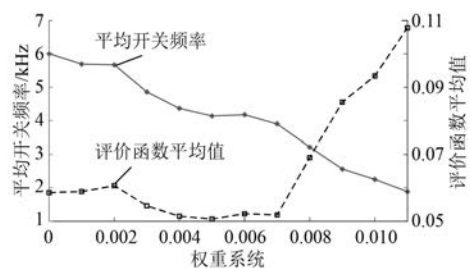
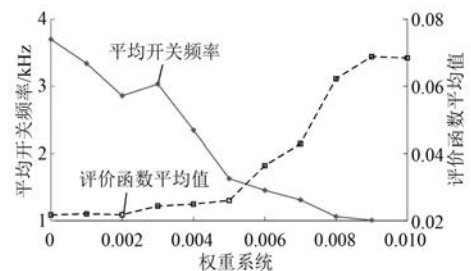
由仿真结果可知,随着权重系数不断增大,系统平均开关频率明显有所下降,但磁链脉动与转矩脉动也有所增加。当固定权重系数大于0.017时,转矩与磁链的脉动过大,会导致系统失控。因此,权重系数固定的成本函数无法将开关次数权重系数设置过大,限制了系统降低开关频率的能力。综合考虑转矩脉动、磁链脉动、系统平均开关频率和评价函数平均值,本文选择开关次数权重系数为0.007,其位于转矩和磁链脉动拐点处。

2.2 转矩对权重系数作用效果的影响分析

上文的权重系数 λ_{sw} 是在设定工况条件下通过试验分析得到的,并不能保证在其他条件下也是较优的权重系数。因此,需要考虑电机运行工况,动态调整 λ_{sw} ,以获得更好的控制效果。

取电机转速为30 r/min,负载转矩 T_m 分别为

5、15、30 N·m,权重系数 λ_{sw} 初始值为0,以步长0.001逐步增大。随着开关次数权重系数的增大,平均开关频率和评价函数平均值变化如图6~图8所示。

图6 开关次数权重系数对电机性能的影响($T_m = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$)图7 开关次数权重系数对电机性能的影响($T_m = 15 \text{ N} \cdot \text{m}$)图8 开关次数权重系数对电机性能的影响($T_m = 30 \text{ N} \cdot \text{m}$)

由图6~图8可知,转矩分别为5、15、30 N·m时,合适的 λ_{sw} 区间分别为 $[0.010, 0.014]$ 、 $[0.006, 0.008]$ 、 $[0.004, 0.006]$ 。由此可知, λ_{sw} 的选取在一定程度上受电机转矩的影响,呈现随转矩增大而减小的规律。

3 基于模糊控制的动态权重系数

由上文可知,成本函数中开关次数权重系数 λ_{sw} 的选取在一定程度上受电机转矩的影响。为了兼顾对电机转矩与磁链的控制效果,将电机转矩误差与磁链误差也作为反馈量,实现对开关

次数权重系数的调节。采用模糊控制输出开关次数权重系数 λ_{sw} 。模糊控制器使用电机转矩绝对值、转矩误差绝对值和磁链误差绝对值作为输入变量,开关次数权重系数 λ_{sw} 作为输出变量。

电机转矩绝对值 $|T_e|$ 论域为 $[0 \text{ N} \cdot \text{m}, 35 \text{ N} \cdot \text{m}]$, 分为 5 个模糊子集 $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\}$ 。其隶属度函数如图 9 所示。

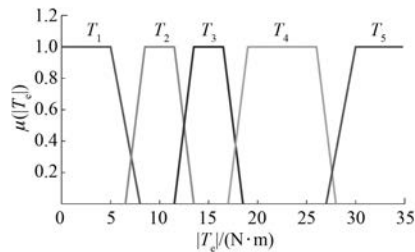


图 9 电机转矩绝对值隶属度函数

转矩误差绝对值 $|E_{T_e}|$ 论域为 $[0 \text{ N} \cdot \text{m}, 2 \text{ N} \cdot \text{m}]$, 分为 2 个模糊子集 $\{S, B\}$ 。其隶属度函数如图 10 所示。

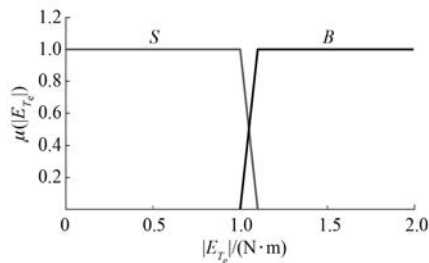


图 10 转矩误差隶属度函数

磁链误差绝对值 $|E_{\psi_s}|$ 论域为 $[0 \text{ Wb}, 0.03 \text{ Wb}]$, 分为 2 个模糊子集 $\{s, b\}$ 。其隶属度函数如图 11 所示。

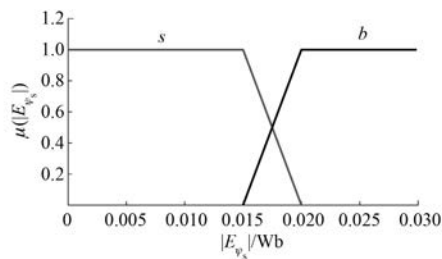


图 11 磁链误差隶属度函数

权重系数 λ_{sw} 论域为 $[0, 0.017]$, 分为 6 个模糊子集 $\{\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5\}$ 。其隶属度函数如图 12 所示。

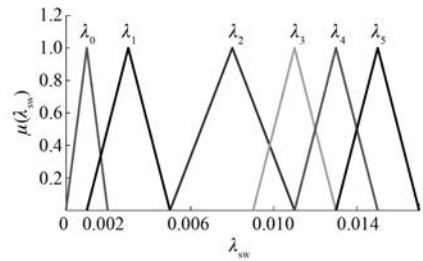


图 12 权重系数 λ_{sw} 隶属度函数

由上文可知,权重系数 λ_{sw} 随电机转矩绝对值 $|T_e|$ 的增大而减小。当电机转矩误差绝对值 $|E_{T_e}|$ 和磁链误差绝对值 $|E_{\psi_s}|$ 过大时,表明电机当前转矩脉动与磁链脉动过大,不利于电机稳定运转,成本函数中的权重系数 λ_{sw} 应选取较小值,以增强系统对电机转矩与磁链的控制。由此,可建立模糊控制规则表,如表 3 所示。经过 Mamdani 模糊推理规则后,采用面积重心法解模糊并输出。

表 3 模糊控制规则表

$ E_{T_e} $	$ E_{\psi_s} $	$ T_e $				
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
B	b	λ_0	λ_0	λ_0	λ_0	λ_0
B	s	λ_0	λ_0	λ_0	λ_0	λ_0
S	b	λ_0	λ_0	λ_0	λ_0	λ_0
S	s	λ_5	λ_4	λ_3	λ_2	λ_1

4 仿真验证

采用上文 SPMSM MPTC 仿真模型,设定仿真条件:仿真总时长为 12 s,电机由静止状态起动至转速为 20 r/min,2 s 时转速阶跃至 60 r/min,8 s 时转速阶跃至 50 r/min,负载转矩初始值为 10 N·m,4 s 时阶跃至 25 N·m,7 s 时阶跃至 15 N·m。在传统 MPTC、固定权重系数 ($\lambda_{sw}=0.007$) 和模糊动态权重系数控制下,SPMSM 转矩和定子磁链幅值分别如图 13~图 18 所示。如图 19 所示的权重系数不固

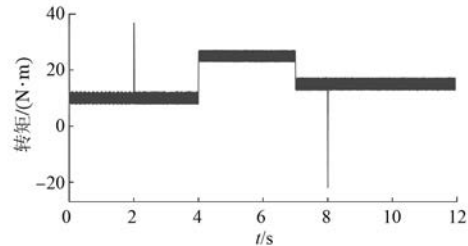


图 13 传统 MPTC 下转矩

定且随电机系统状态变化,验证了模糊控制基于系统状态动态调节权重系数的策略。

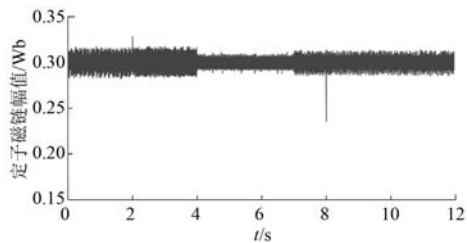


图 14 传统 MPTC 下定子磁链幅值

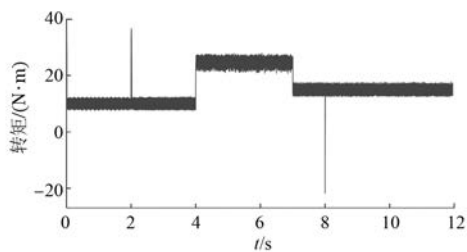


图 15 固定权重系数控制($\lambda_{sw}=0.007$)下转矩

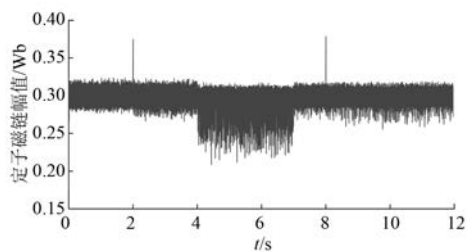


图 16 固定权重系数控制($\lambda_{sw}=0.007$)下定子磁链幅值

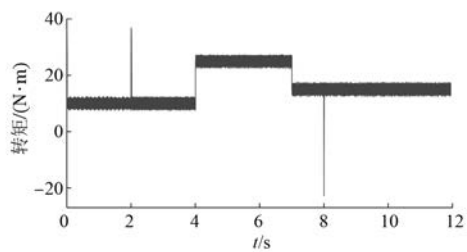


图 17 基于模糊控制动态权重系数控制下转矩

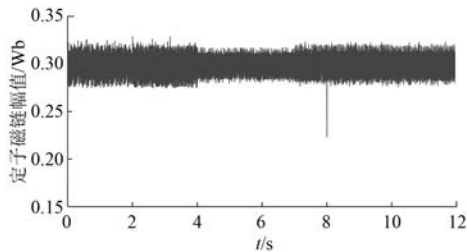


图 18 基于模糊控制动态权重系数控制下定子磁链幅值

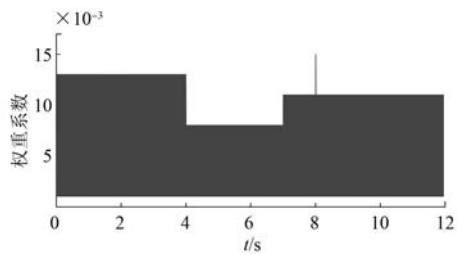


图 19 基于模糊控制动态权重系数控制下的权重系数

不同控制策略下,电机系统性能和开关切换次数情况如表 4、表 5 所示。

表 4 不同控制策略下电机系统性能

控制策略	f_{ave}/kHz	$T_{rip}\text{-RMSE}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$\psi_{rip}\text{-RMSE}/\text{Wb}$	m_{ave}
传统 MPTC	6.1	1.121 5	0.004 0	0.063 1
固定权重系数	3.4	1.100 3	0.014 5	0.071 0
基于模糊控制 动态权重系数	3.1	0.955 3	0.006 9	0.055 5

表 5 不同控制策略下不同开关切换次数占比 %

控制策略	开关切换 0 次占比	开关切换 2 次占比	开关切换 4 次占比	开关切换 6 次占比
传统 MPTC	34.19	41.55	22.64	1.61
固定权重系数	58.16	33.32	8.44	0.07
基于模糊控制 动态权重系数	59.66	33.52	6.78	0.03

由仿真波形及表 4~表 5 可知,与固定权重系数控制相比,基于模糊控制的动态权重系数控制可根据电机运行状态,在线输出合适的开关次数权重系数,在进一步降低逆变器平均开关频率的同时,有效抑制了转矩与磁链脉动。

5 结 语

本文基于 SPMSM MPTC 系统,将减小开关切换次数作为成本函数控制目标之一,设计了固定权重系数的成本函数,采用搜索法确定了权重系数,分析了不同转矩对权重系数选取的影响,提出了基于模糊控制的动态权重系数确定方法,得出结论如下:

(1) 通过成本函数将减小开关次数设为控制目标之一,可显著减小平均开关频率。平均开关

频率降低是通过减小开关次数多的开关切换和增加开关次数少的开关切换实现的。

(2) 与不考虑减小开关次数的传统 MPTC 相比,开关次数权重系数为零,固定权重系数的成本函数可有效减小平均开关频率。通过搜索法,可确定合理的权重系数。

(3) 在实际电机系统运行中,控制目标重要性是相对变化的。因此,反映控制目标重要性的权重系数也应该根据电机系统实际情况动态变化。固定权重系数仅在有限状态内是最优权重系数,并不能确保在电机系统所有状态下均为最优值。基于模糊控制的动态权重系数成本函数可根据系统转矩脉动与磁链脉动的反馈信息以及电机当前转矩,动态调整开关次数权重系数,进一步降低逆变器平均开关频率,同时有效抑制转矩与磁链脉动。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 柳志飞, 杜贵平, 杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58.
- [6] VARGAS R, AMMANN U, RODRIGUEZ J. Predictive approach to increase efficiency and reduce switching losses on matrix converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4): 894.
- [7] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 表贴式永磁同步电机有限状态集模型预测转矩控制成本函数研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 12.
- [8] 周雅夫, 张霖, 王翰涛, 等. 车用永磁同步电机 FCS-MPC 方法研究 [J]. 电力电子技术, 2019, 53(1): 42.
- [9] 曹晓冬, 谭国俊, 王从刚, 等. 一种低开关频率 PWM 整流器的满意预测控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 69.
- [10] CORTES P, KOURO S, LA ROCCA B, et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives [C] // IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009.
- [11] 田朱杰, 吴晓新, 於锋, 等. 计及开关频率优化的永磁同步电机模型预测转矩控制 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(11): 21.
- [12] 涂文聪, 骆光照, 刘卫国. 基于模糊动态代价函数的永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 89.
- [13] JUSTO J J, MWASILU F, KIM E K, et al. Fuzzy model predictive direct torque control of IPMSMs for electric vehicle applications [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1542.
- [14] 沈佳烨, 吴雷, 黄竞智. 电动汽车用 PMSM 模糊模型预测控制的研究 [J]. 微特电机, 2019, 47(3): 48.
- [15] 李耀华, 师浩浩, 孟祥臻, 等. 基于预测控制的 SPMSM 直接转矩控制最优电压矢量选择策略 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 21.
- [16] 李耀华, 任佳越, 师浩浩, 等. 表贴式永磁同步电机直接转矩控制变角度预测控制 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(12): 19.
- [17] 李耀华, 任佳越, 师浩浩, 等. 表贴式永磁同步电机直接转矩控制变幅值预测控制研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 9.
- [18] 李耀华, 孟祥臻, 师浩浩, 等. 基于双变量预测控制的表贴式永磁同步电机直接转矩控制系统 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 15.
- [19] 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.
- [20] 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.