DOI:10.19652/j.cnki.femt.2305860

永磁同步电机模糊自适应低开关频率模型预测电流控制*

王艳阳[1,2] 胡海林[1,2] 杨 杰[1,2] 王丽伟[1,2] 丰 富[1,2]
(1.江西理工大学电气工程与自动化学院 赣州 341000;2.江西省磁悬浮技术重点实验室 赣州 341000)

摘 要:在永磁同步电机有限集模型预测控制中没有脉宽调制环节,最优电压矢量直接作用于逆变器,开关频率高。为降低开关频率,拟通过永磁同步电机模型预测电流控制系统的代价函数中,引入权重系数自适应调整的开关频率控制项。首先,建立模型预测电流控制模型,分析运行工况及控制周期对开关频率的影响;其次,在代价函数中引入开关频率控制项,分析开关频率控制项权重系数对开关频率和电机控制性能的影响规律;然后,基于模糊控制理论设计权重系数自适应调整的模型预测电流控制系统,通过检测定子电流和参考电流的控制误差值作为模糊控制的输入量,开关项权重系数作为模糊输出量,实现开关项权重系数的自适应调整。仿真结果表明,模糊自适应开关项权重系数控制方式相比于固定权重系数控制,在转速为500 r/min时电流谐波增大0.36%时而开关频率降低1.5 kHz左右,在2 000 r/min时开关频率降低0.8 kHz左右。

关键词:永磁同步电机;模型预测电流控制;权重系数;模糊控制;开关频率
中图分类号:TM351 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.8

Fuzzy adaptive low switching frequency model predictive current control for permanent magnet synchronous motor

Wang Yanyang[1,2] Hu Hailin[1,2] Yang Jie[1,2] Wang Liwei[1,2] Feng Fu[1,2]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Key Laboratory of Maglev Technology of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In the finite set model predictive control of permanent magnet synchronous motors, there is no pulse width modulation link, and the optimal voltage vector directly acts on the inverter, the switching frequency is high. To reduce switching frequency, in the predictive current control system of permanent magnet synchronous motor model, a switching frequency control term with adaptive weight coefficient adjustment is introduced in the cost function. Firstly, establish a predictive current control model and analyze the impact of operating conditions and control cycles on switch frequency. Secondly, the switch frequency control term is introduced into the cost function, and the influence of the weight coefficients of the switch frequency control term on the switch frequency and motor control performance is analyzed. Then, based on fuzzy control theory, a model predictive current control system with adaptive adjustment of weight coefficients is designed. By detecting the control error values of stator current and reference current as the input of fuzzy control, and the switch term weight coefficient as the fuzzy output, the adaptive adjustment of the switch term weight coefficient is achieved. The simulation results show that compared to fixed weight coefficient control, the fuzzy adaptive switch term weight coefficient control method reduces the switching frequency by about 1.5 kHz when the current harmonic increases by 0.36% at a speed of 500 r/min, and by about 0.8 kHz at a speed of 2 000 r/min.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; model predictive current control; weight coefficient; fuzzy control; switching frequency

收稿日期:2023-12-19
* **基金项目**:国家自然科学基金(52262050)项目资助

0 引 言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor,PMSM)结构简单、运行效率高、稳定性和可靠性好,广泛应用于工业生产及其他领域[1-2]。有限集模型预测控制(finite-control-set model predictive control,FCS-MPC)原理简单、动态性能良好以及便于添加电流电压等其他约束条件,目前广泛开发应用于电机控制等工业领域[3-4]。

FCS-MPC 基于电机的空间状态方程推导出预测模型,逐个计算施加待选电压矢量作用下的电流值,并由此得到不同的代价函数值,最后筛选出使代价函数最小的电压矢量作为最优电压矢量[5-6]。最优电压矢量直接作用于逆变器控制电机运行,开关频率高。开关损耗与开关频率成正比,通过降低开关频率可以减小开关损耗,实现开关器件的结温控制[7-8]。此外,电力电子装置中开关器件是主要的电磁干扰源之一,电磁干扰和谐波现象会随开关频率的增大越发明显[4,9]。降低开关频率对延长器件的使用寿命,提升 EMC 性能有着重要意义。在传统的矢量控制系统中采用 PI 控制器结合脉宽调制技术控制电机运行,但是在载波调制或是常规的 SVPWM 在降低开关频率后会产生严重的电流畸变[10]。冯凌等[11]在模型预测直接转矩控制中引入滞环,将逆变器输出电压矢量的寻优标准从传统的跟踪误差最小,优化为筛选在滞环步长最大的矢量,滞环大小的设置比较困难。Feng 等[12]通过提取逆变器平均开关频率、总谐波畸变等系统关键性能指标数据,采用神经网络算法,对滞环的宽度和开关项权重系数进行多目标寻优。Zhang 等[13]在模型预测滞环控制中详细分析了系统参数对平均开关频率的影响,通过调节电感参数改变开关频率大小。谢云辉等[14]为兼顾电流控制性能和开关频率,将开关次数控制引入代价函数中,有效降低了开关频率。曹晓冬等[15]在三电平逆变器中多目标优化控制中采用模型预测控制算法,提出一种满意预测复合控制方案,实现了低开关频率下 PWM 变流器的高效运行。涂文聪等[16]通过判断转速偏差及转速变化率,应用模糊算法对电流项权重系数和开关项权重系数进行多目标优化分配,降低了逆变器的开关频率。李耀华等[17]在模型预测转矩控制提出模糊自适应变权重系数控制策略,根据转矩大小和转速偏差确定开关项权重系数。陈卓易等[18]提出一种自适应代价函数的开关频率控制方法,通过检测开关频率与参考频率的误差,自动调节开关代价权重系数,实现开关频率对参考值的跟随。

本文在基于定子旋转坐标系的表贴式永磁同步电机模型预测电流控制系统代价函数中引入开关项,将开关频率作为控制目标之一,通过设置开关项权重系数,实现控制性能与开关频率协同控制。针对开关项权重设计问题,提出模糊控制调节开关项权重系数的方法。仿真结果表明,根据电流控制偏差的大小设计模糊控制器,输出开关项权重系数,能够在保障电流控制性能的同时,有效降低开关频率,且模糊权重系数控制逆变器的平均开关频率相较于固定权重系数控制更为稳定。

1 永磁同步电机模型预测电流控制

1.1 PMSM 数学模型

永磁同步电机具有多变量、非线性、强耦合特点,为便于研究在不考虑铁芯饱和、涡流损耗和磁滞损耗的情况下,假设电机中的电流为三相对称正弦波。在 d-q 同步旋转坐标系下,表贴式永磁同步电机的电压方程为[19-20]:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q + L_d \dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} \\ u_q = R_s i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) + L_q \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{1}$$

式中:R_s 为定子电阻;ψ_f 为转子永磁体磁链;ω_e 为转子电角速度;u_d、u_q 和 i_d、i_q 分别为直、交轴定子电压和电流;L_d、L_q 分别直、交轴电感,本文针对表贴式永磁同步电机有 $L_d = L_q$。

1.2 有限集模型预测电流控制

通过将连续的电流状态方程离散化得到预测方程。在 k 时刻采用一阶前向差分法对定子电流空间状态方程进行离散化,即:

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \frac{i_{(k+1)} - i_{(k)}}{T_s} \tag{2}$$

式中:T_s 为电流环控制周期。

结合式(1)和(2)得到电流预测方程为:

$$\begin{cases} i_{d(k+1)} = i_{d(k)} + \dfrac{T_s}{L_d}(u_{d(k)} - R_s i_{d(k)} + E_{d(k)}) \\ i_{q(k+1)} = i_{q(k)} + \dfrac{T_s}{L_q}(u_{q(k)} - R_s i_{q(k)} + E_{q(k)}) \\ E_{d(k)} = \omega_e L_q i_{q(k)} \\ E_{q(k)} = -\omega_{e(k)}(L_d i_{d(k)} + \psi_f) \end{cases} \tag{3}$$

当电流环控制周期较短时,可以做如下近似:转子的转速、电感、电阻等参数在当前周期内不发生变化,可以通过当前时刻的电流、电角速度和备选电压矢量,预测在对应电压矢量作用下 $k+1$ 时刻的 dq 电流值。在有限集模型预测控制中,关键在于精准筛选出最优电压矢量作用于下一控制周期。在进行最优电压矢量筛选时,首先,将待选电压矢量代入电流预测模型中,计算出对应矢量的电流预测值。然后,通过遍历代入表征控制目标的代价函数,评估每个待选电压矢量的性能。最终选择使代价函数最小的电压矢量作用于下一周期。

模型预测电流控制以电流为控制目标,代价函数可表示为:

$$g = g_i = (i_{d(k+1)} - i_d^*)^2 + (i_{q(k+1)} - i_q^*)^2 \tag{4}$$

式中:i_d^* 和 i_q^* 为电流参考值;g_i 为电流控制目标。

模型预测控制具有在多目标下实现均衡控制的优势。PMSM 模型预测电流控制的多目标代价函数可表示为:

$$g = g_i + \sum_{m=0}^{n} \lambda_m g_m \tag{5}$$

式中：g_m 可以为其他控制目标对应的代价项，如电流限幅、中性点电压平衡、开关频率等；λ_m 为对应代价项的权重系数。

有限集模型预测电流控制中，参考速度与实际速度的误差值经过速度控制环调节后输出 q 轴电流参考值。采用坐标变换将电流传感器实时采集的 A、B 相电流转化 d-q 坐标系下的值，然后根据式(5)将待选电压矢量作用下的电流预测值遍历代入代价函数中，并筛选出使代价函数最小的电压矢量，将对应的开关状态输出至逆变器控制电机运行。

2 低开关频率代价函数设计

在三相两电平电压型逆变器中，逆变器共有 8 种开关输出状态，其中 1 表示上桥臂开关管导通，下桥臂开关管关断；0 表示上桥臂开关管关断，下桥臂开关管导通。8 种输出状态对应 8 个电压矢量，其中 2 个为 0 矢量，其余 6 个为有效电压矢量。传统的模型预测电流控制中，控制目标通常是电流最小化跟踪误差，逆变器开关频率较高。本设计中选择将开关频率作为控制目标之一，利用模型预测多目标约束控制的优势，在代价函数中引入开关项 g_{sw}：

$$g_{sw} = | S_{x(k+1)} - S_{x(k)} | \tag{6}$$

式中：$S_{x(k+1)}$ 为待选电压矢量开关状态；$S_{x(k)}$ 为当前开关状态。

考虑开关次数的模型预测电流控制的代价函数可表示为：

$$g = g_i + \lambda_{sw} \cdot g_{sw} \tag{7}$$

式中：λ_{sw} 为开关项权重系数，其大小表征电流控制项和开关项之间的优先级，λ_{sw} 越大，控制器在下一周期倾向于选择开关变化次数较少的电压矢量，而减弱对电流的跟踪性能的控制。此外电流控制项和开关代价项量纲不一致，需要引入开关项权重系数消除量纲的影响。正确设计权重系数对优化系统性能至关重要，调整权重系数大小能够平衡电流控制性能和开关频率大小。

通过在 Simuink 建立模型，仿真分析开关项权重系数对开关频率和控制系统性能的影响。电机参数如表 1 所示，设置模型仿真步长 2×10^{-5}，逆变器直流母线电压为 24 V。

表 1 电机参数表

Table 1 Motor Parameters Table

参数	单位	数值
定子电阻	Ω	0.165
d 轴定子电感	H	0.000 45
q 轴定子电感	H	0.000 45
转子磁链	Wb	0.007 4
极对数		4
转动惯量	kg·m^2	1.89×10^{-5}
额定扭矩	N·m	0.637
粘滞阻尼	N·m·s	$9.133\ 3\times10^{-5}$

定义电机控制的稳态性能指标，平均开关频率 f_{av}，电流控制误差。

$$f_{av} = \frac{N_{sw}}{6t} \tag{8}$$

式中：t 为统计时长；N_{sw} 为 t 时间内开关动作总次数，6 为三相两电平逆变器的开关管数量。

$$\begin{cases} e_{i_d} = | i_{d(k)} - i_d^* | \\ e_{i_q} = | i_{q(k)} - i_q^* | \end{cases} \tag{9}$$

给定电机参考转速 1 500 r/min，负载转矩为 0.637 N·m，仿真时长 2 s，记录仿真最后 1 s 的数据点，求取其平均值作为评价指标。在仿真实验中，开关项权重系数逐步增大进行多次实验，通过平均开关频率、电流谐波等评价指标来量化系统性能，结果如表 2 所示。

表 2 不同 λ_{sw} 下电机系统性能

Table 2 Performance of motor systems under different conditions

λ_{sw}	f_{av}/Hz	THD/%	e_{i_d}	e_{iq}
0	10 786.14	3.85	0.36	0.26
0.1	9 588.779	3.39	0.31	0.28
0.2	9 067.657	3.27	0.32	0.3
0.3	9 186.799	3.61	0.35	0.38
0.4	9 025.743	3.66	0.39	0.46
0.5	8 993.729	3.86	0.42	0.55
0.6	8 982.508	4.01	0.47	0.65
0.7	8 831.353	4.42	0.51	0.76
0.8	8 911.551	4.73	0.56	0.85
0.9	8 778.878	4.83	0.61	0.97
1.0	8 788.779	5.46	0.65	1.08
1.1	8 670.627	5.86	0.70	1.20
1.2	8 720.462	5.84	0.75	1.30
1.3	8 743.564	6.33	8.0	1.42
1.4	8 612.541	6.80	0.85	1.53
1.5	8 462.376	6.99	0.93	1.64

开关频率与开关代价权重系数的关系如图 1 所示，在代价函数中增加开关项，能够降低平均开关频率，在开关项权重系数在 0～0.2 时，平均开关频率下降幅度明显，电

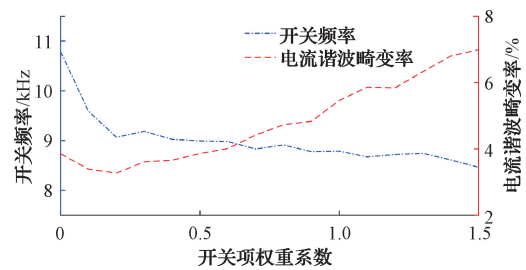

图 1 开关频率随开关项权重系数的变化曲线

Fig. 1 The variation curve of switching frequency with the weight coefficient of the switching term

流谐波随权重系数的增大而减小，但是在权重系数大于0.2后，权重系数对降低开关频率的效果减弱，电流谐波随权重系数的增大而增大。

电流跟踪误差大小随开关项权重变化如图2所示，可以看出，随开关项权重系数的增大，电流跟踪误差呈增大趋势，在开关项权重系数大于0.2时电流控制性能与开关项权重系数呈线性关系。

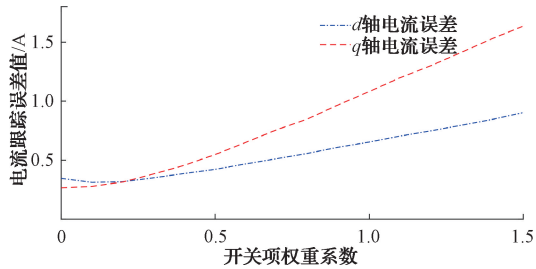

图2 电流跟踪误差大小随开关项权重的变化

Fig. 2 Changes in current tracking error size with switch term weight

3 基于代价函数的低开关频率控制

3.1 开关频率影响因素分析

FCS-MPC只考虑逆变器有限可能的开关状态，基于预测模型以最小化代价函数为目标选择开关矢量，在每个开关周期内，最优电压矢量的开关状态直接施加在逆变器上并保持固定，直至下一周期进行开关状态的更新。为减少开关器件的能量损耗，提升硬件系统的EMC等级，在控制系统中将平均开关频率作为优化控制目标之一，开关频率的大小和电机的运行工况、控制周期、系统参数息息相关。

开关频率与负载之间的关系如图3所示。在转速保持不变的情况下，开关频率随负载的增加呈现出下降的趋势。在低速运行时开关频率下降趋势并不明显，但在高速运行时，负载变化对开关频率大小的影响则更为显著。

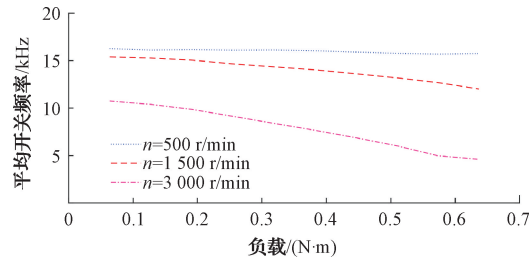

图3 开关频率随负载的变化

Fig. 3 Switching frequency variation with load

开关频率随速度变化如图4所示，可以看出，在空载条件下，开关频率随转速的增大呈现出下降的趋势。具体来说，当转速在中低速范围内变化时，开关频率下降的速度较为缓慢；而当转速在中高速变化时，开关频率下降的速度则明显加快，开关频率的变化与速度大小之间存在着

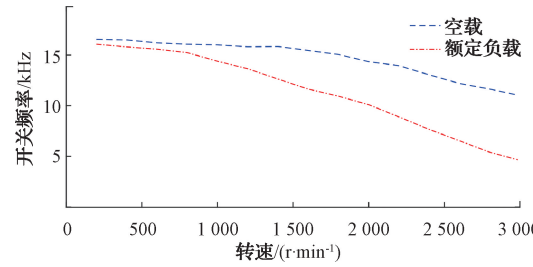

图4 开关频率随速度的变化

Fig. 4 Switching frequency variation with speed

非线性的关系。而在额定负载条件下，开关频率随转速的变化则更为明显。例如，在额定负载情况下转速为2 800 r/min时，开关频率降至5.4 kHz左右，在额定负载条件下，开关频率受转速变化的影响更大。

不同控制周期 T_s 下平均开关频率的变化曲线如图5所示。可以看出控制周期越小开关频率越大，平均开关频率大小与控制周期之间呈现指数递减关系。$T_s=10\ \mu s$ 时平均开关频率约为30 kHz，当 $T_s=20\ \mu s$ 时平均开关频率约为15 kHz，在实际应用过程中应根据需求选择合适的控制周期，单纯的增大控制周期会使电流环响应速度减弱，恶化控制效果。

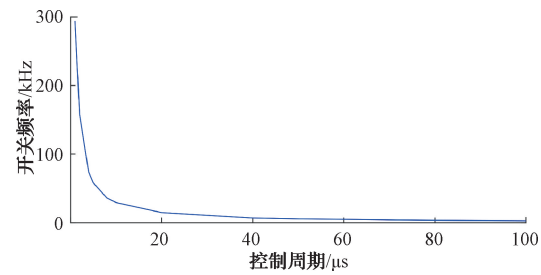

图5 不同控制周期下的平均开关频率曲线

Fig. 5 Average switching frequency curve under different control cycles

3.2 模糊权重系数设计

通过仿真分析了转速及负载变化在模型预测电流控制中对开关频率的影响，权重系数对系统控制性能的影响。电流控制误差受电机运行工况变化影响较大，在转速变化和负载变化时，固定开关项权重系数，在电机运行工况发生变化时难以有效平衡电流性能和开关频率大小。

定子电流的控制误差反映了在不同开关项权重系数下开关频率的变化，提出采用电流的控制误差来调节开关项权重系数。采用模糊调节开关项权重系数的电流预测控制结构如图6所示，在电流控制误差较小时，系统整体性能较好，但是开关频率较高，效率较低，通过增大开关项权重系数，牺牲一部分电流控制性能，可以减小开关频率；反之在电流质量较差时，电流控制偏差反应电流控制效果，通过减小开关项代价权重系数，适当提高开关频率提高电流控制性能。

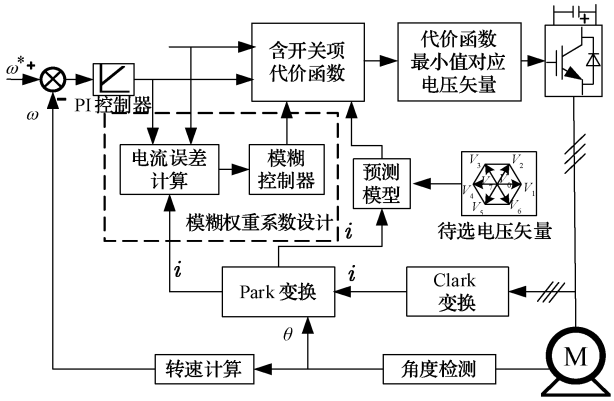

图 6 模糊权重系数模型预测电流控制原理框图

Fig. 6 Block diagram of fuzzy weight coefficient model for predicting current control principle

在模糊权重系数控制系统中选取电流误差绝对值作为模糊控制系统得输入，输出量为开关项权重系数。设置 d 轴电流误差 e_{i_d} 实际论域为[0 1.0]，分为 4 个模糊子集{ZE，PS，PM，PB}，其隶属度函数如图 7 所示。

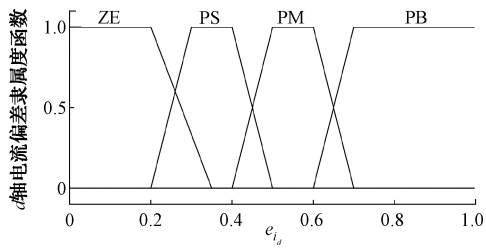

图 7 d 轴电流控制误差的隶属度函数

Fig. 7 The membership function of d-axis current control error

e_{i_q} 的模糊论域为[0 1.6]，分为 4 个子集{ZE，PS，PM，PB}，其隶属度函数如图 8 所示。

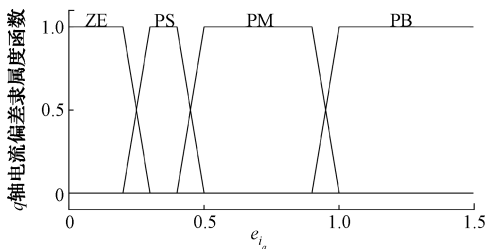

图 8 q 轴电流控制误差的隶属度函数

Fig. 8 The membership function of q-axis current control error

开关项权重系数设置模糊论域为[0 1]，分为 4 个子集{ZE，PS，PM，PB}，采用梯形隶属度函数，如图 9 所示。

模糊控制的规则表如表 3 所示。模糊控制器采用经典的 Mamdani 模型，并以面积重心法反模糊化并输出，模糊推理输入输出曲面如图 10 所示。

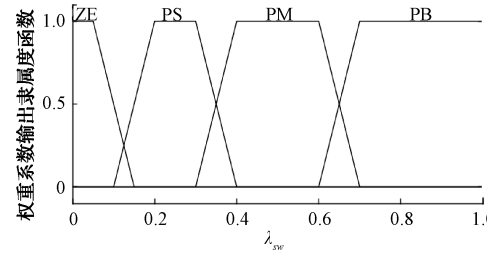

图 9 模糊控制隶属度函数

Fig. 9 Fuzzy control membership function

表 3 模糊推理规则

Table 3 Fuzzy reasoning rules

e_{i_q}	e_{i_d}			
	ZE	PS	PM	PB
ZE	PB	PB	PM	PM
PS	PB	PM	PM	PS
PM	PM	PM	PS	ZE
PB	PM	PS	PS	ZE

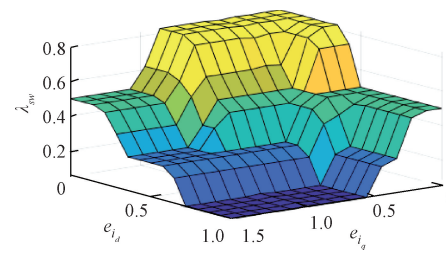

图 10 模糊推理输出系数曲面

Fig. 10 Fuzzy inference output coefficient surface

4 仿真验证

为了验真基于模糊控制的开关项权重系数设计方法在电机运行工况变化时的对降低开关频率和平衡电流质量的有效性。分别对采用传统模型预测电流控制(MPCC)，固定权重系数(GD-MPC，$\lambda_{sw}=0.2$)，模糊自适应权重系数(FZ-MPC，$\lambda_{sw}=FZ$)控制 3 种情况进行对比仿真，分析在速度变化和负载变化时模糊权重系数对平衡开关频率和电流控制效果的有效性。仿真环境设置，仿真步长为 2×10^{-5}，速度环 $k_p=0.1$，$k_i=2$，平均开关频率计算时间为 0.01 s，电机参数如表 2 所示。

速度变化对系统性能的影响，仿真条件设定如下：总时长为 2 s，电机由静止带负载启动，负载 T 为 0.3 N·m，参考转速初始为 500 r/min，1 s 阶跃至 2 000 r/min。速度响应曲线如图 11 所示，在 3 种控制方式中速度响应曲线几乎一致，速度阶跃至 2 000 r/min 时超调量在 4%左右，约在 0.15 s 时系统恢复稳定，稳态运行时转速波动在 2 r/min 以内。

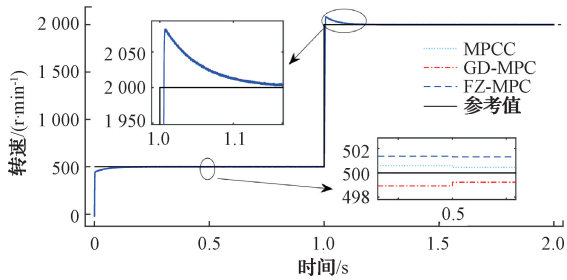

图 11　不同控制方式的速度响应曲线

Fig. 11　Speed response curves of different control methods

不同控制方式下的平均开关频率曲线如图 12 所示，在 MPCC 中，速度为 500 r/min 时平均开关频率为 15 kHz 左右，在速度为 2 000 r/min 时平均开关频率约为 12 kHz。在 GD-MPC 中，速度为 500 r/min 时平均开关频率在 6～8 kHz 波动，在速度为 2 000 r/min 时平均开关频率约为 9 kHz。在 FZ-MPC 中速度为 500 r/min 平均开关频率在约为 4.8 kHz，在速度为 2 000 r/min 时平均开关频率约为 8.2 kHz。对应的模糊权重系数曲线如图 13 所示，在转速为 500 r/min 时开关项权重系数在 0.45 上下波动，当转速突变至 2 000 r/min 时开关项权重系数下降至 0.4 左右。

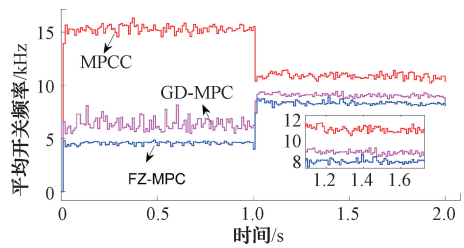

图 12　速度变化下平均开关频率曲线

Fig. 12　Average switching frequency curve under speed change

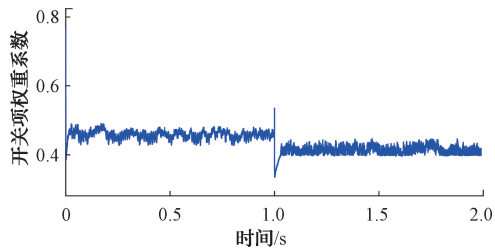

图 13　速度变化下的模糊权重系数曲线

Fig. 13　Fuzzy weight coefficient curve under speed change

n=500 r/min、T=0.3 N·m 不同控制方式下的电流分析如图14 所示，在 MPCC、GD-MPC 和 FZ-MPC 控制中，电流谐波畸变率分别为 9.79%、6.91% 和 7.27%。n=2 000 r/min、T=0.3 N·m 不同控制方式下的 A 相电流分析如图15 所示，在 MPCC、GD-MPC 和 FZ-MPC 控制中，电流谐波畸变率分别为 7.3%、7.31% 和 7.66%。通过上述结果分析，在低速状态下，相较于 GD-MPC，FZ-MPC 控制能够在增加 0.36% THD 的情况下，大约减小 1.5 kHz 的平均开关频率，而且开关频率的波动幅度更小。在高速状态下两者控制效果相当。

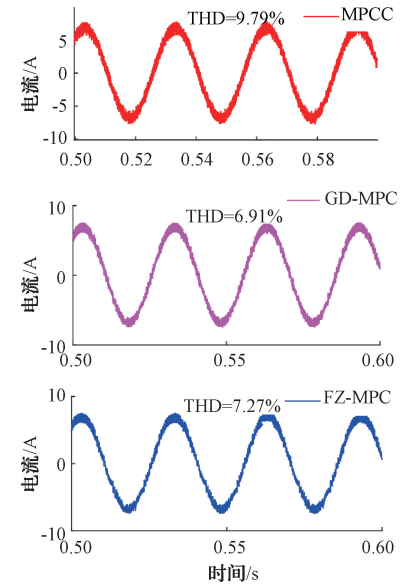

图 14　n=500 r/min、T=0.3 N·m 电流质量分析

Fig. 14　Analysis of current quality at n=500 r/min and T=0.3 N·m

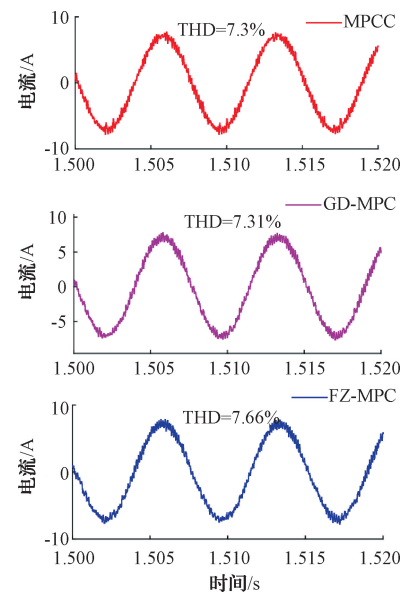

图15　n=2 000 r/min、T=0.3 N·m 电流质量分析

Fig. 15　Analysis of current quality at n=2 000 r/min and T=0.3 N·m

分析负载变化对系统性能的影响，仿真条件设定如下：总时长为 2 s，电机由静止带负载启动，负载 T=0.3 N·m，参考转速初始为 500 r/min，1 s 时负载阶跃

0.637 N·m。不同控制方式下的平均开关频率曲线如图16所示，在负载转矩阶跃至0.637后，在MPCC控制中开关频率约为13 kHz，在GD-MPCC控制中开关频率约为7 kHz，在FZ-MPCC控制中开关频率约为6.5 kHz。FZ-MPC对应输出的开关项权重系数如图17所示，在1 s后开关项权重系数上升在0.55附近波动。n=500 r/min、T=0.637 N·m不同控制方式下的A相电流分析如图18所示，在MPCC、GD-MPC和FZ-MPC控制中，电流谐波畸变率分别为4.39%、3.29%和3.85%。在负载增加后电流谐波畸变都有所下降，相较于GD-MPC，FZ-MPC控制能够在增加0.46%THD的情况下，大约减小0.5 kHz的平均开关频率。

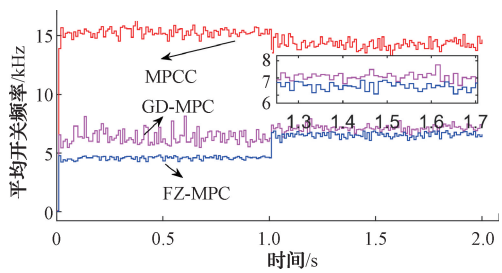

图16 负载变化下的平均开关频率

Fig. 16 Average switching frequency curve under speed change

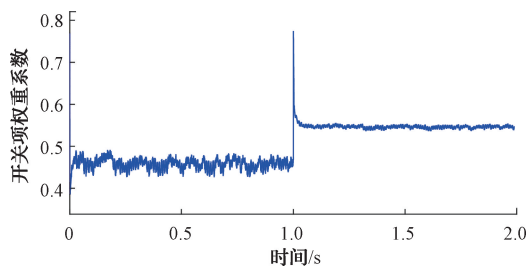

图17 负载变化下的模糊权重系数曲线

Fig. 17 Fuzzy weight coefficient curve under load change

5 结 论

本文对模型预测电流控制中的开关频率主要影响因素进行分析，提出了在模型预测电流控制中采用模糊的方法调节开关项权重系数的方法，权衡了开关频率和电流控制效果两个变量。在转速变化时模糊控制能够及时调整开关项权重系数，采用模糊算法调节权重系数，权重系数降至0.4左右，相较于GD-MPC开关频率降低了0.8 kHz，电流谐波畸变只增加了0.35%。在负载变化时，权重系数增大至0.55左右，相较于GD-MPC开关频率降低了0.5 kHz，电流谐波畸变只增加了0.46%。实验结果表明，在传统的模型预测电流控制中，通过在代价函数中添加开关项，能过够有效降低平均开关频率。糊权重系数能够在不显著增加电流

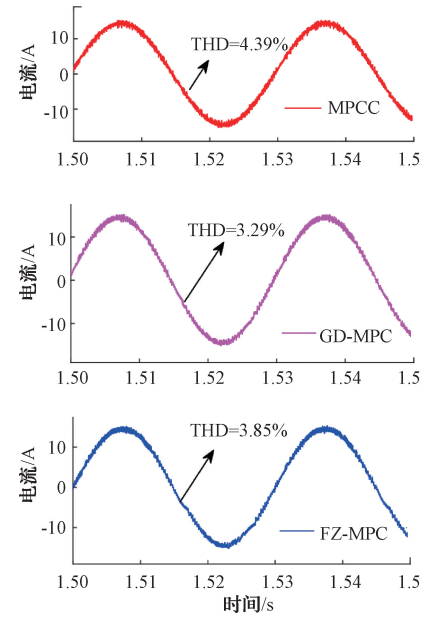

图18 n=500 r/min、T=0.637 N·m电流质量分析

Fig. 18 Analysis of current quality at n=500 r/min and T=0.637 N·m

谐波畸变率的情况下降低平均开关频率，且在FZ-MPC中开关频率波动更小。

参 考 文 献

[1] KARAMANAKOS P, LIEGMANN E, GEYER T, et al. Model predictive control of power electronic systems: Methods, results, and challenges[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 95-114.

[2] 陈德海，陈志文，李明，等. 基于改进滑模趋近律和负载前馈补偿的PMSM控制研究[J]. 国外电子测量技术，2023，42(3)：95-101.
CHEN D H, CHEN ZH W, LI M. Research on PMSM control based on improved sliding mode reaching law and load feedforward compensation[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(3): 95-101.

[3] KARAMANAKOS P, GEYER T. Guidelines for the design of finite control set model predictive controllers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(7): 7434-7450.

[4] 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)：58-69.
LIU ZH F, DU G P, DU F D. Research status and development trends of finite set model predictive control in power electronic systems [J]. Transactions

of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 58-69.

[5] 席裕庚,李德伟,林姝.模型预测控制——现状与挑战[J].自动化学报,2013,39(3):222-236.
XI Y G, LI D W, LIN SH. Model predictive control—status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.

[6] 马临超,蒋炜华,薛宝星.NPC型三电平永磁同步风力发电并网逆变器模型预测控制满足低电压穿越要求研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(16):151-156.
MA L CH, JIANG W H, XUE B X. Model predictive current control of grid-connected neutral-point-clamped permanent magnet synchronous wind power inverters to meet low-voltage ride-through requirements [J]. Power System Protection and Control,2017,45(16):151-156.

[7] 章小卫,苏星宇,周京华.基于非对称占空比调制的DAB变换器优化策略[J].电力电子技术,2023,57(12):117-120.
ZHANG X W, SU X Y, ZHOU J H. Optimization strategy of DAB converter based on asymmetric duty modulation[J]. Power Electronics, 2023, 57(12): 117-120.

[8] 周雒维,吴军科,杜雄,等.功率变流器的可靠性研究现状及展望[J].电源学报,2013(1):1-15.
ZHOU L W, WU J K, DU X, et al. Status and outlook of power converter's reliability research[J]. Journal of Power Supply, 2013 (1): 1-15.

[9] 王学梅.宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的研究与应用[J].中国电机工程学报,2014,34(3):371-379.
WANG X M. Researches and applications of wide bandgap SiC power devices in electric vehicles[C]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 371-379.

[10] 齐昕,周珂,王长松,等.中高功率交流电机逆变器的低开关频率控制策略综述[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6445-6458.
QI X, ZHOU K, WANG CH S, et al. Control strategies for medium and high-power AC machine inverters at low switching frequencies-an overview[C]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6445-6458.

[11] 冯凌,付建国,廖丽诚,等.一种改进的永磁同步牵引电机低开关频率模型预测直接转矩控制策略[J].中国电机工程学报,2021,41(21):7507-7517.
FENG L, FU J G, LIAO L CH. An improved low switching frequency model predictive direct torque control strategy for traction permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7507-7517.

[12] FENG L, LIAO L, WEN Y, et al. Application of neural network in parameters optimization of permanent magnet synchronous motor model predictive control [C]. 2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). IEEE, 2021: 744-747.

[13] ZHANG X, WANG Y, YU C, et al. Hysteresis model predictive control for high-power grid-connected inverters with output LCL filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 63(1): 246-256.

[14] 谢云辉,郑常宝,胡存刚,等.永磁同步电机模型预测的优化控制策略[J].电力电子技术,2019,53(7):39-42.
XIE Y H, ZHENG CH B, HU C G, et al. Optimization of model prediction control for permanent magnet synchronous motor[C]. Power Electronics, 2019,53(7):39-42.

[15] 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):69-77,11.
CAO X D, TAN G J, WANG C G, et al. A research on low switching frequency PWM rectifiers with satisfactory and model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 69-77.

[16] 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):89-97.
TU W C, LUO G ZH, LIU W G. Finite-control-set model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on dynamic cost function using fuzzy method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017,32(16):89-97.

[17] 李耀华,秦辉,苏锦仕,等.永磁同步电机模糊自适应变开关次数权重系数模型预测转矩控制[J].电机与控制学报,2021,25(2):102-112.
LI Y H, QIN H, SU J SH. Model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor based on adaptive dynamic weight coefficient using fuzzy control [J]. Electric Machines and Control, 2021,25(2):102-112.

[18] 陈卓易,屈稳太,邱建琪.一种开关频率可控的有限集模型预测控制[J].电工技术学报,2022,37(16):4134-4142.
CHEN ZH Y, QU W T, QIU J Q. A switching

frequency controlled finite-control-set model predictive control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4134-4142.

[19] 张秀云,王志强,刘涛.无权重系数的永磁电机宽范围预测速度控制[J].电子测量技术,2023,46(9):77-84.
ZHANG X Y, WANG ZH Q, LIU T. Wide range predictive speed control of permanent magnet motor based on no weight coefficient [J]. Electronic Measurement Technology, 2023,46(9):77-84.

[20] 张海燕,杨治山.基于负载扰动转矩扩张状态观测器的PMSM改进型重复控制策略[J].自动化与仪器仪表,2022(7):58-61.
ZHANG H Y, YANG ZH SH. The advanced repetitive control strategy of PMSM based on load disturbance torque of ESO [J]. Automation & Instrumentation, 2022(7):58-61.

作 者 简 介

王艳阳,硕士研究生,主要研究方向为电机控制。
E-mail:yywang_nice@163.com

胡海林(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为电机控制,变流器控制等。
E-mail:huhailin@jxust.edu.cn

杨杰,博士,教授,主要研究方向为智能控制,轨道交通控制等。
E-mail:15405993@qq.com

王丽伟,硕士研究生,主要研究方向为电机控制。
E-mail:289254390@qq.com

丰富,博士研究生,主要研究方向为电机控制。
E-mail:1341408882@qq.com

国外电子测量技术征稿通知

《国外电子测量技术》（月刊）创刊于1982年，由北京电子控股有限责任公司主管，北京方略信息科技有限公司主办的，国内外公开发行的中国科技核心期刊。《国外电子测量技术》致力于为测量技术领域内的科研、生产及教学工作者等提供全球产业发展的最新技术动向、构建优秀产品应用信息的舞台。《国外电子测量技术》近年来得到了广大作者和读者的厚爱，稿件数量、质量不断提高。我刊将秉承一贯的办刊宗旨，为作者、读者提供优质的服务，为电子测试测量行业进步贡献力量。欢迎国内外学者、研究人员、工程科技人员踊跃投稿。

一、来稿范围

（来稿不限于此，凡与测试测量、测控、仪器仪表相关的具有一定学术意义和应用价值的文章均可）：

（1）测控原理、技术与系统　（2）测量仪表与测试系统　（3）光电检测技术与仪表
（4）通信测量原理与仪表　（5）传感与计量工程　（6）传感器与检测技术
（7）生物传感器与生物信息检测仪表　（8）误差理论与不确定度
（9）故障诊断理论与技术实现　（10）数据采集与信号处理
（11）接口技术与工业总线　（12）测试总线与信号传输　（13）测试仪器与电源技术
（14）网络仪器、虚拟仪器与智能仪器　（15）图像处理及其他

二、投稿须知

（1）来稿须原创，内容真实，突出特色与创新点，不允许抄袭侵权，不得一稿多投。

（2）投稿时请提供中英文标题、摘要（200字左右）、关键词（3~5个），并附作者个人简介及详细通讯方式。

（3）作者来稿提供实验数据，包括测试结果、实物照片、图表等（图片要求300像素以上）。

（4）本刊投稿采用网上投稿系统，审稿周期6~8周，发表周期4~6个月。

三、编辑部联系方式

网　　址：http://www.etmchina.com
联系电话：010-53389559
邮　　箱：fedit@vip.163.com
通讯地址：北京市东城区建国门南大街5号（100005）