

基于有限集电流预测控制的永磁同步电机 转矩脉动抑制*

李自成, 易亚文, 王后能, 曾丽, 熊涛
(武汉工程大学 电气信息学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 永磁同步电机(PMSM)磁场定向控制策略鲁棒性差、动态响应速度慢,一般需要复杂的PID参数整定方法,并且很难在较大的速度范围内通过固定的一组PI参数获得较优的静态性能。为了解决上述难题,提出一种有限控制集电流预测策略用于PMSM的电流环控制,该方法直接处理离散开关状态集合而无需复杂的空间矢量调制过程,利用快速转矩响应通过电流偏差构造价值函数对电机负载切换时转矩脉动进行优化。对控制延时进行补偿减小电流谐波畸变降低稳态转矩脉动。仿真结果表明:与传统的磁场定向控制方法相比,所提方法具有更好的静态性能,且在低速、高速时该方法均可以有效的减小定子电流波动,抑制了电机的转矩脉动。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测控制; 电流控制; 有限开关序列

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0013-06

doi: 10.12177/emca.2020.073

Torque Ripple Suppression of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finite Set Current Predictive Control*

LI Zicheng, YI Yawen, WANG Houneng, ZENG Li, XIONG Tao

(School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: The field-oriented control strategy of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) has poor robustness and slow dynamic response, complex PID parameter tuning methods are generally required, and it is difficult to obtain good dynamic and steady state performance in a larger speed range through a fixed set of PI parameters. In order to solve the above problems, a finite control set current prediction strategy is proposed for the PMSM current loop control. This method directly deals with the set of discrete switching states without the need for a complex space vector modulation process, and uses its fast torque response to construct a value function pair through current deviation. The torque ripple is optimized when the motor load is switched. Compensation for control delay reduces both the current harmonic distortion and the steady-state torque ripple. Simulation results show that compared with the traditional field-oriented control method, the proposed scheme has good static and dynamic performance, and at low-speed and high-speed, this method can effectively reduce the stator current fluctuation and suppress the motor torque ripple.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive control (MPC); current control; finite switching sequence

收稿日期: 2020-04-26; 收到修改稿日期: 2020-06-04

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51705376)

作者简介: 李自成(1977—),男,博士,教授,研究方向为电力电子与运动控制、控制理论及应用。

0 引言

永磁同步电机(PMSM)由于其可靠性高、转矩大等优势,在新能源电动汽车、飞行器等领域的应用前景广阔^[1]。PMSM控制系统具有较强的耦合性,其电流内环性能是影响PMSM系统性能的关键因素之一。因此,改善电流内环的控制性能可以提高PMSM控制系统的动态、稳态性能。

目前,模型预测控制(MPC)策略已经成为电机控制领域的研究热点之一。传统PMSM控制策略主要包括磁场定向控制^[2](FOC)和直接转矩控制(DTC)。FOC动态响应较慢,需要复杂的PID参数整定和解耦算法。MPC具有非线性特征和约束条件的优点,能够处理带约束的多目标控制变量优化,从而实现最优控制,对控制过程中非线性问题具有较好的效果且无需复杂的控制参数设计。MPC采用多步预测、滚动优化和反馈校正的控制方法,根据是否需要调制单元可以分为连续状态的模型预测控制^[3-4](CCS-MPC)和离散状态的有限控制集模型预测控制^[5](FCS-MPC)2类。CCS-MPC通过连续时间域中的微分方程适当离散化,在线计算选择使价值函数最小的一组最优电压矢量,通过空间矢量脉宽调制(SVPWM)调制得到逆变器开关状态并作用于控制系统,开关频率恒定^[6-8]。与CCS-MPC相比,FCS-MPC无需复杂的调制过程,运算量小,且无需考虑连续控制集MPC的控制域和预测域,直接利用电机控制中三相两电平逆变器有限集开关状态的特性,将其应用于电流MPC中,根据系统模型预测不同开关状态未来时刻的电流值,通过价值函数寻优直接输出开关状态^[9]。FCS-MPC根据选择的控制变量构建不同的目标性能函数,可以解决传统PI型电流控制器应用局限的问题。文献[10]针对存在的开关频率不固定和采样频率较高的问题,提出有限开关序列模型预测电流控制策略,将其应用于三相电压型脉宽调制(PWM)整流器中,实现了定频控制。文献[11-12]针对有限控制集模型预测电流控制中代价函数的 d 、 q 轴电流项无针对性优化的问题,提出模糊算法对权重系数进行动态优化分配的模糊动态价值函数,从而优化逆变器的开关频率。

为了改善传统FOC控制方案应用于PMSM

系统中存在的动态性能优化问题和PID参数整定困难带来的转矩脉动,本文将MPC应用于电流环中,提出有限控制集电流预测控制策略,以确定的7组备选开关序列作为控制集,选取 d 、 q 轴定子电流作为控制变量构建多目标的价值函数采用遍历法在线寻优。仿真试验结果表明,所提控制策略无需复杂的空间矢量调制过程和PID参数整定,在电机负载突变及达到稳态时,FCS-MPC策略能够有效地减小系统的定子电流波动,从而抑制PMSM的转矩脉动。

1 PMSM 数学模型

基于表贴式PMSM多变量、非线性的特点,忽略磁路饱和、涡流和磁滞损耗,理想情况下PMSM在 d 、 q 坐标系的定子电流方程为

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s}(u_q - R_s i_q - \omega_{re} L_s i_d - \omega_{re} \psi_f) \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s}(u_d - R_s i_d + \omega_{re} L_s i_q) \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_q 、 i_d 分别为 d 、 q 轴电流; L_s 为定子电感; u_q 、 u_d 分别为 d 、 q 轴电压; R_s 为定子电阻; ω_{re} 为转子电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

当采样时间 T 足够小,可以得到离散时间模型,对定子电流导数 di/dt 采用一阶欧拉近似法,可得:

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k)}{T} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得 dq 坐标系下的定子电流预测模型离散表达式为

$$\begin{cases} i_q(k+1) = i_q(k) + \frac{T_s}{L_s}[u_q(k) - R_s i_q(k) + E_q(k)] \\ i_d(k+1) = i_d(k) + \frac{T_s}{L_s}[u_d(k) - R_s i_d(k) + E_d(k)] \\ E_q(k) = -\omega_{re} L_s i_d(k) - \omega_{re}(k) \psi_f \\ E_d(k) = \omega_{re}(k) L_s i_q(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$ 为 d 、 q 轴电流在 $k+1$ 时刻的预测值; $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 为 d 、 q 轴电流在 k 时刻的值; T_s 为采样周期; $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 为 d 、 q 轴电压在 k 时刻的值; $E_d(k)$ 、 $E_q(k)$ 为 d 、 q 轴反电动势在 k 时刻的采样值。

PMSM 定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (4)$$

式中: ψ_d, ψ_q 是 d, q 轴的磁链分量; L_d, L_q 是 d, q 轴电感; i_d, i_q 是 d, q 轴电流分量。

PMSM 转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (5)$$

式中: T_e 为 PMSM 电磁转矩; p 为电机极对数。

将式(4)代入式(5)得:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

对于隐极式 PMSM, 由于 $L_d = L_q = L_s$, 因此转矩方程可表示为

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (7)$$

PMSM 控制系统采用励磁电流 $i_d = 0$ 策略, 将三相定子电流通过坐标变换进行 d, q 轴解耦。根据式(7)可知, 将 FCS-MPC 策略应用于电流环优化 q 轴定子电流波动, 可以达到抑制电机转矩的目的。

2 有限控制集电流预测控制

2.1 PMSM FCS-MPC 控制原理

本文提出的 FCS-MPC 算法中, 外环速度控制器采用传统的 PI 控制器, 内环的 PI 控制器用 FCS-MPC 替代。通过系统离散化预测模型对逆变器 7 种有限开关状态对应的 $k+1$ 周期的电流值进行预测, 利用电流偏差构建价值函数对不同开关状态下的预测电流进行评估, 并确定使价值函数最小的一组电压矢量, 将其对应的开关状态直接作用于逆变器, 实现快速跟踪给定电流。FCS-MPC 框图如图 1 所示。根据图 1, 在 PMSM 系统中 FCS-MPC 设计的基本过程为:

(1) 根据 PMSM 在 d, q 坐标轴下的定子电流方程与选择的控制变量 i_{dq} 构建电流的离散预测模型 $f\{i, u\}$;

(2) 根据 k 时刻采样的被控状态变量 $i_{dq}(k)$ 的值和不同开关状态下对应的 d, q 轴定子电压值计算出 $k+1$ 时刻被控状态变量预测值 $i_{dq}(k+1) = f\{i(k), u_i\}$;

(3) 选择电机 d, q 轴电流偏差来构建价值函

数 $g\{i_{dq}^*, i_{dq}(k+1)\}$;

(4) 采用遍历法, 通过构建的价值函数对求得的 7 个电流预测值在线评估, 选取使目标函数 g 最小的开关状态 $S_i (i=0, 1, 2, \dots, 6)$ 为最优输出开关状态。

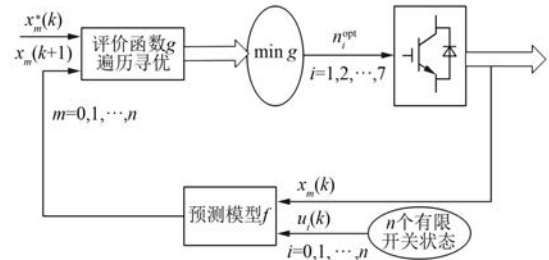


图 1 FCS-MPC 框图

FCS-MPC 控制策略易于实现多目标电流控制, 且最终输出的开关状态组合直接由控制器决定, 省去了传统 PI 型电流环中脉冲宽度调节器的复杂设计。将 FCS-MPC 应用于 PMSM 控制系统电流环中, 其系统结构如图 2 所示。

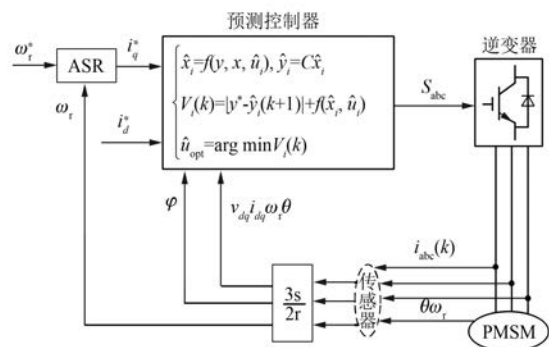


图 2 FCS-MPC 的 PMSM 控制系统结构图

价值函数的构建是 MPC 中重要的环节, 为了避免价值函数中存在不同被控状态变量需要配置加权系数 λ 。采用电流跟踪控制, 通过坐标变换把定子电流解耦成 d, q 轴的励磁电流 i_d 和转矩电流 i_q , 通过电流偏差的平方之和来构建价值函数。即:

$$g_i = [i_q^* - i_q(k+1)]^2 + [i_d^* - i_d(k+1)]^2 \quad (8)$$

式中: i_q^* 是定子电流 q 轴分量给定值; i_d^* 是定子电流 d 轴分量给定值。

2.2 逆变器开关序列选取

图 3 所示为三相两电平电压源型逆变器拓扑

结构。定义桥臂 $x(x=A, B, C)$ 的功率器件开关序列为 $S_x, S_x=1$ 表示上桥开通下桥关断; $S_x=0$ 为上桥关断下桥开通。

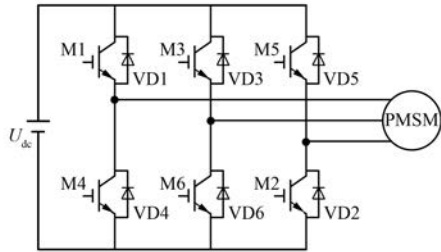


图3 三相两电平电压源型逆变器拓扑结构

将 FCS-MPC 的控制集确定为逆变器的有限开关序列,控制集 8 种开关序列对应的电压矢量为 6 个有效电压矢量和 1 个零电压矢量 $U_0(U_7 = U_0)$ 。有限开关序列 S_i 如表 1 所示。

表 1 有限开关序列 S_i

开关状态 S_i	S_A	S_B	S_C
0	0	0	0
1	1	0	0
2	0	1	0
3	1	1	0
4	0	0	1
5	1	0	1
6	0	1	1
7	1	1	1

令逆变器开关序列矢量 S 为

$$S = \frac{2}{3}(S_A + mS_B + m^2S_C) \quad (9)$$

其中: $m = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 。

则逆变器输出电压矢量 U 为

$$U = \frac{2}{3}(U_{an} + mU_{bn} + m^2U_{cn}) \quad (10)$$

式中: U_{an}, U_{bn}, U_{cn} 为逆变器输出的相电压。

根据式(9)和式(10)得出 U 和 S 的关系为

$$U = U_{dc}S \quad (11)$$

考虑所有的开关序列组合, 8 种不同开关序列在 $\alpha\beta$ 坐标系中对应的电压矢量 $U_{i,\alpha\beta}$ 的分布如图 4 所示。其中, $U_0 = U_7$, 则存在 7 种不同的电压矢量。因此, 对开关序列的寻优等效为对电压矢量序列的选取。

FCS-MPC 在一个采样周期内需要进行 7 次

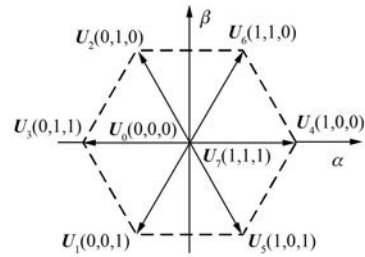


图4 基本电压矢量分布图

预测,通过遍历寻优选取 g_i 最小的电压矢量作为最优电压矢量,并将其对应的开关状态组合直接输出控制逆变器来实现电流的跟踪控制。电流预测控制算法流程如图 5 所示。

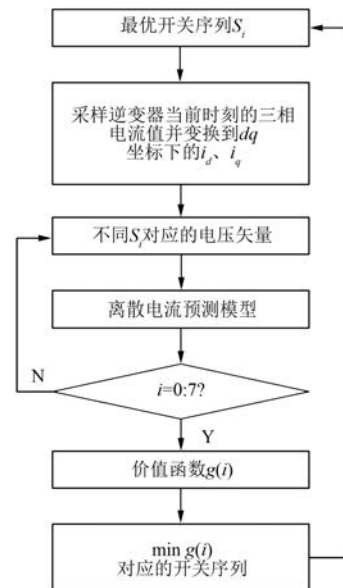


图5 电流预测控制算法流程图

2.3 FCS-MPC 延时补偿方法

有限控制集预测控制算法在实现过程中,虽然有限开关序列能减少运算量,但最优开关序列作用到逆变器中存在一步延时。针对当前 k 时刻采样值计算出的最优开关状态实际施加点是在 k 和 $k+1$ 时刻之间,这种最优开关状态量施加上的延时会导致目标电流的跟踪困难,造成系统不稳定。针对延时对 FCS-MPC 性能的影响,采用一步电流预测补偿控制延时,在 k 时刻的电压矢量 $u_{i,dq}(k)$ 由 $k-1$ 控制周期求解得到。在此基础上进行第二步预测,然后遍历 $\hat{u}_i(k+1)$ 得到 $k+2$ 周期开始时刻的预测电流 $\hat{i}_{i,dq}(k+2)$ 。构造关于 $k+$

2 时刻的目标优化价值函数,得到 $k+1$ 时刻的最优输入 $\hat{u}_{opt}(k+1)$ 。将于下一个控制周期开始时刻作用于逆变器,从而降低电流谐波畸变。基于 FCS-MPC 的一步预测延时补偿控制方案如图 6 所示。延时补偿后的价值函数可表示为

$$g_i = [i_q^* - i_q(k+2)]^2 + [i_d^* - i_d(k+2)]^2 \quad (12)$$

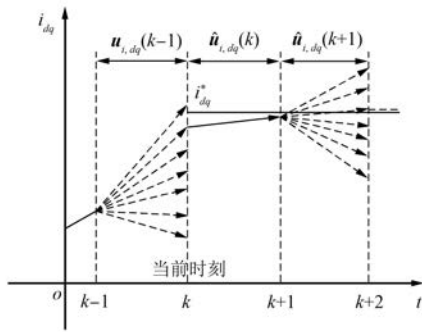


图 6 基于 FCS-MPC 的一步预测延时补偿控制方案

3 仿真验证及分析

在 MATLAB 平台搭建 PMSM 仿真控制系统,分别采用传统的 FOC 控制策略和有限控制集电流预测控制策略进行仿真对比,以验证用 FCS-MPC 替代传统 PI 电流控制器设计方案的控制性能。PMSM 基本参数如表 2 所示。

表 2 PMSM 基本参数

参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	0.338
定子 d 轴电感 L_d/H	0.001 515
定子 q 轴电感 L_q/H	0.001 515
极对数 p	4
永磁体磁链 ψ/Wb	0.088 4
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.001 11
额定转速 $n_N/(r \cdot \min^{-1})$	3 000
额定电流 I_N/A	8
额定转矩 $T_N/(N \cdot m)$	6

在 2 种控制方式下 PMSM 调速系统选择励磁电流 $i_d = 0$ 的控制策略。直流母线侧电压为 300 V;速度环 PI 参数选取为 $P=6, I=2.3$,输出限幅为 $[-20 \ 20]$ 。系统仿真时间设置为 $0 \sim 0.1$ s。电机初始负载转矩为 $6 \text{ N} \cdot \text{m}$,在 $t=0.05$ s 时负载突变为 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。电机给定转速为 150、1 000、2 000 r/min 下对比 2 种控制策略从起动阶段到

负载突变最终达到稳态时的转矩脉动波形。

图 7 为给定电机运行转速为 150 r/min 时,采用 2 种控制策略所得到的电机转矩仿真波形。从图 7 可以看出,采用 FCS-MPC 控制策略在电机起动进入稳态以及负载突变时转矩波动幅值比传统 PI 控制效果更好,采用传统 PI 双闭环控制时,需要复杂的调制波求解和空间矢量调制过程,导致动态响应慢,且在电机负载突变时的动态响应幅值波动大。采用有限开关序列预测电流控制,利用其快速转矩响应,在电机负载切换时幅值波动较小。

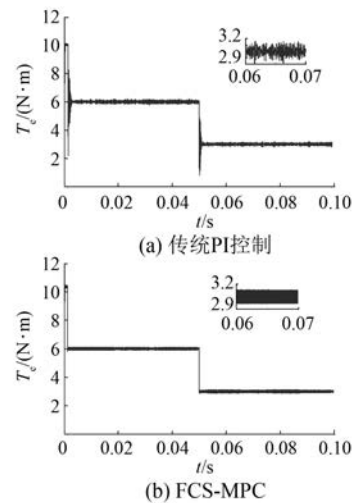


图 7 150 r/min 运行时 PMSM 转矩波形对比

当电机运行转速为 1 000 r/min 时 2 种控制策略下的电机转矩波形如图 8 所示。采用 FCS-MPC 策略时,电机从起动达到稳态和负载突变时

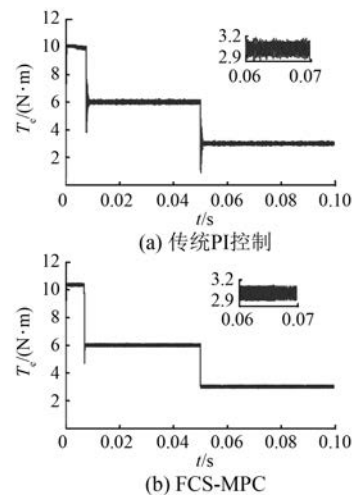


图 8 1 000 r/min 运行时 PMSM 转矩波形对比

电机转矩波动更小。当系统进入稳态后,采用传统 PI 控制的转矩脉动稳态幅值波动在 ± 0.15 , 而采用 FCS-MPC 控制策略为 ± 0.1 。

当电机运行转速为 2 000 r/min 时,采用不同控制方案所得电机转矩仿真波形如图 9 所示。采用传统 PI 控制,由于其 PI 控制器参数的限制稳态时幅值波动在 ± 0.2 , 稳态转矩幅值波动增大。FCS-MPC 保有电机负载切换时的动态响应优势,稳态转矩脉动的幅值波动稳定在 ± 0.1 。可见,负载突变和稳态时转矩脉动在高速运行阶段可以得到有效抑制。

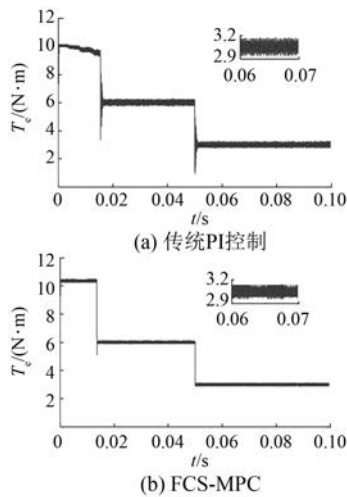


图 9 2 000 r/min 运行时 PMSM 转矩波形对比

图 10 为运行转速为 1 000 r/min 时电机定子电流仿真波形。根据式 (7) 可知,通过减小定子电流的纹波可以实现抑制电机转矩脉动。从

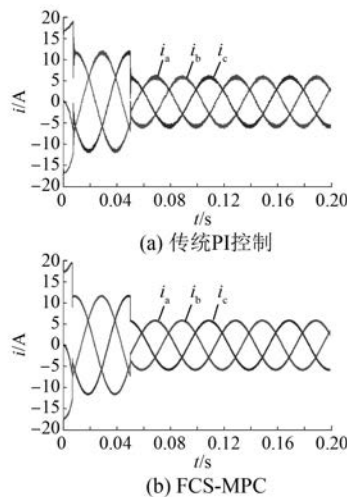


图 10 1 000 r/min 运行时 PMSM 定子电流波形对比

图 10 可以看出,与传统的电流 PI 控制相比,在 FCS-MPC 下的三相定子电流波形更加平滑,且电流纹波更小,通过解耦为励磁、转矩电流分量降低了反馈 q 轴电流波动,提高了转矩性能。

4 结 语

传统矢量控制策略应用于 PMSM 系统控制中时,速度环、电流环需要复杂的 PID 参数整定,且由于 PI 参数限制很难在较大的速度范围内获得较好的静、动态性能。本文对此进行了研究,得出如下结论:

- (1) 选取定子电流作为被控状态量,提出了有限集电流预测控制策略,将其应用于电流内环,无需复杂的调制过程,电机在低速、高速时均可实现电机负载突变情况下的转矩动态性能优化,通过减小电机定子电流波动,抑制 PMSM 的转矩脉动。
- (2) FCS-MPC 可以优化矢量控制,改善在较大的速度范围内的系统静动态性能,提升了系统的稳定性。

【参考文献】

[1] 陈玄,李祥飞,周杨. 基于新型滑模扰动观测器的永磁同步电机控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 23.

[2] 刘洋,赵金. 磁场定向控制中 SVPWM 过调制策略的改进与实现[J]. 电气传动, 2008, 38(3): 33.

[3] 钟灼臻,曾岳南,罗伟维. 永磁同步电机鲁棒有限集模型预测电流控制算法[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 17.

[4] 郑泽东,王奎,李永东,等. 采用模型预测控制的交流电机电流控制器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 118.

[5] SIAMI M, KHABURI D A, RODRIGUEZ J. Simplified finite control set-model predictive control for matrix converter-fed PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2438.

[6] 牛里,杨明,刘可述,等. 永磁同步电机电流预测控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 131.

[7] 王东文,李崇坚,吴尧,等. 永磁同步电机的模型预测电流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 73.

(下转第 28 页)