

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

杨锋,胡明茂,陈鑫.
永磁同步电机改进型双矢量模
型预测电流控制.
电机与控制应用,2021,48(9):21.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



Tz型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

永磁同步电机改进型双矢量模型预测电流控制^{*}

杨 锋¹, 胡明茂¹, 陈 鑫^{1,2}

(1. 湖北汽车工业学院 机械工程学院, 湖北 十堰 442002;

2. 奇瑞商用车有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘 要: 针对永磁同步电机(PMSM)单矢量模型预测电流控制(MPCC)中, 电流存在较大波动问题, 提出了一种改进型双矢量 MPCC(TV-MPCC)算法。每个扇区用零矢量和 1 个有效电压矢量或者 2 个有效电压矢量合成 1 个期望电压矢量, 利用价值函数最小值原理, 选出最优电压矢量。通过 dq 轴电流无差拍控制方法来计算电压矢量的作用时间, 对电流实现无差拍控制。最后在 MATLAB/Simulink 环境中搭建模型进行仿真, 结果表明与单矢量 MPCC 相比, 优化后的控制策略减小了电流波动, 提高了系统稳定性。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测电流控制; 双矢量控制; 电流波动

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)09-0021-06

doi: 10.12177/emca.2021.076

Improved Two-Vector Model Predictive Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

YANG Feng¹, HU Mingmao¹, CHEN Xin^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China;

2. Chery Commercial Vehicle Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: For the problem that current in single-vector model predictive current control (MPCC) of permanent magnet synchronous motor (PMSM) fluctuates greatly, an improved two-vector model predictive current control (TV-MPCC) algorithm is proposed. A zero voltage vector and an effective voltage vector or two effective voltage vectors in each sector are used to synthesize a desired voltage vector, and the optimal voltage vector is selected by using the principle of minimization of value function. The action time of the voltage vector is calculated by the dq -axis current dead-beat control method, which can realize dead-beat control of the current. Finally, the model is built in MATLAB/Simulink. The simulation results show that, compared with the single-vector MPCC, the optimized control strategy reduces the current fluctuation and improves the system stability.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive current control (MPCC); two-vector control; current fluctuation

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单且控制精度高许多优点, 目前已经广泛应用于各种不同领域^[1-2]。随着计算机和现代控制理论的发

展, 出现了许多不同的电机控制方法。矢量控制和直接转矩控制是应用最为广泛的控制方法, 这 2 种方法也是到目前为止比较成熟的控制策略^[3-5]。除了这 2 种方法之外, 模型预测控制(MPC)越来越受到众多学者的关注。MPC 可分

收稿日期: 2021-05-21; 收到修改稿日期: 2021-07-17

^{*} 基金项目: 教育部协调育人项目(201802240009); 湖北省重点研发计划项目(2020BAA005、TC200802C、TC200A00W)

作者简介: 杨 锋(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事电机控制方面的研究。

胡明茂(1980—), 男, 博士, 教授, 从事制造系统建模与控制、控制理论方面的研究。(通信作者)

为无限型和有限型控制集模型预测控制^[6]。有限型控制集模型预测控制利用了电压型逆变器的离散开关状态进行优化。对控制对象进行仿真建模,计算出电机对开关状态的响应,并且对开关状态进行评估,选择出最佳响应对应的电压矢量作用到逆变器中。

然而传统的 MPC 在每个采样周期只能选择一个电压矢量作用到逆变器中,很难得到满意的系统稳定性。在此基础上,许多学者将占空比控制引入到传统的 MPC 策略中。文献[7-11]均是通过在传统的 MPC 中加入占空比控制,占空比是用零矢量和 1 个有效矢量进行的计算得到,该方法得到了良好的系统稳定性。但该方法也有缺陷,零矢量不一定得到全局最优,因此需要将电压矢量组合放到 2 个有效电压矢量,丰富了电压矢量的组合且增加组合的可能性。也有很多学者从多桥臂逆变器角度入手,来提高电机的稳态波动。文献[12]提出了一种五桥臂逆变器单矢量模型预测电流控制(MPCC),利用一个有效矢量和零矢量进行占空比计算,减少了电磁转矩的波动。文献[13]在文献[12]的基础上改进了占空比算法。主要利用无差拍原理,得到 2 台电机 q 轴电流跟踪到参考值需要的时间,选出合适的有效矢量,提高了系统的运行性能。文献[14]对电压组合所有的可能性进行评估,选择出最优电压矢量及其作用在电机上的时间,但是同时也增加了计算量。文献[15]通过 q 轴无差拍原理来解决电压矢量开关组合顺序问题,但开关组合的次数还是偏大,计算繁琐。

本文主要以 PMSM 为研究对象,在传统单矢量 MPCC 基础上,提出一种改进的双矢量模型预测电流控制(TV-MPCC),每个扇区用零电压矢量和 1 个有效电压矢量或者 2 个有效电压矢量合成 1 个期望电压矢量,从而增加电压范围覆盖方向和幅值,利用价值函数最小值原理,选出最优电压矢量。仿真表明所提出的方法具有较好的可行性和有效性。

1 PMSM 数学模型

依据电机学原理,表贴式 PMSM 在旋转坐标系 $d-q$ 下的定子电流状态方程可表示为^[16]

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} [u_d - R_s i_d + \omega_{re} L_q i_q] \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} [u_q - R_s i_q - \omega_{re} L_d i_d - \omega_{re} \psi_f] \quad (2)$$

式中: ω_{re} 为转子电角速度; ψ_f 为转子磁链; L_d 、 L_q 分别为定子 d 、 q 轴电感; R_s 为定子电阻; u_d 、 u_q 分别为定子电压 d 、 q 轴分量。

通过欧拉法对式(1)和式(2)进行离散化处理可以得到:

$$i_d(k+1) = i_d(k) + \frac{T_s}{L_s} [u_d(k) - R_s i_d(k) + E_d(k)] \quad (3)$$

$$i_q(k+1) = i_q(k) + \frac{T_s}{L_s} [u_q(k) - R_s i_q(k) + E_q(k)] \quad (4)$$

$$E_d(k) = \omega_{re}(k) L_s i_q(k) \quad (5)$$

$$E_q(k) = -\omega_{re}(k) L_s i_d(k) - \omega_{re} \psi_f \quad (6)$$

式中: $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 分别为在当前时刻 d 、 q 轴的电流值; $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$ 分别为下一个采样时刻 d 、 q 轴的电流预测值; T_s 为采样周期; $E_d(k)$ 、 $E_q(k)$ 分别为在当前时刻 d 、 q 轴的电机反电动势; $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 为当前时刻 d 、 q 轴的电压值。

2 改进型 TV-MPCC

在矢量控制中用到了 2 个电流环进行控制,而在传统的单矢量 MPCC 中只有 1 个速度 PI 环,这样 PI 参数的整定在很大程度上得以简化。MPC 可以把不同的模型加入到价值函数中进行考虑,本文采用的控制目标为,电机 d 、 q 轴的电流能够跟随其参考给定值,以定子电流 d 、 q 轴分量与参考值的差的绝对值的和作为价值函数。

$$\min J = |i_q^* - i_q(k+1)| + |i_d^* - i_d(k+1)| \quad (7)$$

式中: i_q^* 为 q 轴参考定子电流; i_d^* 为 d 轴参考定子电流。

在 1 个采样周期中,有 8 种开关状态可以选择,其中包含了 2 个零矢量和 6 个有效矢量。在第 $i(i=0,1,2\cdots 7)$ 个电压矢量作用下,结合电压重构,由价值函数预测下一时刻的 d 、 q 轴电流值。

2.1 TV-MPCC 原理

本文提出的 PMSM TV-MPCC 在每个扇区的期望电压矢量通过 2 部分合成,第 1 部分期望电压矢量由一个有效矢量和零矢量合成,第 2 部分期望电压矢量由 2 个有效矢量合成。根据价值函数最小值原理,把这 2 部分得到的期望电压矢量代入价值函数中进行比较,最小值对应的期望电压即为最优期望电压。表 1 为有效电压矢量和零矢量合成期望电压矢量,表 2 为 2 个有效电压矢量合成期望电压矢量。

表 1 有效电压和零矢量期望电压矢量合成

扇区	有效矢量	零矢量	合成期望矢量
1	u_1	u_0 或 u_7	u_{ev1}
2	u_2	u_0 或 u_7	u_{ev2}
3	u_3	u_0 或 u_7	u_{ev3}
4	u_4	u_0 或 u_7	u_{ev4}
5	u_5	u_0 或 u_7	u_{ev5}
6	u_6	u_0 或 u_7	u_{ev6}

表 2 两个有效值期望电压矢量合成

扇区	有效矢量 1	有效矢量 2	合成期望矢量
1	u_1	u_2	u_{eva}
2	u_2	u_3	u_{evb}
3	u_3	u_4	u_{evc}
4	u_4	u_5	u_{evd}
5	u_5	u_6	u_{eve}
6	u_6	u_1	u_{evf}

改进的 MPCC 框图如图 1 所示,控制策略采用的是 $i_d^* = 0$, q 轴电流给定值是通过速度环 PI 控制器得到。在模块 TV-MPCC 中,2 部分的期望电压矢量作用时间 t_i, t_j 可以通过电流给定值和反馈值计算得到。

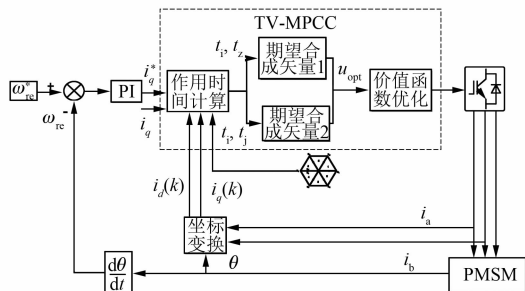


图 1 TV-MPCC 系统控制框图

2.2 矢量作用时间计算

在计算矢量作用时间时,不但需要考虑 d 轴无差拍跟踪,还需要考虑 q 轴无差拍跟踪。可以通过式(1)、式(2)得到零电压矢量作用的时间, dq 轴电流斜率的计算式:

$$s_{d0} = \left. \frac{di_d}{dt} \right|_{u_d=0} = \frac{1}{L_s} [-R_s i_d + \omega_{re} L_s i_q] \quad (8)$$

$$s_{q0} = \left. \frac{di_q}{dt} \right|_{u_q=0} = \frac{1}{L_s} [-R_s i_q - \omega_{re} L_s i_d - \omega_{re} \psi_f] \quad (9)$$

在式(1)和式(2)中,可以得到 2 个相邻的有效电压矢量 u_i, u_j 作用时, d 轴和 q 轴电流的斜率为

$$s_{di} = \left. \frac{di_d}{dt} \right|_{u_d=u_{di}} = s_{d0} + \frac{u_{di}}{L_s} \quad (10)$$

$$s_{qi} = \left. \frac{di_q}{dt} \right|_{u_q=u_{qi}} = s_{q0} + \frac{u_{qi}}{L_s} \quad (11)$$

$$s_{dj} = \left. \frac{di_d}{dt} \right|_{u_d=u_{dj}} = s_{d0} + \frac{u_{dj}}{L_s} \quad (12)$$

$$s_{qj} = \left. \frac{di_q}{dt} \right|_{u_q=u_{qj}} = s_{q0} + \frac{u_{qj}}{L_s} \quad (13)$$

式中: $u_{di}, u_{dj}, u_{qi}, u_{qj}$ 分别为 u_i, u_j 在 d, q 轴的电压分量。

在第 1 部分中,采用有效矢量和零矢量进行作用。根据无差拍原理,下一采样时刻电流预测值等于给定值,因此 d, q 轴的电流预测公式可以改为

$$i_d(k+1) = i_d(k) + s_{di} t_i + s_{d0} t_z = i_d^* \quad (14)$$

$$i_q(k+1) = i_q(k) + s_{qi} t_i + s_{q0} t_z = i_q^* \quad (15)$$

式中: t_i 为 u_i 的作用时间; t_z 为零矢量的作用时间。

2 个电压矢量作用总时间为 T_s 。即满足:

$$T_s = t_i + t_z \quad (16)$$

通过式(8)~式(16)可以得到:

$$t_i = \frac{i_d^* - i_q^* - i_d(k) + i_q(k) - (s_{d0} - s_{q0}) T_s}{s_{di} - s_{qi} - s_{d0} + s_{q0}} \quad (17)$$

$$t_z = T_s - t_i \quad (18)$$

计算出 t_i, t_z 以后,需要判断是否在 $0 \sim T_s$ 中,如果 $t_i < 0$,则 u_i 作用时间为 0,全部由 u_j 作用整个周期。若 $t_i > T_s$,则 u_i 作用时间为 T_s, u_j 作用时间为 0。

在第2部分中,采用2个有效电压矢量进行作用。同理可得, d 、 q 轴的电流预测公式可以改为

$$i_d(k+1) = i_d(k) + s_{di}t_i + s_{dj}t_j = i_d^* \quad (19)$$

$$i_q(k+1) = i_q(k) + s_{qi}t_i + s_{qj}t_j = i_q^* \quad (20)$$

并且满足:

$$T_s = t_i + t_j \quad (21)$$

通过式(8)~式(13)和式(19)~式(21)可以得出:

$$t_i = \frac{i_d^* - i_q^* - i_d(k) + i_q(k) - (s_{di} - s_{qi})T_s}{s_{di} - s_{qi} - s_{di} + s_{qi}} \quad (22)$$

$$t_j = T_s - t_i \quad (23)$$

根据计算得到的 t_i 、 t_j 值进行判断。如果 $t_i < 0$, 则 u_i 作用时间为零, 全部由 u_j 作用整个周期。若 $t_i > T_s$, 则 u_i 作用时间为 T_s , u_j 作用时间为零。

2.3 期望电压矢量合成

由就近原则可知,期望电压矢量通过零矢量和有效矢量合成,或者通过2个有效矢量合成。每个扇区只能合成一个期望电压矢量,6个扇区可以合成6个期望电压矢量,因此通过12次预测选择出最优电压矢量。图2为零矢量和有效矢量合成图,图3为2个有效矢量合成图。

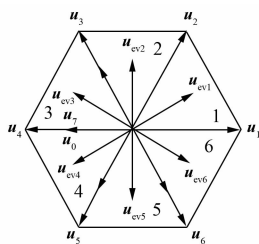


图2 零矢量和有效电压矢量合成图

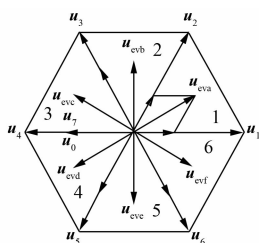


图3 2个有效矢量合成图

计算2部分期望电压矢量时,第1部分期望电压矢量可以根据式(17)、式(18)计算出零电压矢量和有效电压矢量作用时间,再根据式(24)和

式(25)计算2个交轴的期望电压矢量分量:

$$u_d = \frac{t_i}{T_s} u_{di} \quad (24)$$

$$u_q = \frac{t_i}{T_s} u_{qi} \quad (25)$$

同理,第2部分期望电压矢量可以根据式(22)、式(23)计算出2个有效电压矢量作用时间,再按照式(26)、式(27)计算2个交轴的期望电压矢量分量:

$$u_d = \frac{t_i}{T_s} u_{di} + \frac{t_j}{T_s} u_{dj} \quad (26)$$

$$u_q = \frac{t_i}{T_s} u_{qi} + \frac{t_j}{T_s} u_{qj} \quad (27)$$

TV-MPCC 策略具体步骤为

(1) 通过采样,得到当前时刻的电流值,再根据式(8)~式(13)得到电流率。

(2) 根据表1和表2选择基本电压矢量,用式(17)、式(18)、式(22)、式(23)计算得到2部分的作用时间。

(3) 根据式(24)~式(27)分别计算2部分电压矢量的 d 轴和 q 轴分量。

(4) 把2部分计算得到期望电压矢量的 d 轴和 q 轴分量代入到式(3)和式(4)中,分别得到2部分 d 轴和 q 轴的电流预测值。

(5) 把2部分计算出的电流预测值分别代入到价值函数中,将价值函数最小值对应的电压矢量作用到逆变器中。

3 仿真与分析

在 MATLAB/Simulink 环境中搭建仿真模型,验证改进的 TV-MPCC 算法的有效性和可行性,并对仿真结果进行研究分析,表3给出了仿真时 PMSM 的主要参数。

表3 PMSM 主要参数

参数名称	参数值
永磁体磁链 Ψ_f/Wb	0.129
定子电感 L_s/mH	0.002 4
d 轴电感 L_d/mH	0.002 4
q 轴电感 L_q/mH	0.002 4
电机定子电阻 R_s/Ω	0.369
极对数 n_p	5
额定电压 U_{dc}/V	380

为了证明本文算法的可行性,在同样条件下搭建传统单矢量 MPCC 系统仿真模型,采样时间为 0.000 01 s。仿真时间为 1 s,在 0.6 s 时施加负载 10 N·m,在 0.8 s 时负载突变为 5 N·m。输出的转矩如图 4 所示。

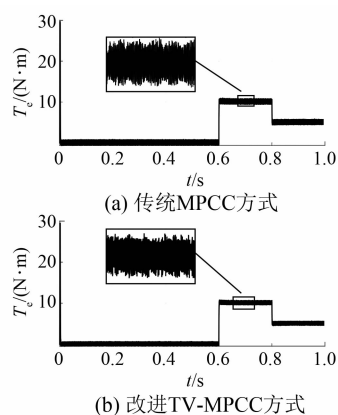


图 4 MPCC 转矩波形

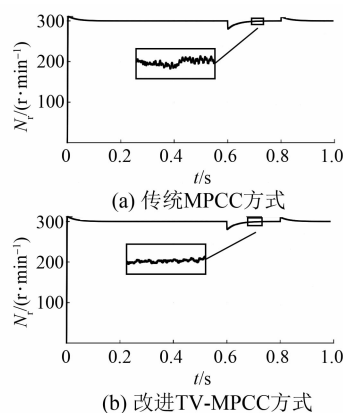


图 5 转速波形

图 4(a) 中传统的单矢量 MPCC 仿真结果图显示,当转矩发生突变时,转矩波动较大。采用 TV-MPCC 时,由于双矢量控制增加了 2 个有效矢量合成和有效矢量与零矢量合成,再从其中选出最优矢量,最优矢量可选范围增加。与传统 MPCC 相比,空载时稳态下的转矩误差(标准差)减小了 4.4%,负载为 10 N·m 时,转矩误差减少了 3%,转矩误差负载为 5 N·m 时,减少了 4.68%。说明了本文提出的方法对转矩稳态性能有一定的提高。

图 5 给出了传统 MPCC 和改进 TV-MPCC 的转速波形,电机启动时,改进的 TV-MPCC 的转速超调量和传统控制方法相差不大。当波形稳定

时,两者波形基本没有波动。证明了改进 TV-MPCC 对电机启动后转速环性能没有影响。

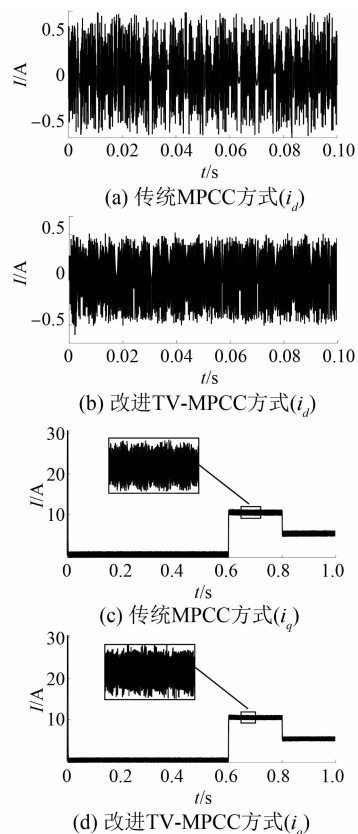
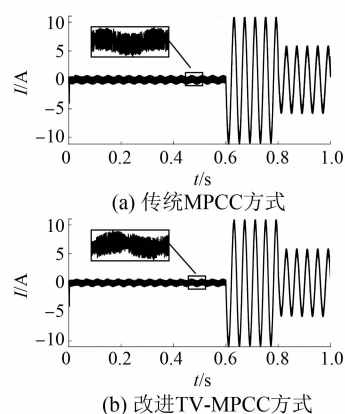
图 6 d 、 q 轴电流波形

图 7 电机定子 a 相电流波形

图 6 为 2 种方法的 d 、 q 轴电流波形。改进 TV-MPCC 在启动后,很快达到了稳态,在稳态时改进 TV-MPCC 的电流和转矩比传统 MPCC 幅度有所降低。由图 7 可以看出 a 相电流波动也有所降低。

为了将不同控制方法的误差值进行对比,用

To Workspace 模块将 Simulink 中传统的转矩 i_d, i_q 轴的电流数据和改进后的转矩, i_d, i_q 轴的电流数据传到 MATLAB 工作区, 形成离散数据。再用 std 函数(标准差函数)分别求出它们在 0~0.6 s, 0.6~0.8 s, 0.8~1.0 s 的标准差。标准差计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_n - \mu)^2}{N}} \quad (28)$$

式中: σ 为标准差; x_n 为某一时刻的转矩或者电流值; μ 为本组数据的平均值; N 为本组数据的总个数。

表 4 显示了不同控制方法的误差。

表 4 不同控制方法的误差

类别		误差(标准差)		
		空载 (0~0.6 s)	负载 (0.6~0.8 s)	负载 (0.8~1.0 s)
$T_e/(N \cdot m)$	传统 MPCC	1.678 2	0.350 0	0.251 4
	改进 MPCC	1.634 2	0.320 0	0.204 6
i_d/A	传统 MPCC	0.261 3	0.264 2	0.268 9
	改进 MPCC	0.211 2	0.211 7	0.212 4
i_q/A	传统 MPCC	1.734 6	0.361 7	0.259 8
	改进 MPCC	1.689 1	0.330 8	0.213 5

结合图 6 和表 4 可以看出, 改进 TV-MPCC 对 i_d, i_q 轴电流有明显的控制效果。由此可以证明改进 TV-MPCC 的有效性。

4 结 语

本文在传统单矢量 MPCC 基础上, 提出了一种改进 TV-MPCC 策略。在改进型控制策略中, 期望电压通过零矢量和有效矢量合成, 或者通过 2 个有效矢量合成。根据价值函数最小值原理, 在期望电压矢量中选出最优电压矢量。提出的 TV-MPCC 对比传统单矢量 MPCC, 能够降低电流脉动, 实现无差拍控制。系统的稳定性在一定程度上得到改善, 提高了电流的控制精度。

【参 考 文 献】

- [1] 夏长亮, 阎彦. 矩阵变换器-永磁同步电机系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 1.
- [2] 贾志起, 曲春林, 闫圣利, 等. 浅谈永磁电机在轮胎企业中的应用[J]. 橡塑技术与装备, 2020, 46(15): 6.
- [3] 包广清, 何婷, 刘小宝. 永磁同步电机有限集模型

预测直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 19.

- [4] 邹云飞, 吴传贵, 王洪涛, 等. 基于永磁同步电机的空间矢量控制研究[J]. 中国设备工程, 2021(4): 109.
- [5] 胡锦涛, 邵宜祥, 孙素娟. 基于永磁同步电机的新型直接转矩控制策略研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(2): 73.
- [6] SIAMI M, KHABURI D A, ABBASZADEH A, et al. Robustness improvement of predictive current control using prediction error correction for permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3458.
- [7] 翟良冠, 王家乐, 张蔚, 等. 永磁同步电机双矢量模型预测磁链控制[J]. 微电机, 2020, 53(11): 75.
- [8] 涂震, 赵阳, 余佳佳, 等. 基于双矢量的永磁同步电机模型预测电流控制[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(8): 721.
- [9] 徐艳平, 张保程, 周钦. 永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 222.
- [10] ZHANG Y, HUANG L, XU D, et al. Performance evaluation of two-vector-based model predictive current control of PMSM drives [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 4(2): 65.
- [11] WU M, SUN X, ZHU J, et al. Improved model predictive torque control for PMSM drives based on duty cycle optimization [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 20287785.
- [12] 耿强, 巨永龙, 周湛清. 五桥臂双永磁同步电机系统优化模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 8.
- [13] 王亮, 耿强, 周湛清. 五桥臂双永磁同步电机系统双矢量模型预测电流控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(2): 27.
- [14] BAEK J, KWAK S, PARK S, et al. A generalized predictive current control method based on two vectors for three-phase voltage source inverters [C] // 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015.
- [15] 张保程, 徐艳平, 周钦. 基于广义双矢量的 PMSM 模型预测电流控制[J]. 电气传动, 2017, 47(3): 17.
- [16] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.