

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.02.003

改进型永磁同步电机模型预测转矩控制

熊永跃, 李光中, 石川东, 舒中宾

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对传统模型预测转矩控制存在的在线计算量大、最优权重系数难以确定等问题, 提出一种改进型永磁同步电机模型预测转矩控制方法。通过在 $d-q$ 旋转坐标系下建立表贴式永磁同步电机模型, 由预测转矩控制目标确定模型预测所需的参数预测值, 将转矩和磁链进行标幺化处理, 并将转矩误差和磁链误差转换成转矩误差率和磁链误差率, 再加入磁链约束方程得到无权重系数的代价函数。同时采用简化电流预测的计算方法, 降低预测过程中的核心计算量。仿真结果表明, 所提方法在保证控制性能的同时可以显著降低系统在线计算量, 而且谐波幅值显著降低, 改善了波形质量, 提高了电压利用率。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测控制; 直接转矩控制; 代价函数

中图分类号: TM341; TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2022)02-0015-09

引文格式: 熊永跃, 李光中, 石川东, 等. 改进型永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(2): 15-23.

Improved Model Predictive Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

XIONG Yongyue, LI Guangzhong, SHI Chuandong, SHU Zhongbin

(College of Electrical and Informatica Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the flaws of large amount of on-line calculation and difficulty in the determination of the optimal weight coefficient in the traditional model predictive torque control, an improved model predictive torque control method has thus been proposed for the permanent magnet synchronous motor. Based on an establishment of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor model in the $d-q$ rotating coordinate system, the predicted parameters required for model prediction can be determined by the predicted torque control target, with the torque and flux standardized, and the torque error and flux error transformed into torque error rate and flux error rate, to be followed by the addition of the flux constraint equation to obtain the cost function of weightless coefficient. Meanwhile, a simplified current prediction calculation method is adopted to reduce the amount of core calculation in the forecasting process. Simulation results show that the proposed method can significantly reduce the amount of system online calculation while ensuring the control performance, and markedly reduce the harmonic amplitude, thus improving the waveform quality and the voltage utilization as well.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; model predictive control; direct torque control; cost function

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(20C0642)

作者简介: 熊永跃(1994-), 男, 安徽淮北人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子与电力传动,
E-mail: 1306809197@qq.com

通信作者: 舒中宾(1970-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学副教授, 主要研究方向为电力电子及电力传动,
E-mail: 123998439@qq.com

1 研究背景

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 因其具备体积小、效率高、噪音低、功率密度大、调速方式多、起动转矩大和过载能力强等诸多优点,使其被广泛应用在中小功率、高精度等伺服驱动和高性能专业驱动领域^[1]。直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 是应用在 PMSM 上控制效果好且成熟的一种控制方法,它通过滞环和开关电压矢量选择表控制定子磁链的幅值和相位,实现对转矩的直接控制。其响应速度快,但因滞环本身的特性,导致电机转矩波动较大、启动超调明显、逆变器开关频率较高^[2]。模型预测转矩控制 (model predictive torque control, MPTC) 是模型预测控制 (model predictive control, MPC) 发展来的一种新型智能控制算法,其采用模型预测、滚动优化、反馈校正等控制策略,通过单一控制器进行数据处理,选择合适的代价函数就可实现对转矩和磁链的控制,从所有可能状态中选择使代价函数值最小作为最优输出,从而达到最优控制效果^[3]。虽然 MPTC 具控制精确、鲁棒性好的优势,但其最优权重系数的确定需经实验试测,在线计算量较大,物理参数量纲难以统一。

针对 DTC 滞环存在的缺陷,国内外学者们进行了大量研究,提出了很多改进的 DTC 方案,如空间电压矢量调制^[4]、无差拍控制^[5]、占空比调制^[6-7]和 MPC^[8-10]等。针对 MPTC 的最优权重系数确定问题,文献[11]提出了一种改进的模型预测转矩控制方法,即用无差拍控制转矩和磁链预测电压矢量,消除了权重系数,但此方法延长了预测步数,增大了系统计算量。文献[12]设计了一种性能指标型代价函数,电机预测模型来自定子磁链的空间函数,但实现不同控制目标的权重系数需多次测试。文献[13]考虑以不同约束条件的成本函数来进行优化,并利用成本函数估算有限控制集中各电压矢量的占空比,从而得到两电平逆变器的最优电压矢量作为系统的控制量,该方法设计较为复杂,计算用时增加 1 倍。文献[14]设计了将磁链和转矩控制转换为相对误差率控制的成本函数,从而消除了权重系数,但受备选电压自身限制,会产生较大的磁链波动。针对 MPTC 存在的在线计算量大的问题,文献[15]改进了电压矢量的合成方式,并将电流预测计算量减半,但计算量简化有限。文献[16]对模型进行了简化,将电压矢量幅值和角度作为控制变量,设计了变幅值、变角度的备选电压矢量集合,其可以减少计算用时,但省略了对零矢量的使用,寻优空间缩小了,结果可能并不是最

优控制矢量。文献[17]以转矩和定子磁链误差阈值作为参考,误差在阈值之内的,以零电压矢量为最优电压矢量,只对零电压矢量作用下的转矩和定子磁链进行预测,降低了计算量但是误差阈值的选定不具备通用性。

本文在传统 MPTC 的基础上提出了一种改进型永磁同步电机模型预测转矩控制方法,将转矩和磁链进行标么化处理,选取参考转矩和参考磁链为基准值,得到统一量纲的标么值,再将转矩误差和磁链误差转化为转矩误差率和磁链误差率,从而消除了权重系数。通过给定系统参考转矩和定子磁链,将逆变器输出的三相电流和位置传感器读取的速度经一拍延时补偿输入转子和定子磁链估计模块,得到采样时刻电磁转矩和定子磁链估算值,对于预测过程中最为复杂的电流预测值 i_s^{k+1} ,经推导得到简化电流预测的转矩预测公式,降低了预测系统的在线计算量。

2 PMSM 系统数学模型

本文研究对象为隐极式永磁同步电机,假定电机满足基波假设、线性假设、对称性假设及忽略电流集肤效应、铁心损耗和涡流等现象^[18],永磁同步电机基础物理模型如下。

定子电压动态方程:

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{u}_s 为定子电压矢量; R_s 为定子电阻; \mathbf{i}_s 为定子电流矢量; $\boldsymbol{\psi}_s$ 为定子磁链矢量。

转子磁链方程可表示为

$$\boldsymbol{\psi}_r = \mathbf{i}_s L_m + \mathbf{i}_r L_r, \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\psi}_r$ 为转子磁链矢量; L_m 为互感; \mathbf{i}_r 为转子电流矢量; L_r 为转子自感。

定子磁链方程可表示为

$$\boldsymbol{\psi}_s = \mathbf{i}_s L_s + \mathbf{i}_r L_m. \quad (3)$$

定子磁链由转子磁场产生,故式(3)可表示为

$$\boldsymbol{\psi}_s = \mathbf{i}_s L_s + \boldsymbol{\psi}_m e^{j\theta_r}. \quad (4)$$

式中: L_s 为定子自感; $\boldsymbol{\psi}_m$ 为转子磁链幅值; θ_r 为转子位置; j 为虚数单位。

将式(4)代入式(1)得:

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + L_s \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + j\boldsymbol{\psi}_m \omega_r e^{j\theta_r}. \quad (5)$$

式中 ω_r 为转子电角速度。

式(5)两边同乘 $e^{-j\theta_r}$, 得到定子电压空间电压矢量 $\mathbf{u}_s^{(r)} = \mathbf{u}_s e^{-j\theta_r}$, 因此可将式(5)改写为

$$\mathbf{u}_s^{(r)} = R_s \mathbf{i}_s^{(r)} + L_s \frac{d\mathbf{i}_s^{(r)}}{dt} + jL_s \omega_r \mathbf{i}_s^{(r)} + j\psi_m \omega_r. \quad (6)$$

在 d - q 坐标系中将式 (6) 分解为

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - L_s \omega_r i_{sq}, \quad (7)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + L_s \omega_r i_{sd} + j\psi_m \omega_r. \quad (8)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 分别为定子直、交轴电压; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为定子直、交轴电流。

电机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_m i_{sq}. \quad (9)$$

机械转子动态方程如下:

$$\frac{d\omega_r^m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L) - \frac{B}{J} \omega_r^m. \quad (10)$$

电角速度为

$$\omega_r = p \omega_r^m. \quad (11)$$

式 (9)~(11) 中: T_e 为电磁转矩; p 为电机极对数; T_L 为负载转矩; ω_r^m 为转子的机械角速度; J 为转动惯量; B 为摩擦系数。

3 PMSM 模型预测转矩控制系统

模型预测的当前控制动作, 是在每一个采样瞬间通过求解一个有限时域开环最优控制问题而获得。过程的当前状态作为最优控制问题的初始状态, 解得的最优控制序列只实施第一个控制作用并仅将此状态作用于系统, 然后依次循环, 实现模型预测的实时滚动优化控制^[19]。

3.1 PMSM 模型预测转矩控制方程

对式 (1) 进行一阶欧拉离散化处理得到当前 k 时刻的定子磁链估算值:

$$\hat{\psi}_s(k) = \hat{\psi}_s(k-1) + T_s \mathbf{u}_s(k) - R_s T_s \mathbf{i}_s(k). \quad (12)$$

转子磁链方程为

$$\hat{\psi}_r = \frac{L_r}{L_m} \hat{\psi}_s(t) + \mathbf{i}_s \left(L_m - \frac{L_r L_s}{L_m} \right). \quad (13)$$

对式 (13) 进行一阶欧拉公式离散, 得到转子磁链估算值:

$$\hat{\psi}_r(k) = \frac{L_r}{L_m} \hat{\psi}_s(k) + \mathbf{i}_s(k) \left(L_m - \frac{L_r L_s}{L_m} \right). \quad (14)$$

MPC 需要预测下一个采样时刻 $k+1$ 的电磁转矩 T 和定子磁链 ψ_s , 定子磁链预测值计算式如下:

$$\psi_s^p(k+1) = \hat{\psi}_s(k) + T_s \mathbf{u}_s(k) - R_s T_s \mathbf{i}_s(k), \quad (15)$$

$$T = \frac{3}{2} p \text{Im}(\psi_s^p \mathbf{i}_s). \quad (16)$$

转矩预测值为

$$T^p(k+1) = \frac{3}{2} p \text{Im}[\bar{\psi}_s^p(k+1) \mathbf{i}_s^p(k+1)]. \quad (17)$$

系统的参考转矩 T_e^* 由速度环 PI 控制器输出, 参考磁链 ψ_s^* 由最大转矩电流比 (maximum torque per ampere, MPTA) 控制输出。

3.2 延时补偿

系统实际运行过程中, 会出现控制信号延时的现象, 其主要由采样间隔、计算时间及生成 PWM 的时间造成, 即实际作用的控制电压与待调节的电流之间存在一个采样周期延时^[20], 会影响系统控制精度。延时误差由采样频率决定, 采样频率越低, 误差越大。但采样频率越高, 系统运行数据处理计算负担越大, 所以需要取满足控制精度的最小采样频率, 然后对其进行延时补偿以尽可能消除延时误差。

将式 (1) 进行离散化, 然后将式 (15) 代入式 (1) 中, 并对其进行一阶欧拉离散化处理, 得到预测电流表达式如下:

$$\mathbf{i}_s(k+1) = \mathbf{i}_s(k) + \frac{T_s}{L_s} [\mathbf{u}_s(k) + R_s \mathbf{i}_s(k) - j\omega \psi_f e^{j\theta}]. \quad (18)$$

3.3 传统模型预测控制

传统模型预测一般选用两电平电压源逆变器, 两电平逆变器有 8 种开关状态, 对应 8 个基本电压矢量, 基本电压矢量分布如图 1 所示, 有 6 个有效矢量 $\mathbf{u}_1 \sim \mathbf{u}_6$, 2 个零矢量 \mathbf{u}_0 和 \mathbf{u}_7 。所以模型预测备选电压矢量集为 $\mathbf{U}_s \in \{\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{u}_4, \mathbf{u}_5, \mathbf{u}_6, \mathbf{u}_7\}$, 其中, \mathbf{u}_0 对应的开关状态为 (000), \mathbf{u}_7 对应的开关状态为 (111)。

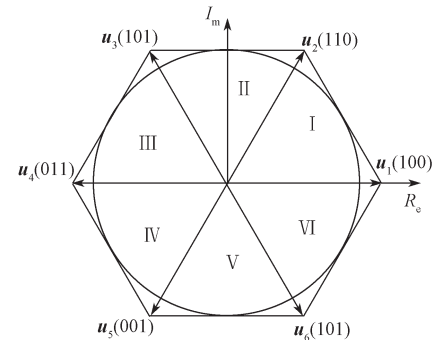


图 1 基本电压矢量分布图

Fig. 1 Basic voltage vector distribution

逆变器的开关状态由预测控制模型选择, 预测控制模型在每个周期内会将所有备选电压矢量预测的磁链和转矩代入代价函数计算出函数值, 并从中选择最小的函数值 g 作为最优矢量控制, 对应的电压矢量

即为最优电压矢量^[20],具体寻优过程如图2所示。

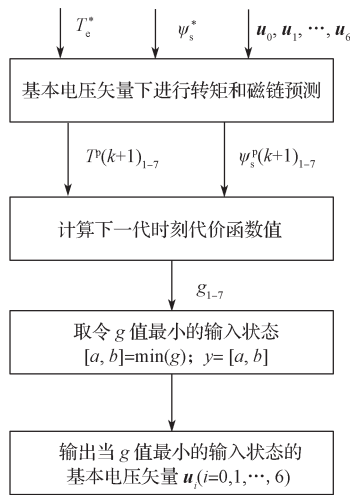


图2 预测寻优过程图

Fig. 2 Prediction diagram of the optimization process

因此,模型预测转矩控制的控制目标为磁链和转矩预测值与参考值误差最小化。

代价函数一般为

$$g = |T^p(k+1) - T_e^*| + \lambda_\psi |\psi_s^p(k+1) - \psi_s^*|. \quad (19)$$

式中: λ_ψ 为权重系数,可以调整转矩和磁链在代价函数中的权重,如果两者权重相等,可以构造出权重系数的表达式, $\lambda_\psi = T_N / |\psi_M|$; T_N 为电机额定转矩; $|\psi_M|$ 为电机额定磁链幅值,在实际应用中需要在计算数据上下试验,取最优的权重系数。

3.4 改进型模型预测

3.4.1 代价函数的改进

一般的权重系数 λ_ψ 用以调节转矩和磁链在代价函数中的权重,但权重系数设计没有固定方法,需在实验中取不同的数值反复测试,才能得到理想权重系数,一般代价函数还存在物理量纲不统一的缺陷。对此,本研究将转矩和磁链进行标幺化处理,选取参考转矩和参考磁链为基准值,得到统一量纲的标幺值,再将转矩误差和磁链误差转换成转矩误差率和磁链误差率,最后添加磁链约束方程,得到的无权重系数的代价函数为

$$g = \sqrt{\left[\frac{T^p(k+1) - T_e^*}{T_e^*} \right]^2 + \left[\frac{\psi_s^p(k+1) - \psi_s^*}{\psi_s^*} \right]^2} + g_m. \quad (20)$$

式中: $T^p(k+1)$ 、 $\psi_s^p(k+1)$ 分别为转矩和磁链预测值;

T_e^* 、 ψ_s^* 分别为转矩和磁链参考值;

g_m 为预测磁链约束函数,且

$$g_m = \begin{cases} g_L, & |\psi_s^p(k+1) - \psi_s^*| > 0.01; \\ 0, & |\psi_s^p(k+1) - \psi_s^*| \leq 0.01. \end{cases}$$

无磁链约束时,正常情况下 g 值小于 1,当 $|\psi_s^p(k+1) - \psi_s^*| > 0.01$ 时,此状态下磁链预测值与参考值的差值超出阈值, $g_m = g_L$, g_L 取一个大于 100 的数值,如 1000,最终得到的 g 值远大于正常值,在预测寻优时将被排除,当 $|\psi_s^p(k+1) - \psi_s^*| \leq 0.01$ 时,此状态下磁链预测值与参考值的差值在阈值内, $g_m = 0$, g_m 不参与代价函数的计算。

3.4.2 计算量的简化

模型预测还存在在线计算量大的缺陷,其主要原因是每个周期需要对两电平电压源逆变器的 7 种备选电压矢量作用分别进行计算,以预测出下一时刻相应的磁链和转矩,再将其代入代价函数,得到 7 个 g 值。在 $T^p(k+1)$ 、 $\psi_s^p(k+1)$ 的计算过程中电流预测值 $i_s(k+1)$ 是最为复杂的,如果能有效降低电流预测值 $i_s(k+1)$ 的计算量,模型预测系统的在线计算难度将显著降低。

将式(15)代入式(18),可以消除 $u_s(k)$,得

$$i_s(k+1) = i_{s0}(k) + \frac{T_s}{L_s} \psi_s(k+1). \quad (21)$$

$$\text{式中: } i_{s0}(k) = i_s(k) + \frac{1}{L_s} \psi_s(k) - \frac{T_s}{L_s} j\omega \psi_s(k). \quad (22)$$

将式(21)代入式(17),得

$$T^p(k+1) = \frac{3}{2} p \text{Im}[\bar{\psi}_s^p(k+1) i_{s0}^k]. \quad (23)$$

所以,使用式(24)计算转矩预测值时,只需预测磁链 $\bar{\psi}_s^p(k+1)$,电流 $i_{s0}(k)$ 只需通过式(23)进行一次计算即可得出,这样就可以显著降低预测系统的在线计算量。

3.5 波形的改善

将 PWM 发生器替换为空间矢量脉宽调制器(space vector pulse width modulation, SVPWM),SVPWM 是一种优化的 PWM 调制方法,SVPWM 能够对空间旋转矢量进行合成和跟踪,其具备减小谐波、改善波形质量、提高电压利用率等优点。将开关周期设为 T_s , T_1 、 T_2 分别为矢量 u_1 、 u_2 在一个开关周期中的持续时间, T_0 、 T_7 为零矢量作用时间。由正弦定律可算出 4 个矢量在同一周期内分别作用的时间为

$$\begin{cases} T_1 = m T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right), \\ T_2 = m T_s \sin\theta, \\ T_0 = T_7 = \frac{T_s - T_1 - T_2}{2}. \end{cases} \quad (24)$$

式中: m 为 SVPWM 调制系数, $m = \frac{\sqrt{3}}{u_d} |\mathbf{u}^*|$, 可令 $m=1$, 此时电压利用率由 0.5 上升至 0.577, 电压利

用率提高了 15.4%。

本文所提的改进型永磁同步电机模型预测转矩控制结构框图如图 3 所示。

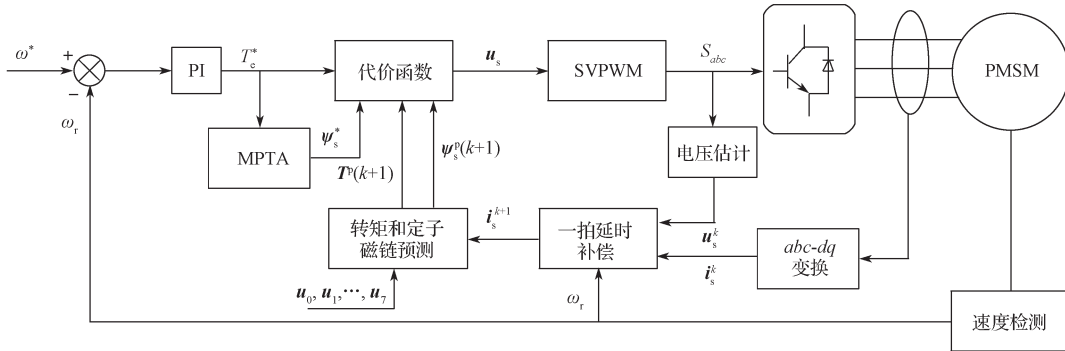


图 3 改进型 MPTC 结构框图

Fig. 3 Improved MPTC structure block diagram

合成矢量方法如图 4 所示。

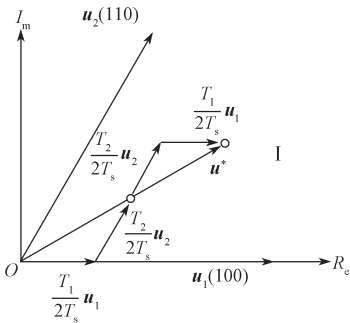


图 4 U^* 在 I 区合成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of U^* synthesis in zone I

4 仿真验证

为了验证本文所提方法的有效性, 在 Matlab/Simulink 对传统 MPTC 和改进型 MPTC 进行对比分析, 对于传统 MPTC 权重系数 λ_ψ 在实验中分别选取 0.1, 1, 10, 100 等进行初调, 最终选取权重系数为 30, $K_p=0.25$, $K_i=15$, 采样频率均取 10 kHz, 运行时间 0.6 s, 电机的参数见表 1。

表 1 电机参数

Table 1 Motor parameters

电机参数	取值
直流母线电压 U_{dc}/V	310
电机极对数 p	3
定子电阻 R_s/Ω	0.9
永磁体磁链 Ψ_f/Wb	0.038
$d-q$ 轴电感 L/mH	6.552
额定转速 $\omega_e/(\text{rad}\cdot\text{min}^{-1})$	1 500
额定转矩 $T_e/(N\cdot m)$	4
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.001 2

4.1 稳态性能

给定电机参考速度为 1 500 rad/min, 空载启动,

图 5、图 6 分别为传统 MPTC 的电机定子电流 i_q 、定子磁链波形、转矩波动和电机转速。

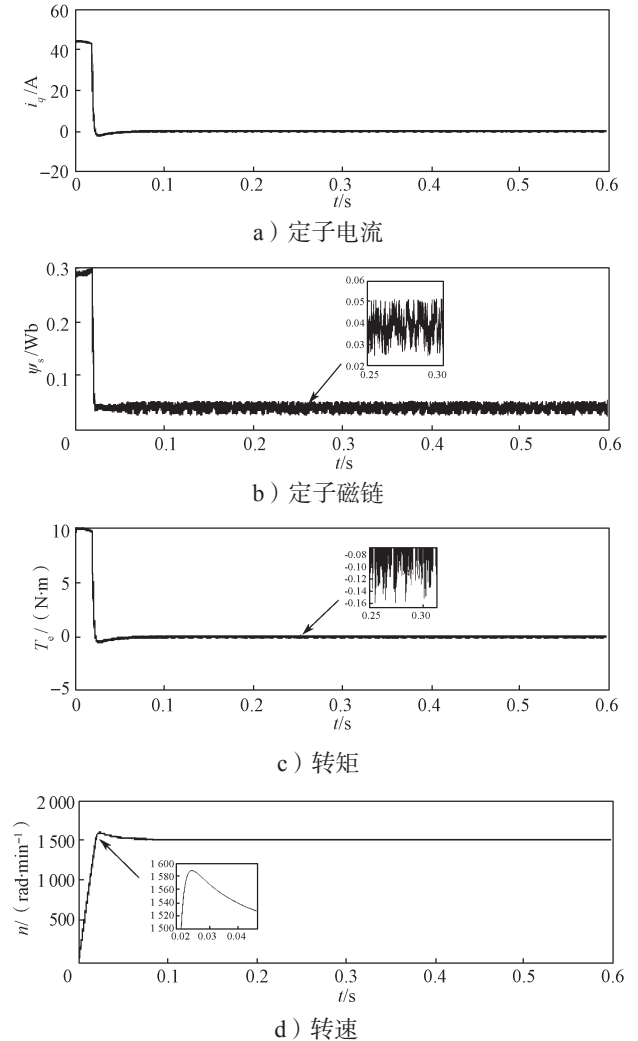


图 5 传统 MPTC 空载启动电机定子电流、定子磁链、转矩和转速波形图

Fig. 5 Waveform diagram of stator current, stator flux as well as torque and speed of traditional MPTC no-load starting motor

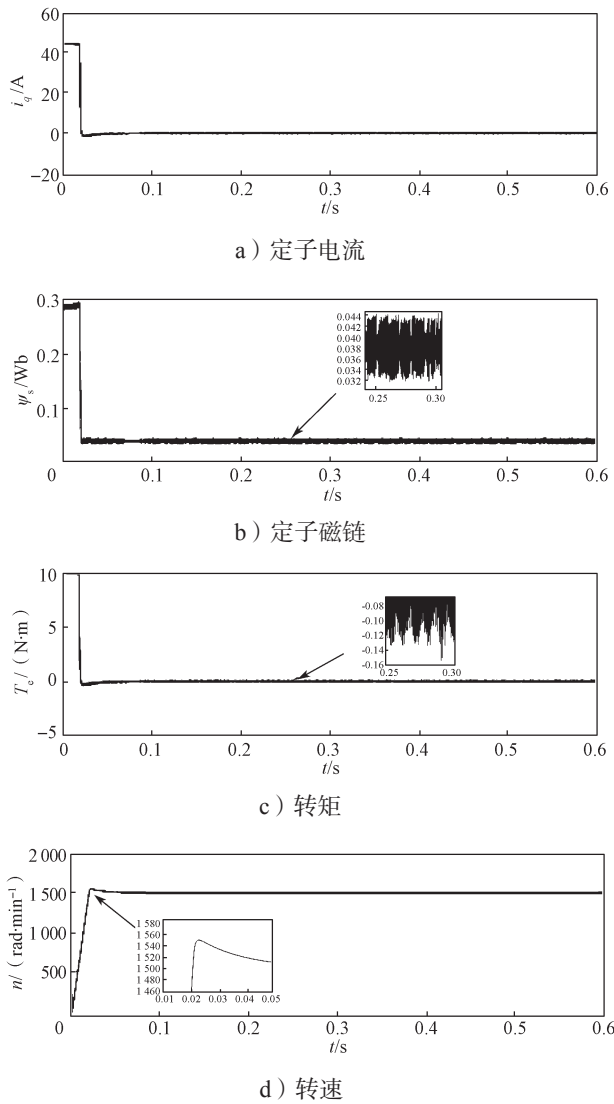


图6 改进型MPTC空载启动电机定子电流、定子磁链、转矩和转速波形图

Fig. 6 Waveform diagram of stator current, stator flux as well as torque and speed of improved MPTC no-load starting motor

对比图5~6可以看出,改进型MPTC具备较快的响应速度和较小的超调量,电机回归稳态较快。

由图5和图6中的曲线对比分析可知,传统MPTC在0.023s达到最大转速1581rad/min,超调量为5.4%,改进型MPTC在0.021s到达最大转速1545rad/min,超调量为3.0%,较传统MPTC下降了2.4%。传统MPTC磁链波动范围为0.025~0.05Wb,而改进型MPTC磁链波动范围为0.032~0.044Wb,可见,改进型MPTC波动小于传统MPTC。转矩波动从-0.16~0.16N·m降低到-0.14~0.14N·m。

为进一步验证改进后的控制效果,在额定转速下,进行恒定负载(5N·m)启动测试,得到两种模型的电机定子电流、定子磁链波形、转矩波形和电机转速波形图,如图7、图8所示。

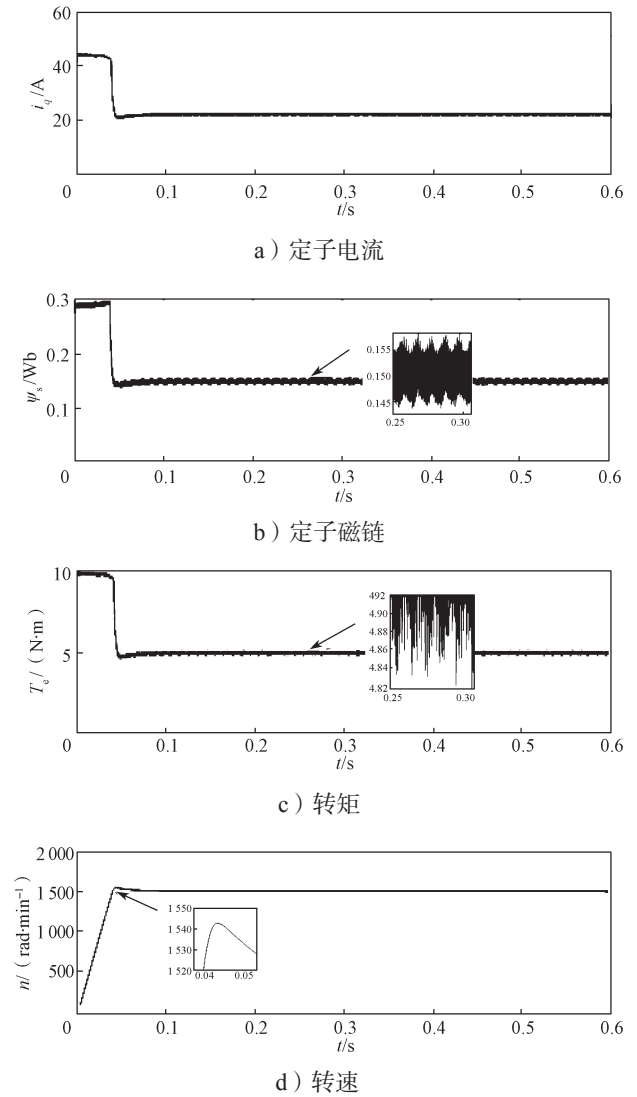
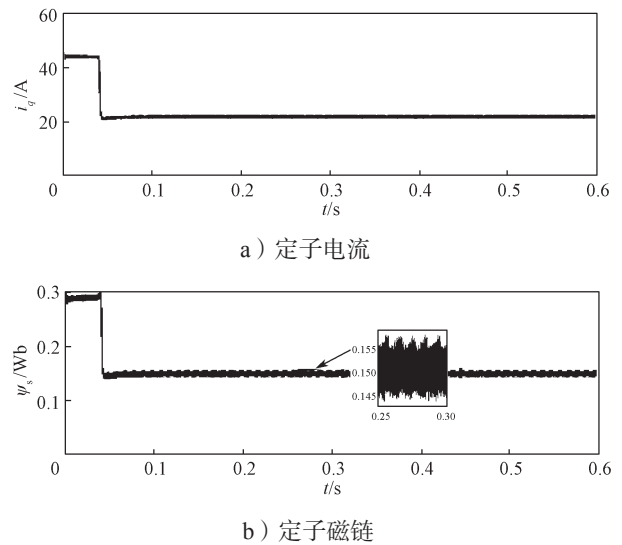


图7 传统MPTC恒定负载启动电机定子电流、定子磁链、转矩和转速波形图

Fig. 7 Waveform diagram of stator current, stator flux as well as torque and speed of traditional MPTC constant load starting motor



b) 定子磁链

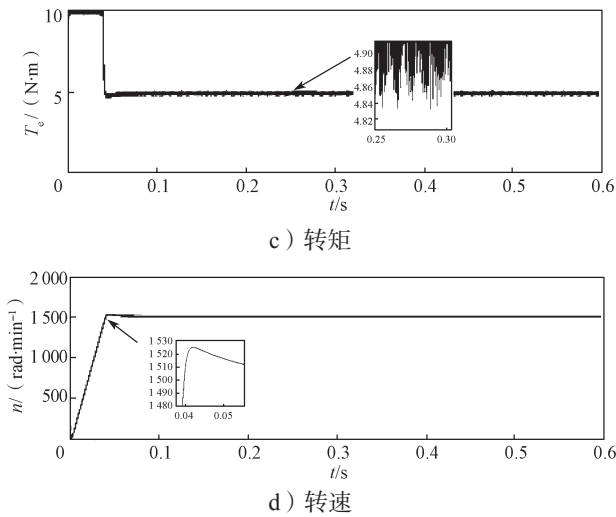


图 8 改进型 MPTC 恒定负载启动电机定子电流、定子磁链、转矩和转速波形图

Fig. 8 Waveform diagram of stator current, stator flux as well as torque and speed of improved MPTC constant load starting motor

传统 MPTC 电机在 0.046 s 到达最大转速 1 543 rad/min, 超调量为 2.86%, 改进型 MPTC 转速整体平稳, 在 0.041 s 达最大转速 1 522 rad/min, 超调量为 1.47%。传统 MPTC 磁链波动范围为 0.144~0.160 Wb, 改进型 MPTC 磁链波动范围为 0.145~0.156 Wb, 转矩波动从 0.35 N·m 下降至 0.31 N·m。

表 2 为空载和恒定负载启动下的电机磁链波动、转矩波动及转速超调, 从表 2 中数据对比可以看出, 改进型 MPTC 稳态性能比传统 MPTC 更好。

表 2 两种模型电机稳态性能分析

Table 2 Steady-state performance analysis of two motors models

负载 / (N·m)	模型名称	磁链波动 / Wb	转矩波动 / (N·m)	超调 / %
0	传统 MPTC	0.025	0.32	5.40
	改进型 MPTC	0.012	0.28	3.00
5	传统 MPTC	0.016	0.35	2.86
	改进型 MPTC	0.011	0.31	1.47

在恒定负载时, 通过调用 windows 系统的时钟采用 $etime(t_1, t_2)$ 并和 clock 配合来计算 t_1 、 t_2 之间的时间差, 得到模型在线运行时间, 对传统 MPTC 和改进型 MPTC 进行运行速度比较, 得到表 3, 改进型 MPTC 比传统 MPTC 运行速度约提高了 19.52%。

表 3 两种模型在线运行所需时间对比表

Table 3 Comparison table of the time required for online operation of the two models

模型名称	所用时间 /s
传统 MPTC	5.164
改进型 MPTC	4.156

4.2 动态响应性能

为了验证改进型 MPTC 动态响应性能, 给定转速 1 500 rad/min, 初始转矩为 4 N·m, 启动后, 在 0.2 s 时, 转矩突加到 7 N·m, 在 0.4 s 时, 转矩突降到 3 N·m。传统 MPTC 的仿真波形如图 9 所示, 改进型 MPTC 的仿真波形如图 10 所示。

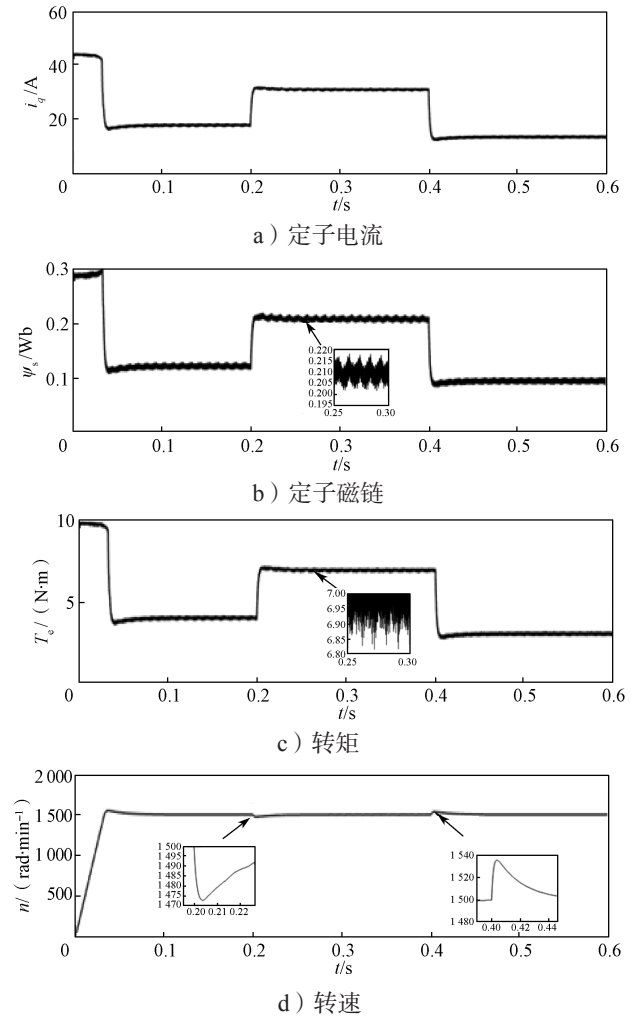


图 9 传统 MPTC 动态响应电机定子电流、定子磁链、转矩和转速波形图

Fig. 9 Waveform diagram of stator current, stator flux, as well as torque and speed of traditional MPTC dynamic response motor

在 0.2 s 突加负载后, 传统 MPTC 转速在 0.203 s 降至 1 472 rad/min, 改进型 MPTC 转速在 0.201 s 降至 1 485 rad/min, 两者转速降落相差 13 rad/min, 调节时间由 0.083 s 降至 0.064 s。

在 0.4 s 负载突降后, 传统 MPTC 转速在 0.403 s 上升到 1 538 rad/min, 改进型的 MPTC 在 0.401 s 升至 1 521 rad/min, 转速上升值相差 17 rad/min, 调节时间由 0.084 s 降至 0.065 s, 可见改进型 MPTC 转速动态响应优于传统型 MPTC。

传统 MPTC 磁链波动范围为 0.202~0.218 Wb,

改进型 MPTC 磁链波动范围为 0.201~0.213 Wb, 转矩波动范围分别为 6.82~7.19 N·m 和 6.88~7.13 N·m, 改进型 MPTC 的转矩波动为传统型 MPTC 的 67.57%, 磁链波动为传统型 MPTC 的 75.00%, 可见改进型 MPTC 的动态响应效果更好。

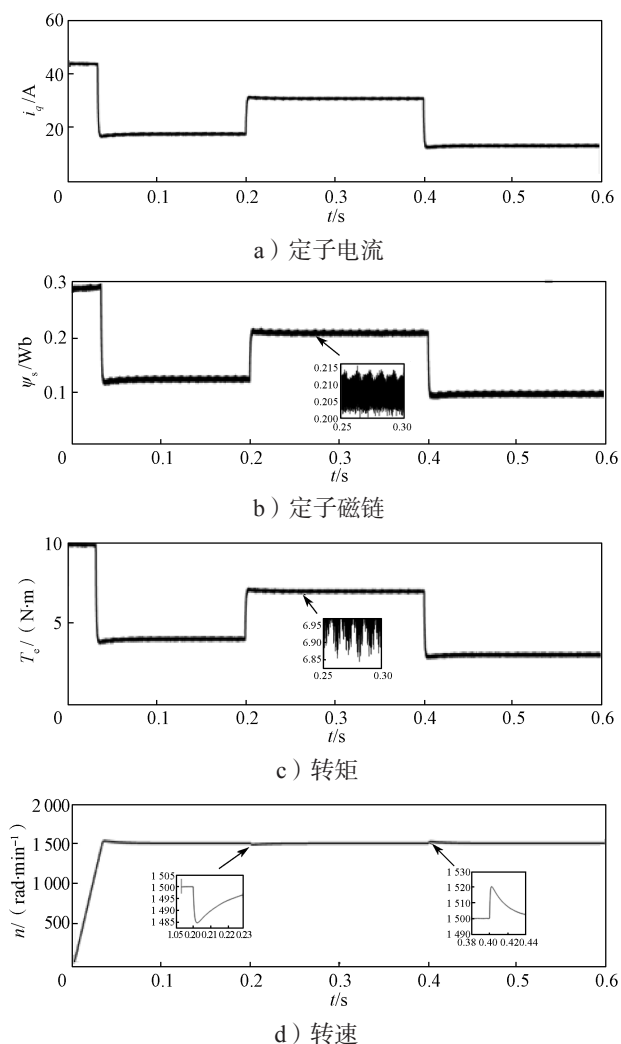


图 10 改进型 MPTC 动态响应电机定子电流、定子磁链、转矩和转速波形图

Fig. 10 Waveform diagram of stator current, stator flux, as well as torque and speed of Improved MPTC dynamic response motor

5 结论

本文通过将转矩和磁链进行标么化处理, 消除了传统代价函数的权重系数, 采用简化电流预测的方法, 显著降低预测系统的在线计算量, 仿真结果表明本文所提方法的有效性, 与传统 MPTC 相比, 本文所提方法具备如下优势:

1) 消除了权重系数, 统一量纲, 无需多次实验寻找最优权重;

2) 降低了在线计算量, 减少了计算用时, 增加了模型预测控制的实用性;

3) 有效减少谐波, 改善波形质量, 提高了电压利用率。

参考文献:

- [1] 张雷, 李航, 宋晓娜. 无刷直流电机直接转矩控制系统的优化设计[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(10): 110-119.
ZHANG Lei, LI Hang, SONG Xiaona. An Optimization Design Method of Direct Torque Fuzzy Control Systems for Brushless DC Motors[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(10): 110-119.
- [2] 徐向前, 徐文静, 杨士慧. 基于预测模型的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 29-33.
XU Xiangqian, XU Wenjing, YANG Shihui. Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Prediction Model[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(1): 29-33.
- [3] 常勇, 包广清, 杨梅, 等. 模型预测控制在永磁同步电机系统中的应用发展综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 11-17.
CHANG Yong, BAO Guangqing, YANG Mei, et al. Application and Development of Model Predictive Control in Permanent Magnet Synchronous Motor System[J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(8): 11-17.
- [4] ZHU H, XIAO X, LI Y D. Torque Ripple Reduction of the Torque Predictive Control Scheme for Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 871-877.
- [5] 扶文树, 储建华, 王刚. 永磁同步电机新型无差拍直接转矩控制[J]. 电气传动, 2021, 51(2): 9-14.
FU Wenshu, CHU Jianhua, WANG Gang. New Deadbeat Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Electric Drive, 2021, 51(2): 9-14.
- [6] 张志锋, 朱春海. 双三相永磁同步电机占空比直接转矩控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(4): 361-367.
ZHANG Zhifeng, ZHU Chunhai. Direct Torque Control Based on Duty Ratio for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(4): 361-367.
- [7] 吕帅帅, 林辉, 李兵强, 等. 一种改进的 PMSM 模型预测直接转矩控制方法[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(7): 102-111.
LÜ Shuaishuai, LIN Hui, LI Bingqiang, et al.

- Improved Model Predictive Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(7): 102-111.
- [8] CHEN L, XU H, SUN X D, et al. Three-Vector-Based Model Predictive Torque Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor of EVs[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1454-1465.
- [9] NIU S X, LUO Y X, FU W N, et al. Robust Model Predictive Control for a Three-Phase PMSM Motor with Improved Control Precision[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(1): 838-849.
- [10] VALENCIA D F, TARVIRDILU-ASL R, GARCIA C, et al. A Review of Predictive Control Techniques for Switched Reluctance Machine Drives. Part II: Torque Control, Assessment and Challenges[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 46(8): 1-9.
- [11] 张晓光, 张亮, 侯本帅. 永磁同步电机优化模型预测转矩控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(16): 4800-4809, 4905.
ZHANG Xiaoguang, ZHANG Liang, HOU Benshuai. Improved Model Predictive Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(16): 4800-4809, 4905.
- [12] 牛峰, 李奎, 王尧. 永磁同步电机模型预测直接转矩控制[J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(12): 60-67, 74.
NIU Feng, LI Kui, WANG Yao. Model Predictive Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Machines[J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(12): 60-67, 74.
- [13] 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): 19-24.
BAO Guangqing, HE Ting, LIU Xiaobao. Direct Torque Control of PMSM with Modified FCSMPC[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2018, 45(2): 19-24.
- [14] 李耀华, 刘洋, 孟祥臻. 一种表面式永磁同步电机有限状态集模型预测直接转矩控制[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(8): 33-43.
LI Yaohua, LIU Yang, MENG Xiangzhen. Finite Control Set Model Predictive Direct Torque Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(8): 33-43.
- [15] 盛明钢, 沈安文, 罗欣. 一种简化的PMSM连续控制集模型预测电流控制[J]. *微特电机*, 2019, 47(5): 36-40, 46.
SHENG Minggang, SHEN Anwen, LUO Xin. A Simplified Continue Control Set MPCC of PMSM[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2019, 47(5): 36-40, 46.
- [16] 李耀华, 苏锦仕, 秦辉, 等. 永磁同步电机有限控制集模型预测转矩控制系统研究[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(12): 8-15, 46.
LI Yaohua, SU Jinshi, QIN Hui, et al. Finite Control Set Model Predictive Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor System[J]. *Electric Machines and Control Application*, 2019, 46(12): 8-15, 46.
- [17] 苏丹丹, 李浩东, 尹延周, 等. 改进的永磁同步电机模型预测直接转矩控制策略[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(6): 666-672.
SU Dandan, LI Haodong, YIN Yanzhou, et al. Improved Model Predictive Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(6): 666-672.
- [18] LI Y H, YANG Q D, REN J Y. Model Predictive Direct Torque Control of Surface PMSM System Based on Basic Voltage Vector of VSI[C]//2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). Quanzhou: IEEE, 2019: 1-6.
- [19] 刘珅, 高琳. 永磁同步电机的改进模型预测直接转矩控制[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(1): 10-17.
LIU Shen, GAO Lin. Improved Model of Predictive Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(1): 10-17.
- [20] 李耀华, 师浩浩, 任佳越, 等. 表面式永磁同步电机直接转矩控制系统自适应变角度电压矢量选择策略[J]. *微电机*, 2019, 52(6): 57-61.
LI Yaohua, SHI Haohao, REN Jiayue, et al. Adaptive Voltage Vector Selection Strategy with Variable Angle in Surface PMSM Direct Torque Control System[J]. *Micromotors*, 2019, 52(6): 57-61.

(责任编辑: 申剑)