

科技创新

永磁同步电机控制策略的仿真分析

许北杨, 于 通, 张明换, 朱雅光

(长安大学工程机械学院, 西安 710064)

摘要: 针对矢量控制中采用传统的 PI(比例-积分)控制策略控制永磁同步电机时动态控制性能较差,电机参数容易受到外界温度、负载等变化的影响,从而导致控制电机的精度和响应性较差的问题,提出一种模型预测控制方法来控制电机。该策略利用系统模型预测系统未来输入和状态,通过优化目标函数直接计算控制输入,显著提高动态性能和稳态精度,并且其处理非线性和参数变化能力强,可以很好地控制永磁同步电机这种非线性系统。根据仿真得到的波形图,模型预测控制在动态响应、抗干扰能力、低速运行性能及鲁棒性方面优于 PI 控制。因此,使用模型预测控制能够有效提升对永磁同步电机的控制性能。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测控制; 矢量控制; Simulink 仿真

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)05-0001-07

因具有高效、小巧、损耗低等优势,永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)在各领域应用中已经十分广泛^[1]。因此,关于 PMSM 的研究也愈加广泛,其中重中之重就是关于对 PMSM 的控制。电机控制是指对电机进行启动、运行、调速等操作,以实现启动快、响应速度快、效率和转矩输出性能优良等目标^[2]。目前关于市面上主要用来控制 PMSM 的方法是矢量控制策略,其中以定子电源 $i_d=0$ 控制最为常见。当 $i_d=0$ 时,定子电流矢量的直轴分量为零,所有电流都用于输出转矩,电机电压矢量的利用率达到最大,只需控制定子电源 i_q 即可实现电机转矩的控制^[3]。然而, $i_d=0$ 控制策略限制了电流在其他方向上的自由度,在电机对不同的负载和速度变化时控制较差^[4];并且电机参数在温度、负载发生变化时,容易因为控制策略对其的敏感性较大而导致性能下降^[5]。因此,为了更好地控制电机,采用先进的电机控制策略是非常有必要的。

目前看来,尽管控制理论的迅速发展使实现 PMSM 的高性能控制成为可能,但其复杂性对其广泛应用也产生了诸多限制。而模型预测控制

(model predictive control, MPC)策略的诞生为控制 PMSM 提供了一个更好的方案,其显著优点是能够通过预测未来状态并且优化当前控制输入,提供了快速和准确的动态响应^[6]。

Niu 等^[7]提出了一种具有强参数鲁棒性和高电流控制精度的新型三相永磁同步电机模型预测控制方法,减少参数敏感性问题,增强了对机器参数失配的鲁棒性。Yu 等^[8]提出了一种基于离散空间矢量调制和递归最小二乘参数识别的 MPC 方法,以提高 PMSM 的控制性能。Huang 等^[9]提出了一种双 MPC 策略,通过控制速度和电流,解决了 PMSM 系统在外部干扰下的响应速度慢和抗干扰能力差的问题。张平化等^[10]提出了一种基于虚拟电压矢量的无价值函数模型预测转矩控制策略,降低了电机的转矩脉动和电流谐波。李耀华等^[11]采用并联模型预测控制,为了消除权重系数,将多目标函数和单目标函数进行转换,再通过电压矢量集合来求交集,达到优化系统控制性能的目的。

上述研究结果均验证了 MPC 控制方法的有效性。本文以一台表贴式 PMSM 电机为研究对象,分

收稿日期: 2024-09-04

基金项目: 陕西省重点研发计划(2024GX-ZDCYL-01-23);陕西省国防科技“揭榜挂帅”项目(SXGF2023J008)

作者简介: 许北杨(1999—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机驱动器;于通(1997—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为四足机器人关节电机控制;张明换(1997—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为四足机器人运动规划与控制;通信作者朱雅光(1986—),男,陕西榆林人,教授,博士研究生导师,研究方向为仿生机器人、腿足机器人、并联机器人、仿生控制、自主导航和智能控制系统。

$$\begin{cases} K_p = \frac{L_q}{3T_s} \\ K_i = \frac{R_s}{3T_s} \end{cases} \quad (7)$$

1.2.2 PMSM 的速度环 PI 参数整定

在电流环设计完成之后,需要对转速环进行合理的设计,从而减小对系统扰动的影响,减小转速的波动,使得系统运行更加稳定。其结构框图如图 4 所示。

图 4 中第 1 个环节 $K_p + K_i/S$ 为设计的 PI 控制器;第 2 个环节为电流环的等效传递函数;第 3 个环节 $1/(1 + T_d S)$ 为系统延时环节;第 4 个环节 $3n_p \psi_f$ 为转换环节;第 5 个环节 $30/(\pi JS)$ 为电机运动方程传递函数。

在研究转速环时,电流环闭环传递函数需要被看作一阶惯性环节,即

$$G(S)_{\text{close}} = \frac{1}{3T_s S + 1} \quad (8)$$

由于转速外环存在延时环节,并且电流环相比于转速环的采样时间来说可以忽略不计,取负载转矩 $T_l = 0$,简化模型如图 5 所示。

此时,速度环系统的开环传递函数为

$$G_n(S)_{\text{open}} = K \frac{T_s S + 1}{S^2 (T_{s2} S + 1)} \quad (9)$$

式中: $K = 45P_n \psi_f K_i / (\pi J)$; $T_s = K_p / K_i$ 。

采用“振荡指标法”中最小 Mr 准则法,令 $h = T_s / \tau$,此处 $T_{s2} = \tau$,当 h 取值为 5 时,两时间常数比值关系最佳,稳定性、抗扰能力和响应速度最佳,将系统校正为三阶最优系统,则有

$$K = \frac{h + 1}{2h^2 \tau^2} \quad (10)$$

最终可以得到速度环的 PI 表达式为

$$\begin{cases} K_p = \frac{h + 1}{18h^2 \tau p_n \psi_f} \\ K_i = \frac{h + 1}{90h^2 \tau^2 p_n \psi_f} \end{cases} \quad (11)$$

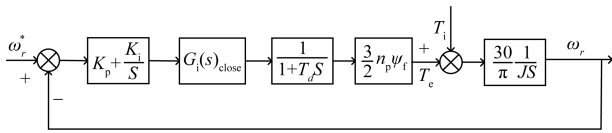


图 4 速度环 PI 控制结构图

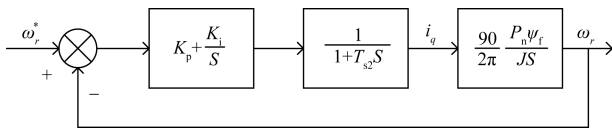


图 5 速度环 PI 简化控制图

1.3 模型预测控制原理

模型预测控制(MPC)是一种和模型优化密切相关的控制算法。其原理如图 6 所示。首先建立包含系统动态特性、约束条件和性能指标的数学模型。在每个控制周期,利用当前系统状态和控制输入,根据模型预测未来系统状态。然后,通过求解多目标优化问题生成最优控制序列,选择当前时刻的控制输入应用于系统。系统执行该输入后进入下一个周期,重复上述过程。通过不断在线求解开环优化问题,MPC 实现了闭环控制,能够应对系统动态变化和不确定性。

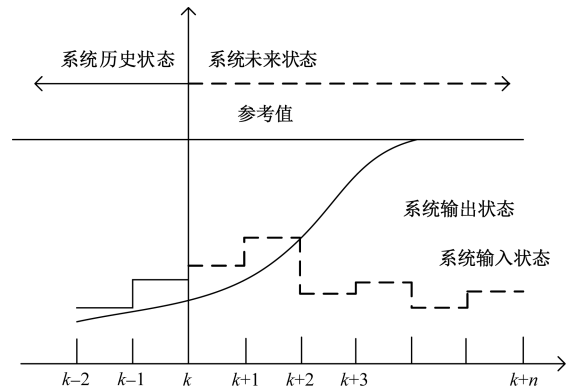


图 6 模型预测控制原理图

1.3.1 预测模型

基于 PMSM 的数学模型,可以得到电机电流环的非线性模型^[15]为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = (u_d - R_s i_d + \omega_e L_q i_q) / L_d \\ \frac{di_q}{dt} = (u_q - R_s i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e \psi_f) / L_d \end{cases} \quad (12)$$

由于本文所使用的 PMSM 为表贴式,因此其 $L_d = L_q = L$,在 dq 轴下,选择电机电流 i_d 和 i_q 为状态变量,可得 PMSM 的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega_e \\ \omega_e & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\psi_f \omega_e}{L} \end{bmatrix} \quad (13)$$

电流环的采样周期 T_s 较小,因此可以将单个控制周期中的输出转速 ω_e 视为常值,采用一阶欧拉方程进行离散化处理,从而得到 PMSM 离散化的电流预测模型为

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R_s}{L} & T_s \omega_e \\ -T_s \omega_e & 1 - \frac{T_s R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_s \psi_f \omega_e}{L} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的电流值； $i_d(k)$ 为 k 时刻反馈电流值。

1.3.2 代价函数

设价值函数为参考电流与预测电流的差值平方,即

$$\text{err}(i) = [i_d(k+1) - i_{dref}]^2 + [i_q(k+1) - i_{qref}]^2 \quad (15)$$

定子电流通过式(14)的预测方程,得到预测电流,由于两电平逆变器导通时,三相桥臂的开关状态有 8 种,分别为两个零矢量和 6 个有效的开关矢量状态。由滚动优化通过式(14)来预测下一时刻的电流值,借助价值函数寻找偏差最小的最优电流,然后将该电流对应的状态作为下一时刻的状态来控制电机。

2 仿真对比

在 MATLAB/Simulink 中建立表贴式 PMSM 的矢量控制和 MPC 控制的模型来进行仿真。取电机定子电阻 $R_s=0.135 \Omega$,等效电感 $L=0.0085 \text{ H}$,极对数为 4,转子磁链 $\psi_f=0.5 \text{ Wb}$,转动惯量 $J=0.027 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

2.1 电机空载启动仿真

设置仿真给定参考转速为 800 r/min ,在空载时启动 PMSM,观测两种控制策略的转速与电机启动转矩状态,如图 7 所示。

由图 7(a)可知,在额定转速 800 r/min 时,MPC 控制的峰值时间 t_p 在 0.01 s 左右,峰值转速约 850 r/min ,最大超调量 M_p 为 $(850 \sim 800)/800=6.25\%$,而 PI 控制的峰值时间 t_p 约 0.03 s ,峰值转速约 860 r/min ,最大超调量 M_p 为 $(860 \sim 800)/800=7.5\%$ 。可得自然频率 ξ 和阻尼比 ω_n 为

$$\zeta = \frac{-\ln M_p}{\sqrt{\pi^2 + (\ln M_p)^2}} \quad (16)$$

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (17)$$

计算可得,MPC 控制的自然频率 $\xi=0.662$,阻尼比 $\omega_n=419.01 \text{ rad/s}$,PI 控制的自然频率 $\xi=0.6362$,阻尼比 $\omega_n=135.72 \text{ rad/s}$ 。计算可绘制出其 bode 图,如图 8 所示。

由图 8 可知,电机由空载启动时,两种控制策略都可以使得电机稳定运行在期望转速 800 r/min ,与传统的 PI 控制相比,MPC 控制策略具有超调量小、响应快、速度稳定性好与达到稳定时间短的优点。电机在启动的过程中会出现瞬间的启动峰值扭矩,这是由于启动瞬间电机需要克服初始惯性并加速到

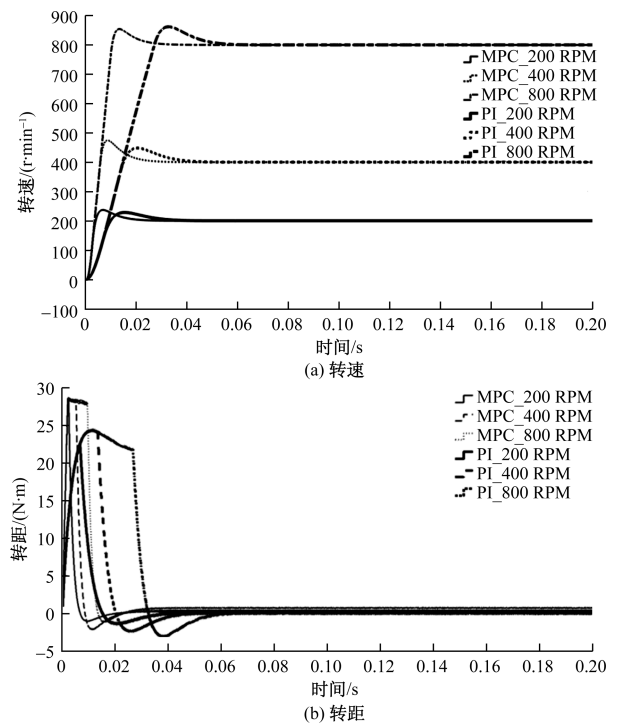


图 7 空载启动转速、转矩波形图

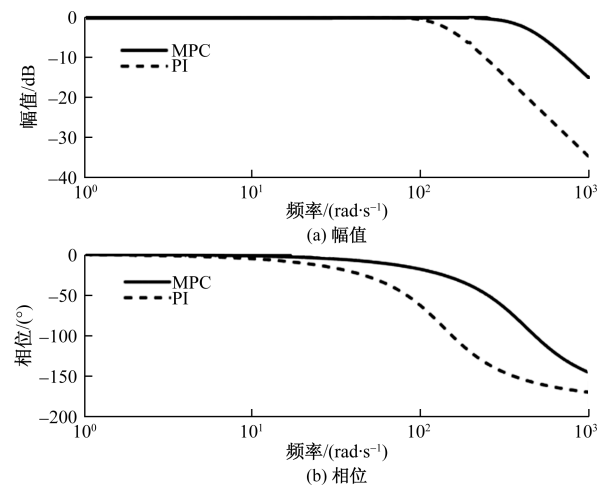


图 8 电机空载启动 bode 图

期望速度导致的瞬间电流和转矩突增,可以看出 MPC 控制明显比 PI 控制的稳定性更好。根据图 8 可知,在低频段 MPC 和 PI 的幅值和相位响应都非常高且接近一致;在中频段,PI 控制器的幅值和相位响应开始显著下降,而 MPC 的幅值响应下降得更缓慢;在高频段 PI 的幅值迅速下降,而 MPC 的幅值响应下降得相对平缓,这表明 MPC 在高频段有更好的增益保持能力。

2.2 加减载过程仿真

设置电机空载启动,当转速稳定在 200、400、800 r/min 时,在 0.2 s 时突然加上 $T_L = 8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的转矩负载,在 0.4 s 时突然减小负载至 0,电机转速、转矩变化波形如图 9 所示。

由图 9 可知,在电机负载发生突变瞬间,电机转速会发生些微抖变,可以看出 PI 控制和 MPC 控制均可在短期内快速恢复到给定的转速,但是 MPC 控制时转速稳定性比 PI 控制较好,恢复时间也更短,可知 MPC 更能有效的抑制 PMSM 转速波动。

2.3 电机调速过程

设置电机空载启动,在启动时设置参考转速为 300 r/min,在 0.2 s 时电机参考转速设置为 800 r/min,在 0.4 s 时转速参考值设置为 500 r/min,实现加减速仿真模拟,电机转速、转矩变化如图 10 所示。

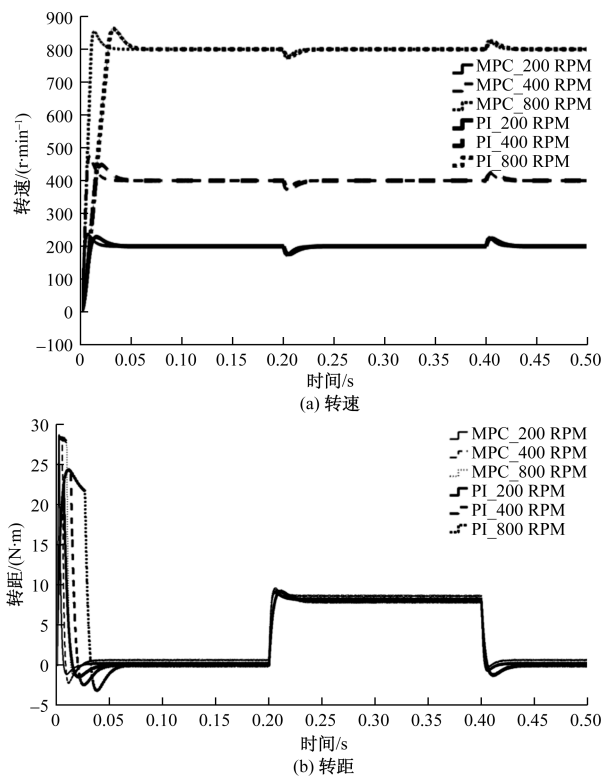


图 9 电机加减载转速、转矩波形图

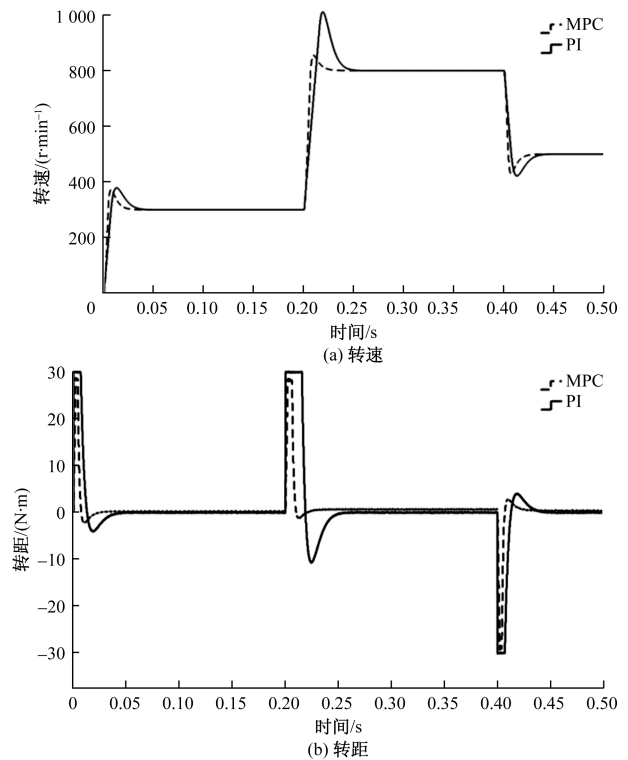


图 10 调速转速、转矩波形图

由图 10 可知,在 0.2 s 加上负载时,MPC 控制的峰值时间 t_p 在 0.02 s 左右,峰值转速约 850 r/min,最大超调量 M_p 为 $(850 \sim 800)/800 = 6.25\%$;PI 控制的峰值时间 t_p 约 0.03 s,峰值转速约 900 r/min,最大超调量 M_p 为 $(900 \sim 800)/800 = 12.5\%$ 。计算可得,MPC 控制的自然频率 $\xi = 0.662$,阻尼比 $\omega_n = 209.50 \text{ rad/s}$,PI 控制的自然频率 $\xi = 0.5519$,阻尼比 $\omega_n = 125.58 \text{ rad/s}$ 。计算可绘制出其 bode 图,如图 11 所示。由图 11 可知,在加减速仿真时,MPC 控制的 PMSM 转速变化平稳、切换转速时电机的力矩变化较小,控制效果比 PI 控制算法更为良好。根据 bode 图也可以看出,MPC 在全频带范围内都优于 PI 控制。

2.4 带载启动过程

设置电机转速参考值为 200、400、800 r/min,负载转矩为 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$,电机由静止启动的转速转矩波形图如图 12 所示。

对仿真得到的电机转速波形进行分析可看出,电机在带载启动、带载运行过程中,MPC 与 PI 都具有较好的控制电机转速的功能,但是 MPC 比 PI 控制永磁同步电机的动态性能更好、超调量更小、速度响应更快、转速稳定所需时间更短的优势。

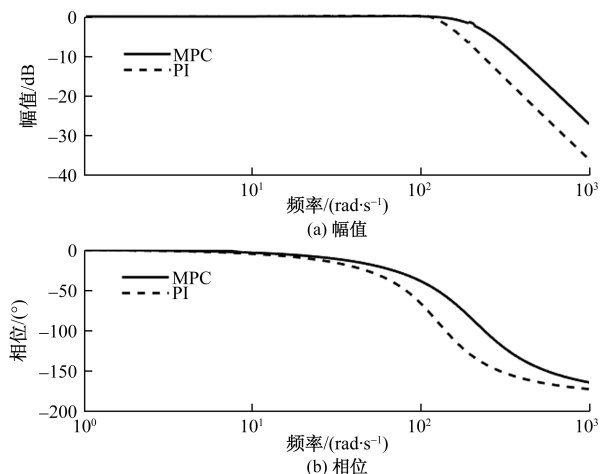


图 11 调速 bode 图

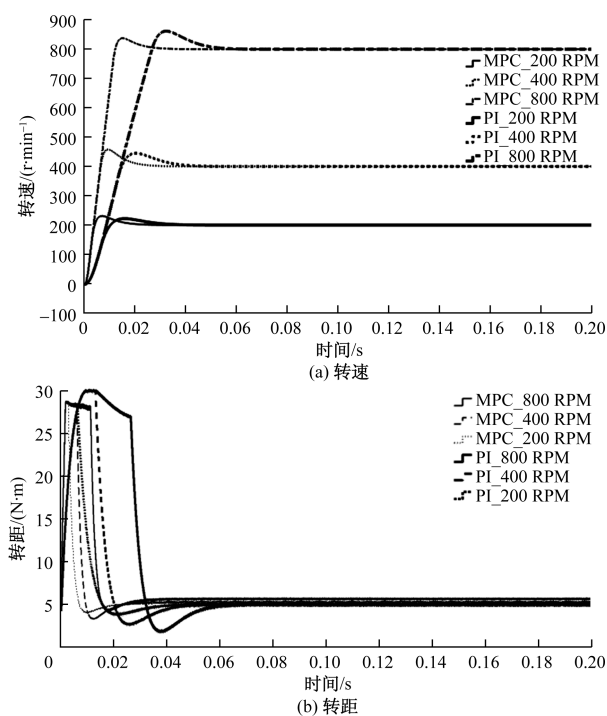


图 12 带载启动转速、转矩图

3 结论

为了提高对 PMSM 的动态控制,本文提出了优于传统的 PI 控制的 MPC 控制策略。结果发现在控制 PMSM 这种复杂的、非线性的对象时,PI 控制参数无法随着电机运行时的参数变化而实时调整,因此不能保证最优的控制。而 MPC 相比于 PI 控制,即免去了 PI 惯有的超调等问题,又简化了控制参数的选择。在空载、带载、不同转速以及加减载等工况下,MPC 控制均能较好地控制电机,其最大超调量、上升时间以及在全频带的响应均优于 PI 控制,具有更好的动态相应性能以及更强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 彭兴,魏声泽,胡明茂,等. 新型永磁同步电机有限控制集无模型预测电流控制[J]. 宁波工程学院学报, 2024, 36(3): 78-85.
- [2] 王艾萌,魏胜军. 基于改进型指数趋近率的永磁电机滑模控制研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 50-57.
- [3] KOIWA K, KURIBAYASHI T, ZANMA T, et al. Optimal current control for PMSM considering inverter output voltage limit: model predictive control and pulse-width modulation[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(12): 2044-2051.
- [4] MARCEL N, CLAUDIUIONEL N, DAN S, et al. Control of PMSM based on switched systems and field-oriented control strategy [J]. Automation, 2022, 3(4): 646-673.
- [5] ZHOU K, AI M, SUN D, et al. Field weakening operation control strategies of PMSM based on feedback linearization[J]. Energies, 2019, 12(23): 4526.
- [6] MOHAN M, NAIR R J. Simulation of model predictive control-space vector modulation fed PMSMdrive[J]. International Journal of Engineering Research and, 2015, 4(9): 949-954.
- [7] NIU S, LUO Y X, FU W, et al. Robust model predictive control for a three-phase pmsmmotor with improved control precision[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 99: 3013753.
- [8] YU H, WANG J J, XIN Z Z. Model predictive control for PMSM based on discrete space vector modulation with RLS parameter identification [J]. Energies, 2022, 15(11): 4041.
- [9] HUANG X, PAN H, YUAN K. Speed and current control of PMSM based on double MPC[C]//2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA). Hefei: IEEE, 2020: 300-304.
- [10] 张平化,范慧妍,王爽. 一种改进的双三相永磁同步电机无价值函数模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 30-38.
- [11] 李耀华,张鑫泉,董国庆,等. 永磁同步电机并联法模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(2): 41-48.
- [12] 赵涛,朱晓春,陈桂. 基于 Matlab 的数控交流伺服系统的仿真研究[J]. 中国制造业信息化, 2007(19): 34-37.
- [13] 杨狂彪,马静子,叶云翀,等. 基于虚拟电压矢量的永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 微特电机, 2024, 52(8): 48-52, 57.
- [14] 杨京东,杜贤羿,李大伟,等. 基于矢量控制的带式输送机 PMSM 调制研究 [J]. 山西煤炭, 2022, 42(4): 107-115.
- [15] 孙坚,汪意和. 三相矢量下永磁同步电机占空比预测电流控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(10): 59-66, 86.

Simulation Analysis of Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor

XU Beiyang, YU Tong, ZHANG Minghuan, ZHU Yaguang

(School of Engineering Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to solve the problem that the dynamic control performance of permanent magnet synchronous motor is poor when PI (proportional-integral) control strategy is used in vector control, and the motor parameters are easily affected by changes in external temperature and load, which leads to poor precision and responsiveness of the control motor, a model predictive control method is proposed to control the motor. This strategy uses the system model to predict the future input and state of the system, and directly calculates the control input by optimizing the objective function, which significantly improves the dynamic performance and steady-state accuracy. Moreover, with its strong ability to deal with nonlinearity and parameter changes, it can control the nonlinear system of permanent magnet synchronous motor well. According to the waveform diagram obtained by simulation, model predictive control is superior to PI control in dynamic response, anti-interference ability, low speed performance and robustness. Therefore, using model predictive control can effectively improve the control performance of permanent magnet synchronous motor.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; model predictive control; vector control; Simulink simulation