

基于前馈补偿的钻机系统永磁电机预测控制^{*}

朱奇先¹, 王睿敏², 董海鹰²

(1. 天水电气传动研究所有限责任公司 大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室,
甘肃 天水 741020;

2. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 将永磁同步电机(PMSM)作为石油钻机系统的驱动设备时,针对快速响应和强鲁棒性的控制要求以及复杂工况下的外部扰动问题,提出了基于前馈补偿的石油钻机系统 PMSM 预测控制策略。在该方法中,对电机转速环采用以电机数学模型为基础的预测控制,以实现 PMSM 的快速响应和提高鲁棒性,并引入扩展状态观测器进行扰动前馈补偿。仿真结果表明:与电机转速 PI 控制和动态矩阵控制相比,该控制策略响应速度更快,超调量小,在负载干扰下转速波动小且能更快地恢复至稳定值。

关键词: 永磁同步电机; 预测控制; 扰动补偿; 扩展状态观测器

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)01-0048-07

Predictive Control of Permanent Magnet Motor for Drilling Rig System Based on Feedforward Compensation

ZHU Qixian¹, WANG Ruimin², DONG Haiying²

(1. State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology,
Tianshui Electric Drive Research Institute Co., Ltd., Tianshui 741020, China;

2. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou 730070, China)

Abstract: When the permanent magnet synchronous motor (PMSM) was used as the driving device of the oil drilling rig system, the predictive control strategy of the PMSM in the oil drilling rig system based on feedforward compensation was proposed in view of the control requirements of fast response and strong robustness and the external disturbance in complex conditions. In this method, the predictive control based on the motor mathematical model was applied to the motor speed loop to realize the fast response and improve the robustness of the PMSM, and the extended state observer was introduced to realize the disturbance feedforward compensation. The simulation results showed that, compared with the speed PI control and dynamic matrix control of PMSM, the new control method had faster response and less overshoot, and the speed under the load interference exhibited less fluctuation and could be more quickly restored to the stable value.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); predictive control; disturbance compensation; extended state observer

0 引 言

在石油钻机的动力系统中,永磁同步电机(PMSM)在结构方面的灵活性使其在驱动负载、

精简设备方面有明显优势^[1-2]。此外,PMSM 具有功率密度较高、可靠性强、工作效率高等优点。因此,本文将 PMSM 作为石油钻机系统的动力设备,研究其控制策略。

^{*} 基金项目: 大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室开放基金课题(SKLLDJ032016014)

作者简介: 朱奇先(1963—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电气传动自动化。

在石油钻机系统工作过程中,具有非线性、时变、不确定性等典型工业工作特点,并且工作环境复杂多变。根据钻井机械工艺,要求转盘和绞车驱动电机在规定时间内达到且稳定于期望转速,出现负载干扰时保持转速不变;要求钻井泵驱动电机按照规定时间达到并稳定在期望的泵冲,管路压力发生变化时保持泵冲不变。因此将 PMSM 作为石油钻机的驱动设备时,要能实现快速响应和强鲁棒性的控制要求。模型预测控制 (MPC) 是新型的计算机控制算法,在许多领域中已经得到有效应用^[3-8],在 PMSM 的控制中也取得了大量研究成果^[9-13]。该算法通过多步预测、滚动优化和反馈校正等步骤实现最优控制,其控制效果好、鲁棒性强^[14-15]。

在 MPC 算法中,动态矩阵控制 (DMC) 算法利用的是对象的阶跃响应,是工业现场易于获得的非参数模型,鲁棒性强且计算简单,已在石油、化工领域的控制中取得成功的应用。文献[16]将 DMC 应用于 PMSM 的电流预测控制中,并成功证明 DMC 电流预测控制器比 PI 控制器的稳定性和快速性更好。

MPC 基于控制对象的模型,在分析石油钻机系统工作机组运行情况时,考虑到钻机系统工作环境及工作状况的复杂性,当发生未知且不可预测的外部扰动,甚至造成模型失配时,会使整个系统的转速控制性能出现明显的下降,同时电机自身的参数也会发生变化。针对这种情况,在基于 DMC 的 PMSM 系统的基础上,设计了基于扩展状态观测器 (ESO)^[17] 的扰动前馈补偿装置。通过仿真分析对比,证明了具有扰动前馈补偿装置的 DMC 具有更好的动态响应性能,并且在负载干扰下转速的稳定性更高,说明该控制策略更能匹配石油钻机系统在复杂工况下对于驱动电机的控制要求。

1 PMSM dq 轴数学模型

在将 PMSM 作为石油钻机系统的驱动设备时,由于表贴式 PMSM 的永磁磁极便于最优设计的实现,有利于提高电机的控制性能,所以将表贴式 PMSM 作为研究对象。为了便于研究,在建立 PMSM 数学模型前,作如下假设:(1) 定子三相绕组对称分布、气隙均匀且电机铁心饱和不计;(2)

涡流和磁滞损耗忽略不计;(3) 转子无阻尼绕组,永磁体无阻尼作用;(4) 反电动势为正弦波形。可得 PMSM 的 dq 轴数学模型如下。

电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - n_p \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + n_p \omega L_d i_d + n_p \omega \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

电磁转矩方程为

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

机械运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中: i_d 、 i_q 、 u_d 、 u_q ——定子电流和电压的 d 、 q 分量;

ψ_d 、 ψ_q ——磁链的 d 、 q 分量;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴电感;

R_s ——定子电阻;

ω ——转子机械角速度;

n_p ——极对数;

ψ_f ——永磁体磁链;

T_e 、 T_L ——电机的电磁转矩和负载转矩;

J ——转动惯量;

B ——黏滞摩擦因数。

2 预测控制器设计

PMSM 作为石油钻机系统的驱动设备时,要实现快速响应和强鲁棒性的控制。MPC 以电机的数学模型为基础,能够实现 PMSM 的快速响应,且鲁棒性较高。采用 MPC 中的 DMC 算法,利用对象的阶跃响应,是现场易得到的非参数模型,且该算法能有效地解决工业现场的时延问题,并提高控制系统的鲁棒性。DMC 算法的实现要经过模型预测、滚动优化和反馈校正步骤。其计算流程如图 1 所示。

2.1 预测模型

根据式(2),采用 $i_d = 0$ 控制策略时,电机电磁转矩公式为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_q \quad (4)$$

令负载转矩 $T_L = 0$,对式(3)两边同时取拉普

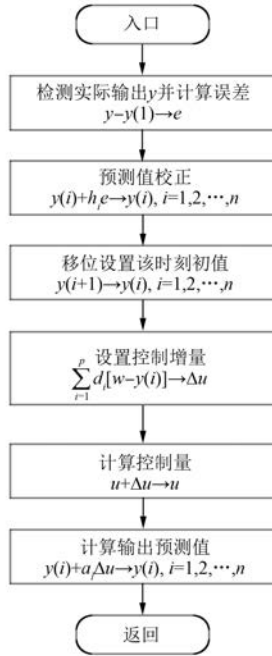


图1 DMC 计算流程框图

拉斯变换得频域模型为

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{i_q(s)} = \frac{K}{Js + B} \quad (5)$$

其中: $K = 1.5n_p\psi_f$ 。

从PMSM的被控对象式(5)的阶跃响应出发,将其动态特性用动态系数 $a_1, a_2, \dots, a_p$ 来表示。 p 为模型时域长度; a_p 为足够接近稳态值的系数。在 k 时刻,假定控制作用保持不变,对未来时刻的转速输出有初始预测值 $y_0^*(k+j|k)$ ($j=1, 2, \dots, p$)。将PMSM在 dq 坐标系的交轴电流 i_q 作为控制量,在连续的控制增量 $\Delta i_q(k), \dots, \Delta i_q(k+j-i)$ 作用下,未来各时刻的电机转速输出值为

$$\hat{Y}_p^* = a\Delta i_q(k) + Y_0^* \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} a = [a_1, a_2, \dots, a_p]^T \\ \hat{Y}_p^* = [\hat{y}^*(k+1|k), \hat{y}^*(k+2|k), \dots, \hat{y}^*(k+p|k)]^T \\ Y_0^* = [(k+1|k), (k+2|k), \dots, (k+p|k)]^T \end{cases} \quad \circ$$

2.2 滚动优化

DMC算法的具体控制增量由最优化准则式确定。最优化准则式为

$$J = \sum_{j=1}^p q(j) [\omega(k+j|k) - \hat{y}^*(k+j|k)]^2 + \sum_{j=1}^m r(j) [\Delta i_q(k+j-1)]^2 \quad (7)$$

其中: q, r 分别为误差权系数和控制权系数, $\omega(k+j|k)$ 为期望输出,令 $\omega(k+j|k)$ 为PMSM的转速给定参考轨迹。

若令:

$$W = [\omega(k+1|k), \omega(k+2|k), \dots, \omega(k+p|k)]^T$$

则最优化准则式(7)可表示为

$$J = Q(Y_p^* - W)^T(Y_p^* - W) + R\Delta U^T\Delta U \quad (8)$$

在式(8)中对控制向量求导,并令结果为零。具体滚动实施时,只取即时控制增量。通过式(9)求得即时控制增量:

$$\Delta u(k) = c^T(A^TQA + RE)^{-1}A^TQ(W - Y_0^*) = d^T(W - Y_0^*) \quad (9)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_p & a_{p-1} & \dots & a_{p-m+1} \end{bmatrix};$$

Q, R 分别表示由误差权系数和控制权系数组成的对角矩阵; $c^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$; d 为控制向量, $d^T = c^T(A^TQA + RE)^{-1}A^TQ$ 。

从而构成实际控制 $u(k)$, 即:

$$u(k) = i_q(k) + \Delta i_q(k) = i_q^*(k) \quad (10)$$

在实施了控制作用之后,采集下一时刻的电机输出转速 $y^*(k+1)$ 。

2.3 反馈校正

利用石油钻机系统PMSM的实时信息对预测进行修正,并进行新的优化。在 k 时刻对PMSM实施即时控制作用后,预测输出为

$$\hat{y}^*(k+1|k) = y_0^*(k+1|k) + a_1\Delta i_q(k) \quad (11)$$

将此时的预测值 $\hat{y}^*(k+1|k)$ 与检测到的PMSM的实际转速输出值 $y^*(k+1)$ 相比较,可得输出误差为

$$e^*(k+1) = y^*(k+1) - \hat{y}^*(k+1|k) \quad (12)$$

通过对误差 $e^*(k+1)$ 加权来修正对未来时刻PMSM转速的预测,即:

$$\tilde{Y}_p^* = \hat{Y}_p^* + h e^*(k+1) \quad (13)$$

式中: h ——单位向量。

$$\tilde{Y}_p^* = [\tilde{y}_p^*(k+1|k+1), \tilde{y}_p^*(k+2|k+1), \dots, \tilde{y}_p^*(k+p|k+1)]^T。$$

之后更新状态,将修正后的 PMSM 转速预测 $\tilde{Y}_p^*$ 作为下一时刻初始预测值。根据式(13)最终可得下一时刻 PMSM 的转速预测 $y_0^*(k+j|k+1)$ ($j=1, 2, \dots, p$) 为

$$\begin{cases} y_0^*(k+i|k+1) = \\ \hat{y}^*(k+i+1|k) + h_{i+1} e^*(k+1) \\ y_0^*(k+p|k+1) = \\ \hat{y}^*(k+p|k) + h_p e^*(k+1) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, p-1) \quad (14)$$

3 状态观测器设计

在 PMSM 石油钻机系统实际工作时,考虑到负载干扰等外部因素的影响,在基于 DMC 的 PMSM 基础上,增加基于 ESO 的扰动补偿装置^[9]。基本思路是将系统中的扰动量作为一个状态量,结合原有的状态变量,构造 ESO,利用系统中可测的信息如转速、电流等估计出系统不可测的扰动量,补偿扰动对系统的影响,从而提高系统的抗扰动性^[18]。具体设计过程如下。

考虑石油钻机系统 PMSM 参数变化和负载扰动时,其运动方程可表示为

$$\dot{\omega} = (a + \Delta a) i_q - (b + \Delta b) \omega - (c + \Delta c) T_L \quad (15)$$

其中: $a = p\psi_f/J, b = B/J, c = 1/J; \Delta a, \Delta b, \Delta c$ 为电机参数的摄动量。

将式(15)表示为

$$\dot{\omega} = a i_q^* + d(t) \quad (16)$$

式中: $d(t)$ ——总扰动量。

$$d(t) = \Delta a i_q - (b + \Delta b) \omega - (c + \Delta c) T_L + a(i_q - i_q^*)。$$

令状态变量 $x_1 = \omega, x_2 = d(t)$, 并令 $c(t)$ 为总扰动量 $d(t)$ 的变化率,则式(16)可扩展为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + a i_q^* \\ \dot{x}_2 = c(t) \end{cases} \quad (17)$$

根据文献[9,19],构造一个二阶 ESO,即:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + a i_q^* + p_1 e \\ \dot{z}_2 = p_2 e \end{cases} \quad (18)$$

式中: z_1 ——PMSM 角速度的估计值;

z_2 ——扰动量 $d(t)$ 的估计值。

系统的误差 e 为

$$e = z_1 - x_1 \quad (19)$$

令 $Z = [z_1 \ z_2]^T$, 输入变量 $u = i_q^*$, 输出变量 $y = \omega$, 则式(18)可表示为

$$\begin{cases} \dot{Z} = AZ + Bu - Le \\ e = CZ - y \end{cases} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B = [a \ 0]^T \\ L = [p_1 \ p_2]^T \\ C = [1 \ 0] \end{cases}$$

根据 ESO 理论,若使设计的 ESO 能较为准确地估计出系统变量,需要构造合适的矩阵 L ,使矩阵 $(A-LC)$ 稳定。

令:

$$\lambda(s) = |sE - (A - LC)| = s^2 + p_1 s + p_2 \quad (21)$$

则需要通过合理配置 p_1 和 p_2 ,以使 $\lambda(s)$ 的值为非负数^[20]。

令 $p_1 = 2p, p_2 = p^2$, 其中 $-p(p>0)$ 为 ESO 的闭环期望极点,可以使 $\lambda(s)$ 的值满足非负,此时 z_2 可渐近地估计扰动 $d(t)$ 。

将 ESO 估计的扰动量 z_2 作为基于 DMC 控制的 PMSM 的转速环前馈补偿控制,也即将通过式(10)得到的控制量 $i_q^*(k)$ 与前馈补偿量相结合,得到新的控制量为

$$u^*(k) = i_q^*(k) - \frac{z_2}{a} \quad (22)$$

通过由 ESO 得到的扰动量与之前的控制量结合作为 PMSM 的转速环前馈补偿装置,将 DMC 和 ESO 的优势相融合得到新的 PMSM 控制系统,框图如图 2 所示。

内电流环仍然采用 PI 调节的方式,外转速环则采用了 DMC 和 ESO 相结合的控制方式,反馈部分由 DMC 完成,ESO 通过对扰动量进行估计完成前馈补偿。

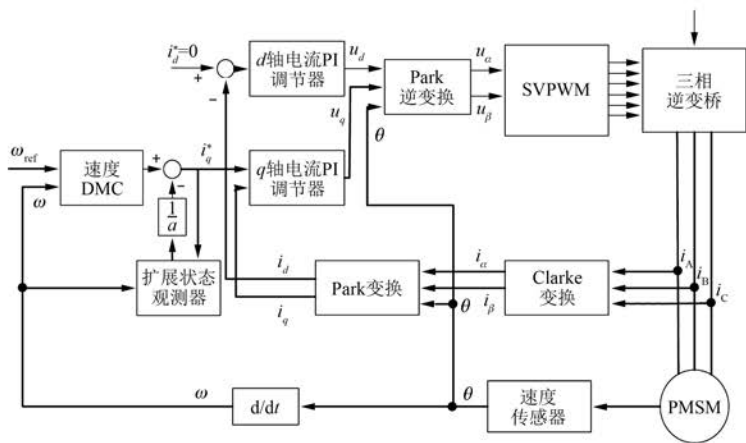


图 2 含前馈补偿的 PMSM 预测控制框图

4 仿 真

在 MATLAB/Simulink 中搭建模型,并进行仿真。PMSM 仿真参数如表 1 所示。令采样时间 $T_s=0.01$ s;模型长度 $n=20$;预测时域 $p=6$;控制时域 $m=4$;初始误差权系数 Q 为 $p \times p$ 维单位阵;初始控制权系数 R 为 $m \times m$ 维零矩阵;初始校正向量 h 为 n 维单位向量。通过 DMC 算法离线计算得出控制向量 d 。

表 1 PMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	3.45
绕组电感 L_s/H	0.012
摩擦因数 B	0.005
转子磁链 ψ_f/Wb	0.55
极对数 n_p	2
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.001 5
额定电压 U/V	380
额定转速 $\omega/(r \cdot min^{-1})$	1 500

4.1 动态响应仿真分析

设 PMSM 系统的转速给定值为 1 200 r/min, PMSM 系统带载 2 N·m 起动,对基于 DMC 和 ESO 的 PMSM 进行仿真。在同样的条件下分别对速度环 DMC 控制和 PI 控制的 PMSM 系统进行仿真。为了方便,将基于 DMC 和 ESO 的控制系统、DMC 系统和 PI 控制系统分别表示为系统 I、系统 II 和系统 III。图 3~图 5 分别为系统 I、系统 II 和

系统 III 带载起动的动态响应图。

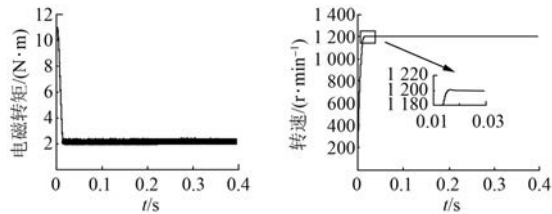


图 3 系统 I 带载起动动态响应图

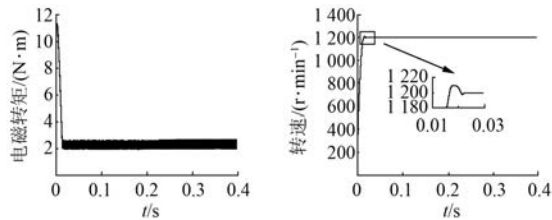


图 4 系统 II 带载起动动态响应图

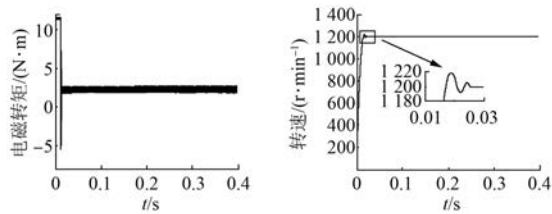


图 5 系统 III 带载起动动态响应图

由仿真结果可以看出基于 DMC 和 ESO 的控制方法不仅能够较快地到达转速参考值,而且在响应过程中超调量极小,转矩脉动的抑制效果更好,动态响应效果有了较大的提升。

4.2 抗负载分析

同样令 3 个系统带载 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 启动, 0.2 s 时分别加载和减载 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。图 6~图 8 分别为系统 I、系统 II 和系统 III 在负载干扰下的动态响应图。

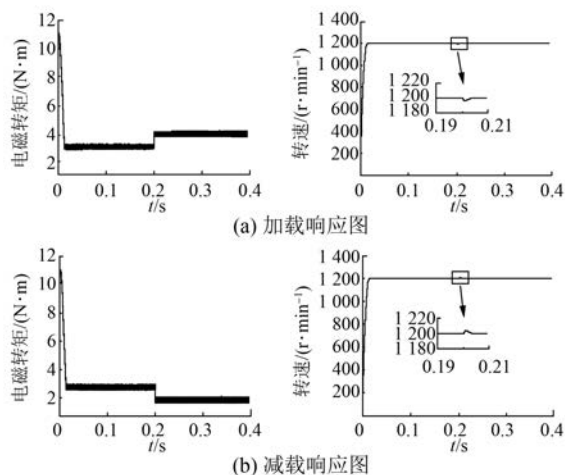


图 6 系统 I 负载干扰响应图

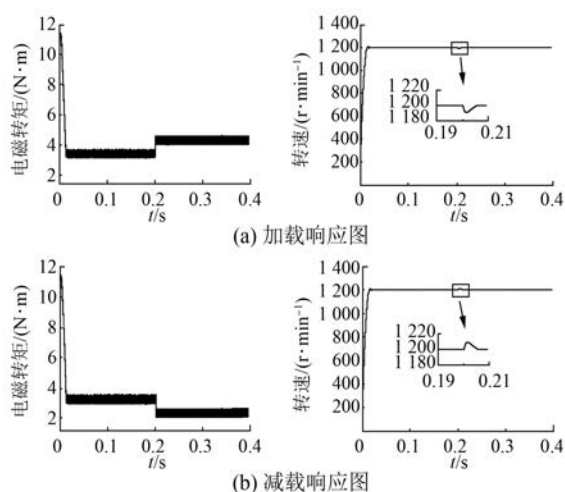


图 7 系统 II 负载干扰响应图

在石油钻机系统实际工作时会出现钻头所破碎岩层硬度不一的情况,也即转盘带动的钻头载荷变化不定,因此仿真时需要在考虑负载转矩增减变化不定的情况下进行。令 PMSM 系统带载 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 启动,在 0.1 s 时加载 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$,以 0.05 s 为周期,对 PMSM 持续施加不同负载扰动(0.15 s 时减载 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$, 0.2 s 时加载 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$, 0.25 s 时减载 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$, 0.3 s 时加载 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$),观察控制系统 I、系统 II 的响应情况,如图 9、图 10 所示。

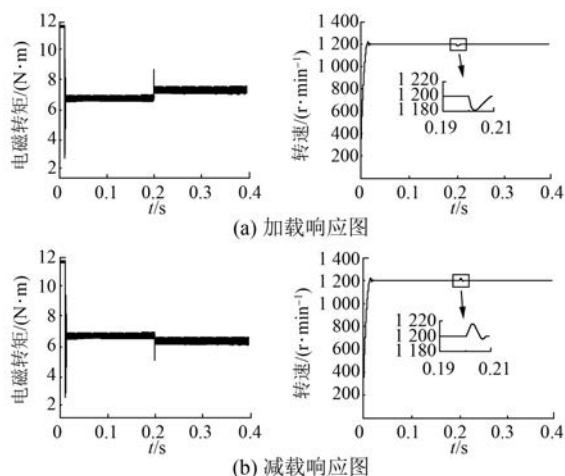


图 8 系统 III 负载干扰响应图

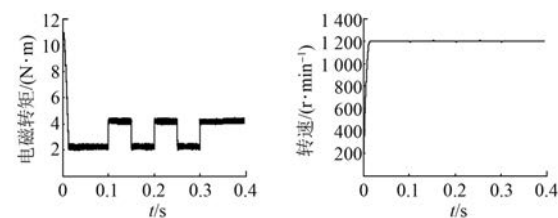


图 9 系统 I 加载减载响应图

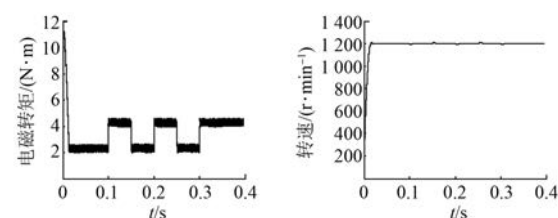


图 10 系统 II 加载减载响应图

由仿真结果可知,在基于 DMC 的 PMSM 基础上加入 ESO 的控制策略与 DMC 和 PI 控制相比,响应速度快,超调量小,转矩脉动的抑制效果更好,动态响应性能更好,并且在不同的负载扰动情况下转速受到的影响很小,转速幅值变化在 $\pm 4 \text{ r/min}$ 以内,具有更好的鲁棒性,证明了基于 DMC 和 ESO 的 PMSM 控制系统比基于 DMC 的 PMSM 系统更能应对在驱动石油钻机系统工作机组运行时的各种工况。

5 结 语

将 PMSM 作为石油钻机系统的驱动设备时,

针对快速响应和强鲁棒性的控制要求以及复杂工况下的外部扰动问题,提出了基于前馈补偿的石油钻机系统 PMSM 预测控制策略。该控制策略对电机转速环采用以电机数学模型为基础的预测控制,以实现 PMSM 的快速响应和提高鲁棒性,并引入 ESO 进行扰动补偿。通过 MATLAB/Simulink 平台与转速 PI 控制、DMC 进行了对比。仿真结果表明:该控制策略具有更好的动态响应性能,并且在负载干扰下具有更好的稳定性,证明了基于前馈补偿的石油钻机系统 PMSM 预测控制策略能满足石油钻机系统在复杂工况下对于驱动电机的控制要求。

【参考文献】

- [1] 孙庆群.石油生产及钻采机械概论[M].北京:中国石化出版社,2011.
- [2] 田树贵.国产电驱动钻机控制系统综述[J].电气传动自动化,1999,21(3): 3.
- [3] 孔小兵.永磁同步电机高效非线性模型预测控制[J].自动化学报,2014,40(9): 1959.
- [4] WANG T, GAO H, QIU J. A combined adaptive neural network and nonlinear model predictive control for multirate networked industrial process control[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(2): 416.
- [5] SUNG J Y, YOON H C. Generalized predictive control based on self-recurrent wavelet neural network for stable path tracking of mobile robots: adaptive learning rates approach [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2006, 53(6): 1381.
- [6] JAROSLA G, HAITHAM A R. Speed sensorless induction motor drive with predictive current controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 699.
- [7] 张巍,王昕,王振雷.基于证据网络的多变量 MPC 经济性能评估[J].化工学报,2012,63(11): 3585.
- [8] 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.
- [9] LIU H X, LI S H. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1171.
- [10] CHAI S, WANG L P, ROGERS E. A cascade MPC control structure for a PMSM with speed ripple minimization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 2978.
- [11] LIN C K. Model-free predictive current control for interior permanent-magnet synchronous motor drives based on current difference detection technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 667.
- [12] WANG W, ZHANG J, CHENG M. Common model predictive control for permanent-magnet synchronous machine drives considering single-phase open-circuit fault [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5862.
- [13] ZHU H, XIAO X. Torque ripple reduction of the torque predictive control scheme for permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 871.
- [14] WANG Y, BOYD S. Fast model predictive control using online optimization [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2): 267.
- [15] 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.
- [16] 王辉,薛珍珠,赵留羊,等.基于动态矩阵的永磁同步电机电流预测控制[J].电气传动,2017,47(4): 27.
- [17] YOO D C, YAU S S, GAO Z Q. On convergence of the linear extended state observer [C] // IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2006: 1645.
- [18] 刘旭东,李珂,孙静,等.基于广义预测和扩展状态观测器的永磁同步电机控制[J].控制理论与应用,2015,32(12): 1613.
- [19] 韩京清.从PID技术到“自抗扰控制”技术[J].控制工程,2002,9(3): 13.
- [20] MIKLOSOVIC R, GAO Z Q. A robust two-degree-of-freedom control design technique and its practical application [C] // Conf Rec 39th IEEE IAS Annu Meeting, Cleveland, USA, Oct, 3-7, 2004: 1495.

收稿日期: 2018-07-01