

永磁同步电机的无差拍电流预测控制优化算法

范佩樟^{1,2}, 刘凌^{1,2}, 靳东松^{1,2}, 刘思源^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对表贴式永磁同步电机(SPMSM)无差拍电流预测控制在电机参数发生偏差时会导致系统失稳, d 、 q 轴电流发生大幅度振荡的问题,提出了一种鲁棒前馈电流预测控制算法。用前一时刻的参考电流和当前时刻的采样电流代替传统电压预测式中的当前时刻的采样电流,改变采样电流与参考电流的闭环传递函数,采用鲁棒因子对系统的稳定裕度进行调节,提高了控制系统的鲁棒性和稳定裕度。仿真结果表明,当模型电感分别是参考电感的2倍和4倍时,所提出的鲁棒前馈电流预测控制算法比传统算法 q 轴电流的方差分别减少了61.5%和67.3%。此外,针对电机参数失配时稳态电流静差扩大的问题,提出了一种增量式电流静差消除算法。通过相邻时刻预测电压、实际电流与参考电流的差值来计算下一时刻的给定电压,消除电机磁链参数对稳态电流静差的影响;利用实际电流与参考电流的误差对给定电压进行补偿,以减少稳态电流静差。仿真结果表明,当模型磁链分别是参考磁链的0.5倍、0.4倍和0.375倍时,所提增量式电流静差消除算法比传统算法 q 轴电流的误差分别减少了38.69%、56.94%和54.66%。

关键词: 永磁同步电机;无差拍电流预测控制;稳定裕度;参数失配

中图分类号: TM301 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202304004 **文章编号:** 0253-987X(2023)04-0029-10

Optimization Algorithm of Deadbeat Current Predictive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor

FAN Peizhang^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, JIN Dongsong^{1,2}, LIU Siyuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049,

China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A robust feed forward current predictive control algorithm was proposed to solve the problem that the deadbeat current predictive control of surface mounted permanent magnet synchronous motor (PMSM) causes the system instability and the d , q axis current oscillates greatly due to the motor parameter deviation. Firstly, the reference current at the previous time and the sampling current at the current time were used to replace the sampling current at the current time in the traditional voltage prediction formula to change the close-loop transfer function of the sampling current and reference current, and then the robust factor was used to adjust the stability margin of the system to improve the robustness and stability margin of the control system. The

simulation results showed that when the model inductance was 2 and 4 times of the reference inductance respectively, the variance of the proposed robust feedforward current predictive control algorithm was reduced by 61.5% and 67.3% compared with the traditional algorithm. In addition, to solve the problem that the steady state current static error expands when the motor parameters are mismatched, an incremental current static error elimination algorithm was proposed. Firstly, the given voltage at the next time was calculated by the difference between the predicted voltage, actual current and reference current at the adjacent time to eliminate the influence of motor flux parameters on the static error of steady state current. Then, the error between actual current and reference current was used to compensate the given voltage to reduce the static error of steady state current. The simulation results showed that when the flux linkage of the model was 0.5 times, 0.4 times and 0.375 times of the reference flux linkage, respectively. The error of the proposed incremental current static error elimination algorithm was reduced by 38.69%, 56.94% and 54.66% compared with the traditional algorithm for q -axis current.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; deadbeat predictive current control; stability margin; parameters mismatch

永磁同步电机与其他传统的励磁电机相比,具有功率密度较高、效率高、转矩大和转速范围大等突出优势。永磁同步电机在石油化工行业、电动汽车和航空航天领域的广泛应用对于永磁同步电机的动态性能和稳态性能提出了更高的要求。因此,永磁同步电机已成为工业界和学术界的研究热点^[1-3]。本文采用的永磁同步电机是表贴式永磁同步电机(SPMSM)。

常见的永磁同步电机电流环控制算法有PI控制^[4-5]、滞环控制^[6]和预测控制^[7-10]。相比于PI控制和滞环控制,无差拍电流预测控制(DPCC)的优点是动态性能较好。然而,预测控制严重依赖于精确的电机模型,当SPMSM的模型参数与实际参数不匹配时,预测控制的控制性能受到显著影响,出现稳态误差、系统发散。因此,解决模型参数不匹配的问题是实现在预测控制高精度电流控制的关键。

目前,针对DPCC的研究主要集中于消除电机模型参数误差所带来的不利影响。思路大致可以分为两类。一类是采用扰动观测或者误差补偿措施,如滑模观测器^[11-16]、积分补偿和前馈补偿^[17]。另一类是提升电机模型参数的准确性,如引入参数辨识法。文献[18]提出了一种基于滑模指数趋近律的定子电流扰动观测器(SCDO),解决了参数误差带来的系统扰动问题和延时问题。文献[19]提出了一种基于积分滑模控制理论的新型误差补偿方案,在主控制回路中加入了干扰抑制项,引入超螺旋算法抑制抖振。文献[20]设计了一种新型的PI组合DPCC控制器,权重由模糊算法在线确定,但是

DPCC的动态性能受到了影响。文献[21]将前一个控制周期的跟踪误差项视为补偿项,引入代数补偿项来消除稳态误差,但是当存在未建模和其他干扰时,鲁棒性难以保证。文献[22]中利用 d 轴电流静差积分叠加到 d 轴电压上, q 轴电流静差积分值调整电机的磁链值,有效消除了稳态电流静差,但是没有考虑电感和电阻参数误差对于稳态电流的影响。

增量式模型是非传统的电机模型,可以消除部分参数对于算法性能的影响。目前,已经有增量式模型应用在无差拍电流预测控制算法中^[23]。

本文根据面向永磁同步电机无差拍电流预测控制的算法,深入研究电机参数不匹配对于系统稳定性和稳态时电流误差的影响,引入鲁棒因子和前馈控制改进电压预测方程,提高了系统的稳定裕度,同时采用增量式电机模型作为预测模型,通过相邻两个时刻的电压和电流的差值来预测下一时刻的电压,消去方程中的磁链参数,并采用实时电流误差补偿电压增量,有效消除了电流静差。仿真结果验证了所提控制算法的有效性。

1 无差拍电流预测控制

1.1 传统无差拍预测电流控制

在 d - q 旋转坐标系中,利用状态方程表示的SPMSM电流数学模型可以描述为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_e \\ \omega_e & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_e \psi_f}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: L 为电机的直轴与交轴同步电感; ω_e 为电角速度; R 是电机定子 d 、 q 轴电阻; ψ_f 为永磁体磁链。

当控制系统的采样周期 T_s 足够短时, 状态方程中的电流微分方程可以用一阶前向欧拉公式转化成离散方程, SPMSM 的离散电流预测模型为

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R}{L} & T_s \omega_e(k) \\ -T_s \omega_e(k) & 1 - \frac{T_s R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_s \psi_f}{L} \omega_e(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 k 表示离散量。

传统的无差拍预测电流控制中, 对离散预测模型式(2)进行变形得到电压预测公式。

1.2 算法稳定性分析

在本文中, 模型参数记为 R 、 L 、 ψ_f , 模型参数是电压预测公式中使用的参数, 真实参数记为 R_0 、 L_0 、 ψ_{f0} , 在实际电流计算时, 采用的是真实参数。电机运行时由于外界环境的变化, 电机参数会发生变化, 导致在 $k+1$ 时刻电流实际值与给定值存在偏差。

根据上一小节的介绍, 在采样时刻 k , 通过电压预测公式计算出作用到电机上的控制电压, k 时刻的电机控制电压为

$$\begin{cases} u_d(k) = Ri_d(k) + L \frac{i_d^*(k) - i_d(k)}{T_s} - \omega_e Li_q(k) \\ u_q(k) = Ri_q(k) + L \frac{i_q^*(k) - i_q(k)}{T_s} + \omega_e Li_d(k) + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 为 k 时刻 d 、 q 轴的采样电流; $i_d^*(k)$ 、 $i_q^*(k)$ 为 k 时刻 d 、 q 轴的参考电流; $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 为 k 时刻 d 、 q 轴的输出电压; 上述参数均为模型参数。

根据电机预测模型式(2)可以算出 $k+1$ 时刻实际电流值, 式中参数采用真实参数 R_0 、 L_0 、 ψ_{f0} 。

将式(3)代入(2)中可得

$$\begin{cases} L_0 i_d(k+1) - Li_d^*(k) = [T_s \Delta R - \Delta L] i_d(k) - \Delta L T_s \omega_e i_q(k) \\ L_0 i_q(k+1) - Li_q^*(k) = [T_s \Delta R - \Delta L] i_q(k) + \Delta L T_s \omega_e i_d(k) + \Delta \psi_f T_s \omega_e \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta R = R - R_0$; $\Delta L = L - L_0$; $\Delta \psi = \psi_f - \psi_{f0}$ 。

由于采样时间 T_s 足够小, 因此 $T_s R$ 也足够小, 可以忽略不计, 同时将磁链偏差导致的反电动势当成扰动项。对式(4)进行 Z 变换, 得到电流实际值与电流参考值的闭环离散传递函数

$$\frac{i_{dq}(z)}{i_{dq}^*(z)} = \frac{(L/L_0)z}{z - 1 + L/L_0} \quad (5)$$

由式(5)可知, 离散传递函数的一个闭环极点 $z=1-L/L_0$, 由控制理论可知闭环极点位于 z 平面的单位圆内, 系统处于稳定状态, 则系统的稳定区间为

$$0 < L < 2L_0 \quad (6)$$

通过式(6)可以看出, 当模型参数小于 2 倍的真实参数时, 无差拍电流预测算法收敛, 当模型参数大于 2 倍的真实参数时, 无差拍电流预测算法将不再收敛, 系统将处于不稳定状态。

1.3 电流稳态误差分析

无差拍电流预测算法的目的是使得下一周期的实际电流可以跟随给定电流。理想情况下, 电机处于稳态时, 实际电流应与参考电流相等。然而, 参数的不匹配导致稳态时实际电流与参考电流存在误差。将式(3)代入到式(2)中, 可以得到实际电流与参考电流的关系

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \frac{L}{L_0} i_d^*(k) + \frac{T_s \Delta R - \Delta L}{L_0} i_d(k) - \frac{\Delta L}{L_0} T_s \omega_e i_q(k) \\ i_q(k+1) = \frac{L}{L_0} i_q^*(k) + \frac{T_s \Delta R - \Delta L}{L_0} i_q(k) + \frac{\Delta L}{L_0} T_s \omega_e i_d(k) + \frac{\Delta \psi_f}{L_0} T_s \omega_e \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 电机的实际电流与电机参数有很大的关系。下面依次分析电感、电阻和磁链参数误差对电流稳态误差的影响。

电阻参数不匹配的影响: 当只有电阻参数发生变化时, 由于采用的是 $i_d=0$ 控制策略, 电阻参数的变化不会对 d 轴电流误差产生影响, 而电阻参数的变化会对 q 轴电流误差产生影响。

电感参数不匹配的影响: 当只有电感参数发生变化时, 由式(7)可以看出, 电感参数的变化对 d 轴和 q 轴电流误差均会造成影响。

磁链参数不匹配的影响: 当只有磁链参数发生变化时, 由式(7)可以看出, 磁链参数的变化会影响 q 轴电流稳态误差, 而 d 轴电流误差方程中不含有磁链参数, 因此磁链参数的变化不会影响 d 轴电流稳态误差。

2 无差拍鲁棒前馈电流预测控制

根据 1.2 小节的稳定性分析可以看出,当模型电感参数大于 2 倍真实电感参数时,无差拍电流预测控制算法将不收敛。针对此问题,引入前馈电流和权重因子修正反馈电流,提出无差拍鲁棒前馈电流预测控制算法(RFDPCC),改进后的 k 时刻电压预测方程为

$$\begin{cases} u_d(k) = \left(R - \frac{L}{T_s}\right)[ai_d(k) + bi_d^*(k-1)] + \\ \frac{L}{T_s}i_d^*(k) - \omega_e L[ai_q(k) + bi_q^*(k-1)] \\ u_q(k) = \left(R - \frac{L}{T_s}\right)[ai_q(k) + bi_q^*(k-1)] + \\ \frac{L}{T_s}i_q^*(k) + \omega_e L[ai_d(k) + bi_d^*(k-1)] + \omega_e \psi_t \end{cases} \quad (8)$$

式中: a 、 b 为权重因子,且 $a+b=1$;电压是 k 时刻电机的控制电压,将其代入到实际电流方程式(4)中,改进后的 $k+1$ 时刻实际电流方程为

$$\begin{cases} L_0 i_d(k+1) + [(R_0 T_s - L_0) - a(RT_s - L)]i_d(k) = bRT_s i_d^*(k-1) + Li_d^*(k) - \\ bLi_d^*(k-1) - T_s \omega_e L ai_q(k) - T_s \omega_e L bi_q^*(k-1) + \\ \omega_e L_0 T_s i_q(k) \\ L_0 i_q(k+1) + [(R_0 T_s - L_0) - a(RT_s - L)]i_q(k) = bRT_s i_q^*(k-1) - bLi_q^*(k-1) + \\ Li_q^*(k) + T_s \omega_e L[ai_d(k) + bi_d^*(k-1)] - \\ \omega_e L_0 T_s i_d(k) + \omega_e T_s (\psi_t - \psi_{t0}) \end{cases} \quad (9)$$

考虑到采样频率很高,采样周期足够小,在系统达到稳态时,可以近似认为 $i_{dq}^*(k-1) = i_{dq}(k)$,将磁链偏差导致的反电动势当作扰动项。对式(9)进行 Z 变换,得到电流实际值与电流参考值的闭环离散传递函数

$$\frac{i_{dq}(z)}{i_{dq}^*(z)} = \frac{Lz - bL}{L_0 z - L_0 + aL} \quad (10)$$

由式(10)可知,离散传递函数的一个闭环极点是 $z=1-L/L_0$,由控制理论可知闭环极点位于 z 平面的单位圆内,系统处于稳定状态,则系统的稳定区间为

$$0 < L < \frac{2L_0}{a} \quad (11)$$

由式(11)可知,系统是否稳定在于权重系数 a 的取值,当 $a < 1$ 时,系统的稳定裕度变大。因此,引入权重因子可降低无差拍电流预测控制算法的参数敏感性。

3 增量式电流静差消除算法

在传统的电压预测模型中,电阻、电感和磁链参数失配会导致稳态电流误差,为了避免部分参数对预测算法性能所带来的影响,本节提出基于增量式模型的无差拍电流预测算法(IDPCC)。增量式模型是非传统的电机预测模型,通过相邻两个时刻的电压与电流的差值来预测下一时刻的电流。

由于永磁同步电机的机械时间常数远大于电气时间常数,因此认为在相邻时刻,电机的角速度保持不变。将相邻时刻的电压方程相减得到增量式电压预测方程

$$\begin{cases} \Delta u_d(k) = \left(R - \frac{L}{T_s}\right)\Delta i_d(k) + \frac{L}{T_s}\Delta i_d^*(k) - \\ \omega_e L \Delta i_q(k) \\ \Delta u_q(k) = \left(R - \frac{L}{T_s}\right)\Delta i_q(k) + \frac{L}{T_s}\Delta i_q^*(k) + \\ \omega_e L \Delta i_d(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中:预测电压增量 $\Delta u_d(k) = u_d(k) - u_d(k-1)$;实际电流增量 $\Delta i_d(k) = i_d(k) - i_d(k-1)$;参考电流增量 $\Delta i_d^*(k) = i_d^*(k) - i_d^*(k-1)$ 。

由式(12)可得,该算法已消除了磁链参数的影响,仅包含电感和电阻两个参数,相比于 DPCC, IDPCC 具有更高的参数鲁棒性。

引入误差补偿量以减小预测误差,改进后的 IDPCC 中的预测电压增量为

$$\begin{cases} \Delta u_d^*(k) = \Delta u_d(k) + e_d^*(k) \\ \Delta u_q^*(k) = \Delta u_q(k) + e_q^*(k) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\Delta u_d^*(k)$ 为补偿后的电压增量; $e_d^*(k)$ 为实际电流与参考电流的差值,表达式为

$$\begin{bmatrix} e_d^*(k) \\ e_q^*(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_d & C_d' \\ C_q' & C_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d(k) \\ e_q(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 $e_{dq}(k) = i_{dq}^*(k) - i_{dq}(k)$ 。

误差矩阵的系数取值范围是 $[-1, 1]$ 。最终, IDPCC 的电压预测方程为

$$\begin{cases} u_d(k) = u_d(k-1) + \Delta u_d^*(k) \\ u_q(k) = u_q(k-1) + \Delta u_q^*(k) \end{cases} \quad (15)$$

4 数值仿真研究

4.1 鲁棒前馈电流预测控制仿真分析

为了对无差拍鲁棒前馈电流预测控制进行验证,本文进行了数值分析研究,电机参数如表 1 所示,采样频率为 10 kHz,在 0 s 时刻电机以 1 000 r/min 阶跃启动,在 0.3 s 时添加负载转矩 3 N·m,仿真时长为

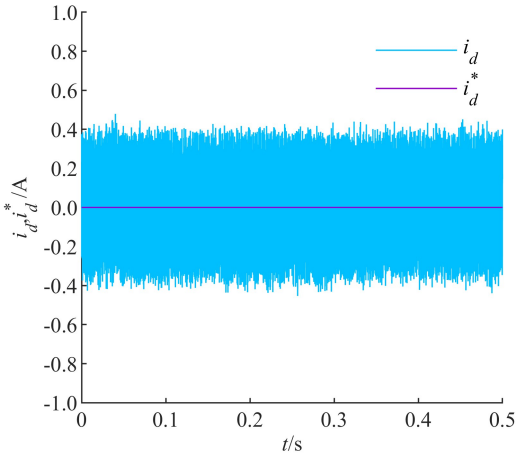
0.5 s,设置权重因子 $a=b=0.5$ 。通过改变算法电感参数模拟参数失配的情况,进行仿真验证。

表 1 永磁同步电机参数

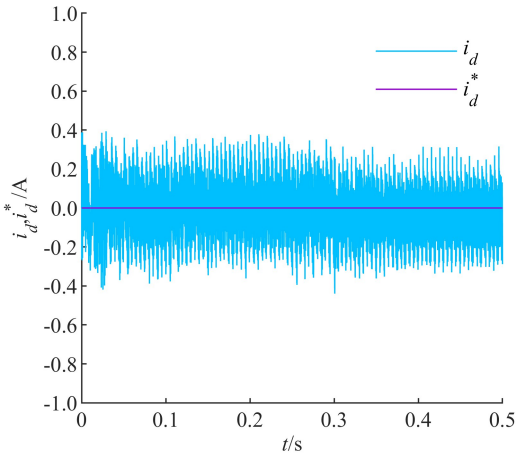
Table 1 Parameters of the SPMSM

参数	数值
直流母线电压 U_N/V	310
额定转速 $n_N/(r \cdot \min^{-1})$	2 000
额定转矩 $T_{eN}/(N \cdot m)$	5
定子电阻 R_s/Ω	3.18
电感 $L_q, L_d/mH$	8
永磁体磁链 ϕ_t/Wb	0.3
极对数 p	2
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.000 46

当模型电感与实际电感一致时,DPCC 与 RFD-PCC 的仿真结果如图 1 和图 2 所示。



(a)DPCC

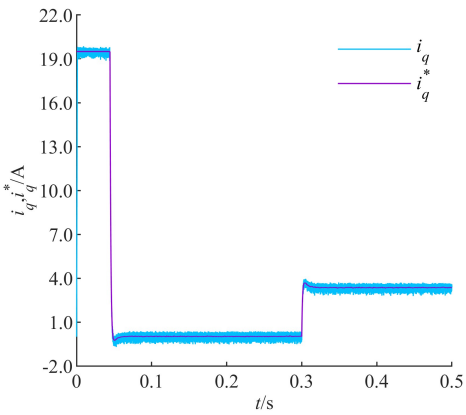


(b)RFD-PCC

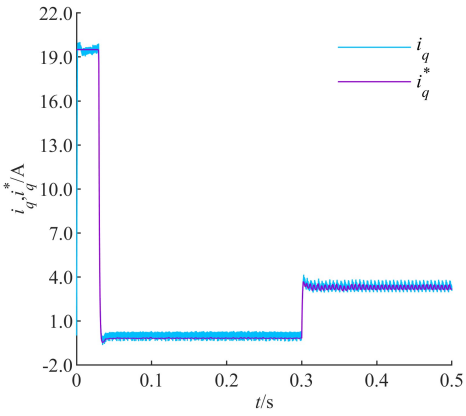
图 1 $L=L_0$ 时的电流 i_d 波形对比

Fig. 1 Current i_d waveform comparison diagram when $L=L_0$

从图 1 可以看出,当模型参数与真实参数一致时,电流 i_d 的波形没有太大区别,振动范围均在 $-0.4 \sim 0.4$ A 之内。



(a)DPCC



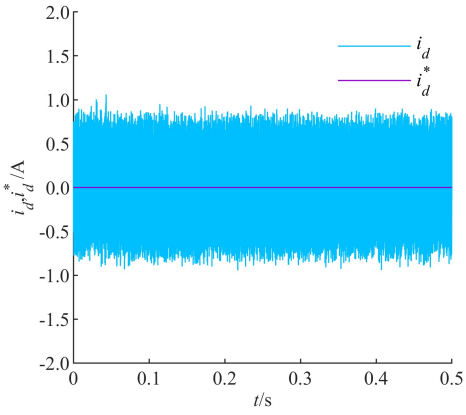
(b)RFD-PCC

图 2 $L=L_0$ 时的电流 i_q 波形对比

Fig. 2 Current i_q waveform comparison diagram when $L=L_0$

从图 2 可以看出,当模型参数与真实参数一致时,电流 i_q 的波形基本一致。对电流实际值与电流参考值的误差计算方差,得到 DPCC 的电流误差方差为 $0.008 7 A^2$,而 RFD-PCC 的为 $0.005 8 A^2$ 。在稳态时,RFD-PCC 的跟随参考电流的性能更好,性能相对提升了 33.33%。

当模型电感是实际电感的 2 倍时,DPCC 与 RFD-PCC 的仿真结果如图 3 和图 4 所示。



(a)DPCC

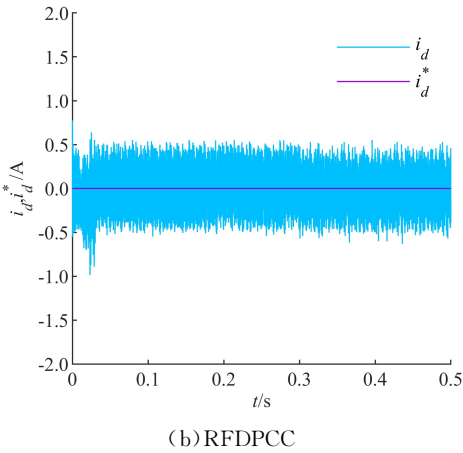
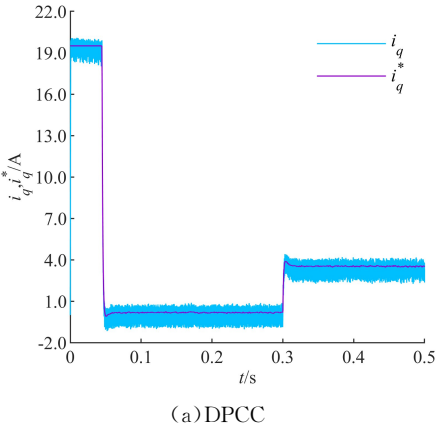


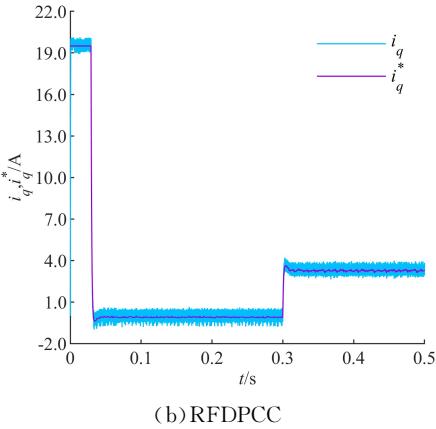
图 3 $L=2L_0$ 时的电流 i_d 波形对比

Fig. 3 Current i_d waveform comparison diagram when $L=2L_0$

从图 3 可以看出,当模型参数是真实参数的 2 倍时,DPCC 的电流 i_d 振动范围较大,振动范围均在 $-0.9\sim 1$ A 之内,而 RFDPPC 的电流 i_d 振动范围相对较小,在稳态时,振动范围保持在 $-0.4\sim 0.5$ A 之内。



(a)DPCC



(b)RFDPPC

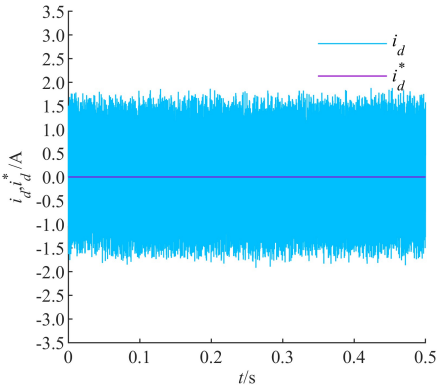
图 4 $L=2L_0$ 时的电流 i_q 波形对比

Fig. 4 Current i_q waveform comparison diagram when $L=2L_0$

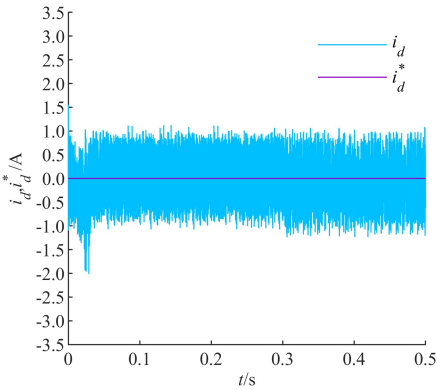
由 1.2 小节分析可知,当模型电感参数超过真实电感参数的 2 倍时,系统将不稳定。从图 4 可以看出,DPCC 中的电流 i_q 在稳态时候出现振荡,系统处

于不稳定状态。此时,DPCC 中电流误差的方差为 0.0561 A^2 ,而 RFDPPC 中的为 0.0216 A^2 。RFDPPC 中的电流 i_q 波动更小,跟随性能提升了 61.5%。

当模型电感是实际电感的 4 倍时,DPCC 与 RFDPPC 的仿真结果如图 5 和图 6 所示。



(a)DPCC

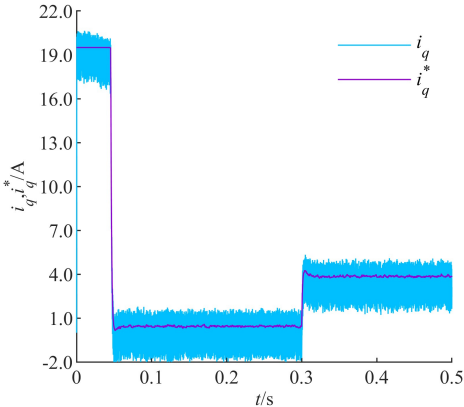


(b)RFDPPC

图 5 $L=4L_0$ 时的电流 i_d 波形对比

Fig. 5 Current i_d waveform comparison diagram when $L=4L_0$

从图 5 可以看出,当模型参数是真实参数的 4 倍时,DPCC 的电流 i_d 剧烈振荡,振动范围均在 $-1.7\sim 1.7$ A 之内而 RFDPPC 的电流 i_d 振动范围相对较小,在稳态时,振动范围保持在 $-1\sim 1$ A 之内。



(a)DPCC

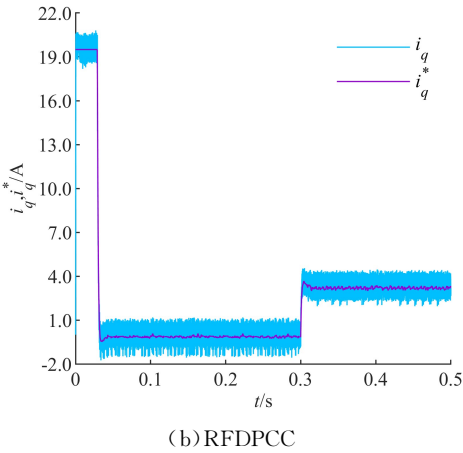


图 6 $L=4L_0$ 时的电流 i_q 波形对比

Fig. 6 Current i_q waveform comparison diagram when $L=4L_0$

从图 6 可以看出,DPCC 中的电流进一步剧烈振荡。此时,DPCC 中电流误差的方差为 $0.256\ 3\ \text{A}^2$,而 RFPDCC 的为 $0.083\ 8\ \text{A}^2$,跟随性能提升了 67.3% 。

4.2 增量式电流静差消除算法仿真分析

本小节的仿真参数设置和电机运行情况与 2.2 小节保持一致。

当模型磁链是实际磁链的 0.5 倍时,DPCC 与 IDPCC 的仿真结果如图 7 所示。

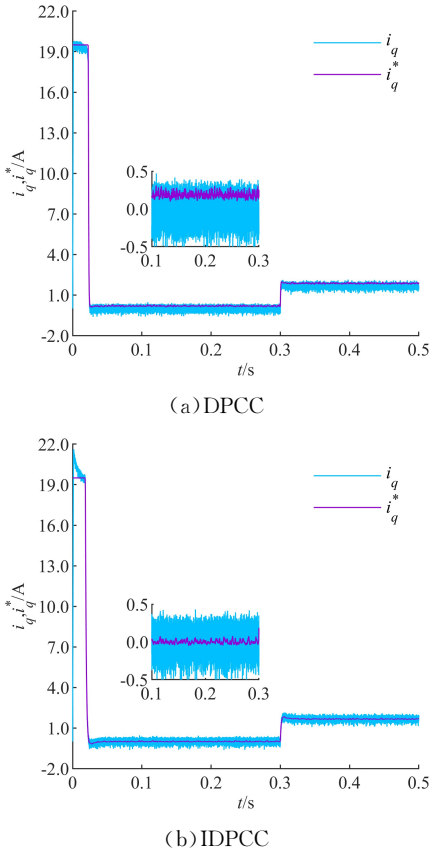


图 7 $\phi_t = 0.5\phi_0$ 时的电流 i_q 波形对比

Fig. 7 Current i_q waveform comparison diagram when $\phi_t = 0.5\phi_0$

从图 7 可以看出,当模型磁链小于真实磁链时,DPCC 的电流 i_q 小于参考电流,存在明显的稳态电流静差,此时的电流静差为 $0.242\ 2\ \text{A}$ 。IDPCC 的电流 i_q 实际值与给定值的重合度明显提高,此时的电流静差为 $0.148\ 5\ \text{A}$ 。

当模型磁链是实际磁链的 0.4 倍时,DPCC 与 IDPCC 的仿真结果如图 8 所示。

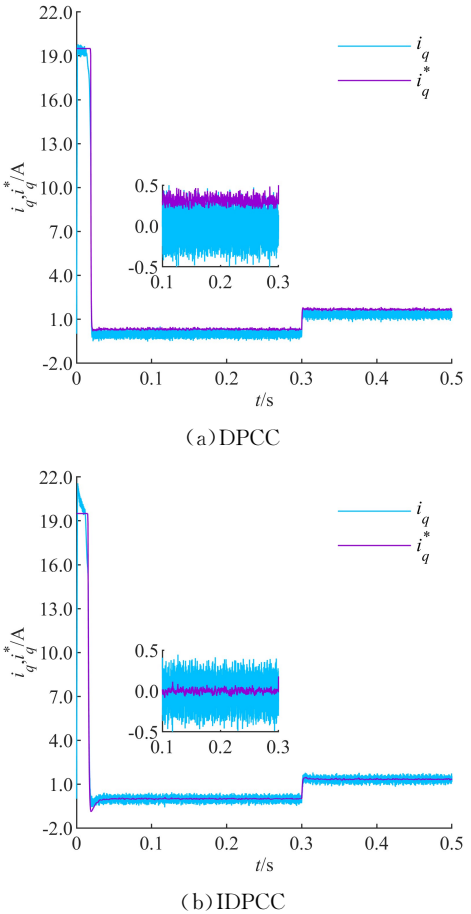


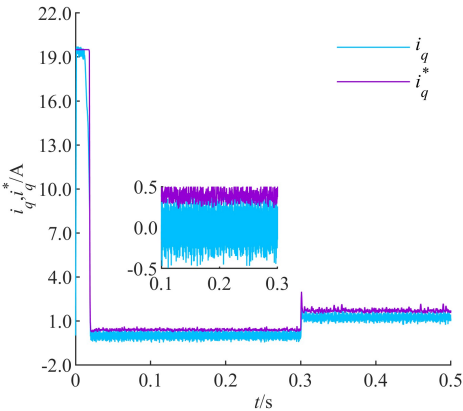
图 8 $\phi_t = 0.4\phi_0$ 时的电流 i_q 波形对比

Fig. 8 Current i_q waveform comparison diagram when $\phi_t = 0.4\phi_0$

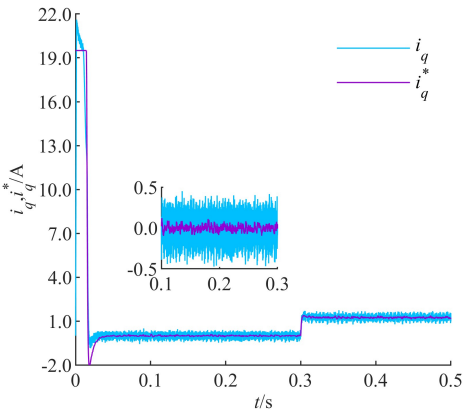
从图 8 可以看出,当模型磁链是真实磁链的 0.4 倍时,DPCC 的电流 i_q 小于参考电流,存在明显的稳态电流静差,实际电流与参考电流的差值比 0.5 倍时的更大,此时的电流静差为 $0.359\ 3\ \text{A}$ 。IDPCC 的电流 i_q 实际值与给定值的重合度明显提高,与 0.5 倍时的相差不大,此时的电流静差为 $0.154\ 7\ \text{A}$ 。

当模型磁链是实际磁链的 0.375 倍时,DPCC 与 IDPCC 的仿真结果如图 9 所示。可以看出,当模型磁链是真实磁链的 0.375 倍时,DPCC 的电流 i_q 明显小于参考电流,存在明显的稳态电流静差,实际电流与参考电流已经没有任何交集,说明算法的稳态性能

进一步恶化,此时的电流静差为 0.520 9 A。IDPCC 的电流 i_q 实际值与给定值的重合度明显提高,与 0.5 倍时的相差不大,此时的电流静差为 0.236 2 A,稳态性能较 DPCC 有了明显的提升。



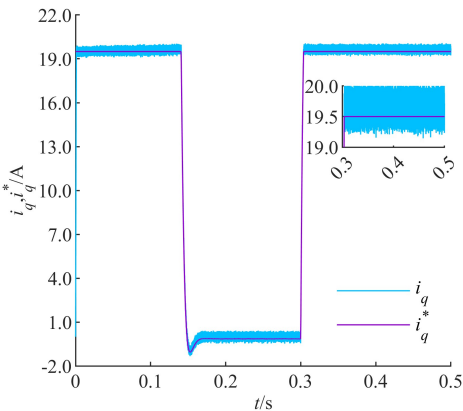
(a)DPCC



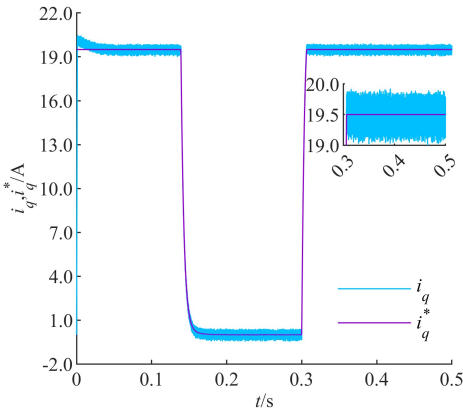
(b)IDPCC

图 9 $\psi_{\text{f}} = 0.375\psi_{\text{f}0}$ 时的电流 i_q 波形对比
Fig. 9 Current i_q waveform comparison diagram when $\psi_{\text{f}} = 0.375\psi_{\text{f}0}$

当模型电阻是真实电阻的 2 倍、电感是真实电感的 0.5 倍、磁链是真实磁链的 2 倍时,DPCC 与 IDPCC 的仿真结果如图 10 所示。



(a)DPCC



(b)IDPCC

图 10 $R = 2R_0$ 、 $L = 0.5L_0$ 、 $\psi_{\text{f}} = 2\psi_{\text{f}0}$ 时的电流 i_q 对比
Fig. 10 Current i_q waveform comparison diagram when $R = 2R_0$ 、 $L = 0.5L_0$ 、 $\psi_{\text{f}} = 2\psi_{\text{f}0}$

从图 10 可以看出,当模型电阻是真实电阻的 2 倍、电感是真实电感的 0.5 倍、磁链是真实磁链的 2 倍时,DPCC 的电流 i_q 大于参考电流,存在稳态电流静差,此时的电流静差为 0.224 3 A。IDPCC 的电流 i_q 实际值与给定值的重合度提高,此时的电流静差为 0.161 0 A,稳态性能较 DPCC 有了明显的提升。

表 2 是 DPCC 与 IDPCC 在参数失配时稳态电流静差的对比。

表 2 两种算法在参数失配情况下的 q 轴电流静差对比

参数失配情况	电流静差/A		电流静差减小比例/%
	DPCC	IDPCC	
$\psi_{\text{f}} = 0.5\psi_{\text{f}0}$	0.242 2	0.148 5	38.69
$\psi_{\text{f}} = 0.4\psi_{\text{f}0}$	0.359 3	0.154 7	56.94
$\psi_{\text{f}} = 0.375\psi_{\text{f}0}$	0.520 9	0.236 2	54.66
$R = 0.5R_0$ 、 $\psi_{\text{f}} = 0.5\psi_{\text{f}0}$	0.260 7	0.146 6	43.77
$R = 0.4R_0$ 、 $\psi_{\text{f}} = 0.4\psi_{\text{f}0}$	0.506 5	0.359 0	29.12
$R = 2R_0$ 、 $L = 0.5L_0$ 、 $\psi_{\text{f}} = 0.375\psi_{\text{f}0}$	0.224 3	0.161 0	28.22

5 结 论

本文针对无差拍电流预测控制算法在电机模型参数不匹配情况下产生的系统稳定性下降和稳态时电流存在误差的问题进行了研究。结果发现,当电压预测模型的电感参数大于真实电感参数的 2 倍

时,系统将变得发散。对传统算法中电压预测的公式进行了改进,提出了无差拍鲁棒前馈电流预测控制。当磁链参数失配时,稳态电流静差会扩大,因此本文提出了增量式电流静差消除算法,消除了磁链参数对稳态电流静差的影响。

仿真结果表明,在电感参数失配的情况下,RFDPPC的稳定裕度更高。当模型电感为真实电感的2倍和4倍时, q 轴电流的跟随性能分别提升了61.5%和67.3%。当磁链参数不匹配的时候,增量式电流静差消除算法可以有效消除电流静差。当模型磁链为真实磁链的0.5、0.4倍和0.375倍时,稳态电流静差分别减小了38.69%、56.94%和54.66%。

参考文献:

- [1] VAZQUEZ S, RODRIGUEZ J, RIVERA M, et al. Model predictive control for power converters and drives: advances and trends [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 935-947.
- [2] XU Bo, ZHANG Lei, JI Wei. Improved non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2753-2762.
- [3] KARAMANAKOS P, GEYER T. Guidelines for the design of finite control set model predictive controllers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7434-7450.
- [4] BRIZ F, DEGNER M W, LORENZ R D. Analysis and design of current regulators using complex vectors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 817-825.
- [5] ROWAN T M, KERKMAN R J. A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, IA-22(4): 678-690.
- [6] SUUL J A, LJOKELSOY K, MIDTSUND T, et al. Synchronous reference frame hysteresis current control for grid converter applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(5): 2183-2194.
- [7] KAZMIERKOWSKI M P, MALESANI L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 691-703.
- [8] ZHANG Xiaoguang, ZHANG Liang, ZHANG Yongchang. Model predictive current control for PMSM drives with parameter robustness improvement [J]. IEEE Trans-

actions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1645-1657.

- [9] BOLOGNANI S, BOLOGNANI S, PERETTI L, et al. Design and implementation of model predictive control for electrical motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1925-1936.
- [10] LIU Jinglin, GONG Chao, HAN Zexiu, et al. IPMSM model predictive control in flux-weakening operation using an improved algorithm [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9378-9387.
- [11] 常雪剑, 彭博, 刘凌, 等. 新型非奇异终端滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 85-91, 99.
CHANG Xuejian, PENG Bo, LIU Ling, et al. A novel nonsingular terminal sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 85-91, 99.
- [12] 刘凌, 司杰文, 林起联. 支持向量机预测可变参数的永磁同步电机快速终端滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(6): 53-60.
LIU Ling, SI Jiewen, LIN Qilian. A fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor with variable parameters predicted by SVM [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 53-60.
- [13] LIU Ling, SONG Han, LIANG Deliang. High performance sensorless control of PMSM with sliding mode load torque observer [C]//2020 4th International Conference on HVDC. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1060-1065.
- [14] 常雪剑, 刘凌, 崔荣鑫. 永磁同步电机非奇异快速终端可变边界层滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 53-59.
CHANG Xuejian, LIU Ling, CUI Rongxin. A nonsingular fast terminal sliding mode controller with varying boundary layers for permanent magnet synchronous motors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 53-59.
- [15] 王悍泉, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 104-109.
WANG Hanxiao, LIU Ling, WU Huawei. A sensorless permanent magnet synchronous motor control strategy for improved sliding mode observers with stator parameters identification [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 104-109.

- [16] LIN Qilian, LIU Ling, LIANG Deliang. Hybrid active flux observer to suppress position estimation error for sensorless IPMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(1): 872-886.
- [17] 殷凯轩, 高琳, 付文华, 等. 永磁同步电机的改进模型预测自抗扰前馈控制 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(4): 29-38.
- YIN Kaixuan, GAO Lin, FU Wenhua, et al. An improved prediction control model for PMSM with active disturbance rejection and feed-forward control strategy [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(4): 29-38.
- [18] ZHANG Xiaoguang, HOU Benshuai, MEI Yang. Deadbeat predictive current control of permanent-magnet synchronous motors with stator current and disturbance observer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(5): 3818-3834.
- [19] XU Yongxiang, LI Shaobin, ZOU Jibin. Integral sliding mode control based deadbeat predictive current control for PMSM drives with disturbance rejection [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(3): 2845-2856.
- [20] WANG Zhiqiang, YU Anbo, LI Xinmin, et al. A novel current predictive control based on fuzzy algorithm for PMSM [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, 7(2): 990-1001.
- [21] XU Cheng, HAN Zaikun, LU Shuai. Deadbeat predictive current control for permanent magnet synchronous machines with closed-form error compensation [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(5): 5018-5030.
- [22] 刘建强, 郝文瑾, 陈爱峰, 等. 永磁同步电机无差拍预测电流控制策略研究 [J]. *铁道学报*, 2021, 43(8): 62-72.
- LIU Jianqiang, HAO Wenjin, CHEN Aifeng, et al. Research on deadbeat predictive current control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(8): 62-72.
- [23] PENG Yang, XI Xiao. An incremental predictive current control for PMSM with small or saturated inductance [C]//2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-6.

(编辑 陶晴 刘杨)