

永磁同步电机 FOC 控制下相电流直流分量影响与抑制策略研究

王向恩 黄平林

(江苏大学机械工程学院 镇江 212000)

摘 要: 永磁同步电机在矢量控制时需要对电机相电流进行采样,采样过程中参考电平波动等诸多因素都会造成相电流中包含直流分量,此外直流电压注入法等永磁同步电机参数在线估计方法,也会在相电流中引入直流分量。本文详细分析了不同情况下直流分量的产生机理,研究了直流分量对控制效果、转矩脉动、效率等性能的影响。提出一种可滤除三相交流信号中直流分量的数据处理方法,该方法对不同因素引入的直流分量均能起到良好的抑制作用,从而增加控制稳定性,降低转矩波动,仿真和应用实践验证了算法有效性。

关键词: 永磁同步电机;FOC 矢量控制;直流分量;数据处理

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on the influence and suppression strategy of phase current DC component under permanent magnet synchronous motor FOC control

Wang Xiang'en Huang Pinglin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motors require sampling of the motor phase current during vector control. During the sampling process, many factors such as reference level fluctuations can cause the phase current to contain DC components. In addition, online parameter estimation methods such as DC voltage injection also introduce DC components into the phase current. This article provides a detailed analysis of the generation mechanism of DC components in different situations, and investigates the impact of DC components on control effectiveness, torque ripple, efficiency, and other performance. Propose a data processing method that can filter out the DC component in three-phase AC signals. This method can effectively suppress the DC component introduced by different factors, thereby increasing control stability and improving the efficiency of the motor system. Simulation and application practice have verified the effectiveness of the algorithm.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; FOC vector control; DC component; data processing

0 引 言

永磁同步电机因其具有高可靠性、高功率密度、高效率被广泛应用于电动汽车、电动飞机等领域。磁场定向控制技术聚焦于定子磁链控制,将采样所得的三相相差 120 度的正弦电流信号,利用数学工具转化为可以用于 PID 控制的直流信号来实现对电机速度与转矩的控制^[1-4]。使用 FOC 矢量控制技术实现电机控制对采样所得的三相电流信号对称度要求较高,当三相电流信号与理想三相电流波形相差较大时将会造成转矩及转速的波动。三相电流

信号波形不对称主要表现为 4 个方面,1)采样所得三相电流波形任意两相之间相位相差并非为 120°,2)三相电流两相间波动幅值相差较大,3)三相电流波动中心并非严格在零上下波动,而是含有直流分量出现偏置,4)由于 SVPWM 控制等原因引入的高次谐波叠加造成三相电流波形正弦度较差^[1,5]。

文献[6]推导了 $\alpha\beta$ 轴电压与三相电流中直流分量关系,得出 $\alpha\beta$ 轴中的交流信号为有效成分,其中的偏置为误差成分,其误差与三相电流中的直流分量大小呈比例关系。将反馈回路中的 $\alpha\beta$ 轴电压信号通过低通滤波的方式提取

误差成分,在乘以比例系数后对 $\alpha\beta$ 轴中电流进行电流补偿,实现了对三相电流中直流分量去除。

文献[7]为实现在线电机参数辨识,在控制主回路的注入信号并对注入信号的时间、幅值、频率等要素进行讨论得出用于参数辨识的最佳注入信号参数。文献根据直流分量大小相比三相电流信号幅值相差较大的特点,提出使用陷波器和低通滤波器组成的数据处理模型进行直流分量的实时提取。

以上两篇文献分别对反馈回路与控制主回路的直流注入分量滤除方法进行分析,分别采用了低通滤波器、陷波器加低通滤波器的组合数据处理模型对直流分量进行去除。然而,交流信号通过低通滤波器后由于其衰减后的幅值与直流分量相近造成无法对直流分量进行完整滤除。本文首先分析了三相电流中直流分量引入机理,分别对反馈回路与控制主回路直流分量引入过程进行介绍。对不同情况下引入的直流分量在控制效果、转矩输出及控制效率方面的影响进行分析。最后提出一种易于通过软件编程实现的直流分量提取算法,并对算法执行逻辑进行介绍。通过台架实验及仿真验证了该算法对各种方式引入的直流分量均具有良好的抑制作用,输出转矩波动得到明显降低,增加了控制的稳定性。

1 直流分量的引入机理

1.1 电流采样

图 1 所示传统永磁同步电机相电流采样电路主要由电流传感器、信号调理电路、输入钳位电路及 ADC 转换器组成。电流传感器主要有基于电阻分压原理的精密电阻采样或基于霍尔效应的霍尔电流传感器实现电流采样。信号调理电路实现对传感器采集信号的调理,实现相电流信号在 ADC 采样范围内的映射^[8-11]。钳位电路用于保护后级 ADC 采样元件的安全,防止由于过流或过压造成元件损坏,例如使用电压跟随器或瞬变电压抑制二极管(TVS)来抑制电压或电流的突变。ADC 采样元件基于外部参考电压 Ref+ 及 Ref- 利用逐次逼近法进行 ADC 采样,外部正负参考电压 Ref+、Ref- 发生波动、ADC 在初次使用时未进行校准、信号调理电路参数波动等因素均会造成所采样三相电流中包含直流分量^[5-7]。

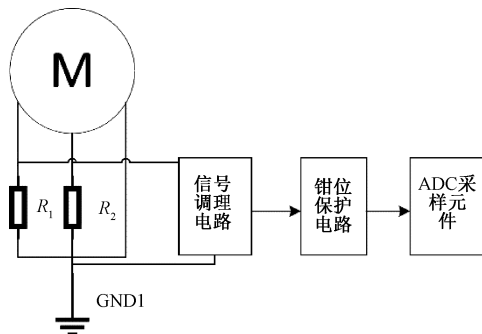


图 1 PMSM 三相电流采样电路拓扑

1.2 直流电压注入

在对电机参数进行在线辨识时,需要往控制主回路施加信号,通过对输出端三相电流响应结果分析获取当前电机参数。一种常见的方式是在 $\alpha\beta$ 轴注入一定频率的脉冲信号,通过系统对注入信号的响应得到电机当前参数^[12-13]。例如文献[7]通过向 $\alpha\beta$ 轴注入脉冲信号的方式对当前电机绕组线圈电阻进行测算,进而获取当前电机定子绕组的温度信息。文献[13]通过向 $\alpha\beta$ 轴注入频率远大于电机基波的高频信号对内置式永磁同步电机 dq 轴电感进行测算。如图 2 所示,控制主回路注入信号与反 park 变换结果一同作用于 SVPWM 模块。

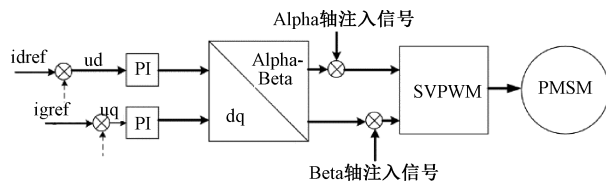


图 2 外部信号注入

1.3 直流分量引入机理分析

以上两种情况均会引起三相电流中含有直流分量,不同的是前者由于采样环节出现硬件误差造成反馈回路中含有直流分量,使得原本对称三相电流信号传递到反馈回路时不再对称^[14-15]。后者是人为注入直流信号到永磁同步电机中,此时当硬件无误差时仍能检测到直流分量。以上两种情况造成反馈通道含有的直流分量均可在进行系统控制之前给予滤除,保证对三相电流信号进行 Clark 变换时的对称度,减少系统震动与噪声。

2 直流分量对电机性能的影响

2.1 对控制性能的影响

当原始三相电流为对称信号,而采样环节出现误差时分别对 A、B 两相采样出现误差进行讨论。永磁同步电机三相电流方程:

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin\theta \\ i_B = I_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C = I_m \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (1)$$

当 A 相电流中含有直流分量 ΔI 时,ADC 所采样到的相电流为。

$$i_A^* = I_m \sin\theta + \Delta I \quad (2)$$

$\alpha\beta$ 轴电流方程由 Clark 变换可得:

$$\begin{cases} i_\alpha^* = i_a + \Delta I \\ i_\beta^* = i_\beta + \frac{\sqrt{3}}{3} \Delta I \end{cases} \quad (3)$$

其中, i_α 、 i_β 为未包含直流分量时三相电流在 $\alpha\beta$ 轴的投影。

dq 轴电流方程由 Park 变换后可得:

$$\begin{cases} i_d^* = i_d + \frac{2\sqrt{3}}{3}\Delta I \sin(\theta_e + \frac{\pi}{3}) \\ i_q^* = i_q + \frac{2\sqrt{3}}{3}\Delta I \cos(\theta_e + \frac{\pi}{3}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, i_d^* 、 i_q^* 为包含直流分量时三相电流在 dq 轴的投影, i_d 、 i_q 为未包含直流分量时三相电流在 dq 轴的投影, θ_e 为电角度。

dq 轴电流电压关系方程:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (5)$$

其中, ψ_d 、 ψ_q 分别为 dq 轴磁通:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (6)$$

将式(4)、(6)代入 dq 轴电流电压关系方程式(5)并化简可得,当三相单流中含有直流分量时 dq 轴电压将会变为:

$$\begin{cases} u_d^* = u_d + R\Delta I_m \sin(\theta_e + \frac{\pi}{3}) + \Delta U_m \cos(\theta_e + \frac{\pi}{3}) \\ u_q^* = u_q + R\Delta I_m \cos(\theta_e + \frac{\pi}{3}) + \Delta U_m \sin(\theta_e + \frac{\pi}{3}) \end{cases} \quad (7)$$

采用同样方法可推出当直流分量作用于 B 相时:

$$\begin{cases} u_d^* = u_d + R\Delta I_m \sin(\theta_e) + \Delta U_m \cos(\theta_e) \\ u_q^* = u_q + R\Delta I_m \cos(\theta_e) + \Delta U_m \sin(\theta_e) \end{cases} \quad (8)$$

由于常用三相电流多为对 A、B 两相,程序执行过程中不对 C 相采样结果进行使用因此此处不对 C 相电流所受干扰进行讨论。对比式(7)、(8)可发现, A、B 两相采样误差对 dq 轴电压产生的误差幅值相同,相位相差 60° 电角度。式(7)、(8)中 ΔI_m 、 ΔU_m 为:

$$\begin{cases} \Delta I_m = \frac{2\sqrt{3}}{3}\Delta I \\ \Delta U_m = \Delta I_m \omega_e (L_d - L_q) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,对于表贴式永磁同步电机 $L_q = L_d$ 时 $\Delta U_m = 0$, dq 轴所检测到的电流波动值 ΔI_m 将会带来 dq 轴电压需要补偿的 $R\Delta I_m$ 。对于内置式永磁同步电机 $L_q \neq L_d$ 时,三相电流中直流分量的存在另外还将给控制系统引入幅值为 ΔU_m , 频率为电角速度的谐波,且谐波的幅值将随电角速度的增大而线性增大。

2.2 对电机转矩的影响

当三相电流信号由于控制回路信号注入造成不对称时,此时假定三相电流为:

$$\begin{cases} i_A^* = i_A + \Delta I \\ i_B^* = i_B - \frac{1}{2}\Delta I \\ i_C^* = i_C - \frac{1}{2}\Delta I \end{cases} \quad (10)$$

其中, i_A^* 、 i_A 分别为含有直流分量与不含直流分量的 A 相电流。永磁同步电机电磁转矩公式为^[12]。

$$T_e = \frac{3}{2}p_0[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (11)$$

其中, p_0 为电机极对数, ψ_f 为转子磁链。根据 2.1 推出 i_d^* 、 i_q^* 代入式(11)可得:

$$\begin{cases} T_e^* = T_e + \frac{3}{2}p_0[(L_d - L_q)\xi - \psi_f \Delta I \sin(\theta_e)] \\ \xi = i_q \Delta I \cos(\theta_e) - i_d \Delta I \sin(\theta_e) - \frac{1}{2}\Delta I^2 \sin(2\theta_e) \end{cases} \quad (12)$$

其中, T_e^* 、 T_e 分别为带有直流分量及对称三相电流下电磁转矩,由式(12)可得对于表贴式永磁同步电机 $L_q = L_d$ 时,转矩脉动与 ΔI 成正比。对于内置式永磁同步电机此外还将引入由 ξ 造成的转矩波动,且波动谐波中含有二倍频谐波。

2.3 对电机效率的影响

以 A 相带有的直流分量为例,根据铜耗公式:

$$P_{loss} = I^2 R_s \quad (13)$$

代入式(10)到式(13)中可得:

$$P_{loss}^* = P_{loss} + \frac{3}{2}\Delta I^2 R_s \quad (14)$$

其中, P_{loss}^* 为含有直流分量时的铜耗, P_{loss} 为不含有直流分量时的铜耗, R_s 为相电阻。式(14)表明,直流分量产生的额外铜耗与偏差的平方成正比,偏差越大铜耗越大。

3 直流分量的抑制方法

3.1 传统直流分量抑制方法的不足

在电机控制过程中通常使用低通滤波器(low pass filter, LPF)对采样电流数据进行滤波,利用低通滤波器通低频、阻高频的特点获取直流分量数据。从控制理论的角度,一阶低通滤波器实际上是一个惯性环节。截止频率是低通滤波器的重要参数,大于该值的高频信号幅值将随频率增大而衰减。然而当电机转速较低时相电流频率与直流分量波动频率相近,使用此种方法所获取得到的直流分量数据中将不可避免含有相电流数据,从而无法对直流分量进行抑制。本文利用永磁同步电机三相交流信号采集数据在直流分量上下数量均等的特点,通过对单个周期或多个周期内数据排序取中值来确定直流分量,使用该方法可有效避免低通滤波处理后含有交流信号的问题。

3.2 排序法直流分量去除原理

从交流信号中提取直流分量的数据处理算法基于三相电流信号在电机运行过程中数据以直流偏置量为中心上下规律波动的特点实现。图 3 为 A 相电流采样结果,根据三角函数式(15)易得,当直流分量为零时单个整周期内正半轴与负半轴采样数据点数量相同。同理,当存在直流分量时直流分量轴上下采样数据点数量也将相同,即正弦交流

信号中的直流分量大小为整周期内采样数据点排序后的中值。

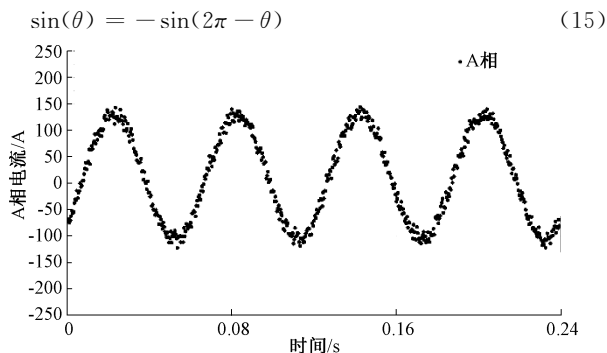


图 3 A 相电流采样结果

使用该方法获取直流分量的难点在于,当在缓存数组中保存的相电流数据所对应的时间与整周期时间差别较大时,所计算直流分量大小将无法反映相电流中所包含的直流分量大小。例如当采样窗口数据仅为连续的不到半个周期中的数据时,其中值将偏离直流分量。为保证每个采样窗口能够包含整周期的数据,用于获取当前相电流数据的缓存数组中数据存储频率 f_s 与当前电角速度 ω_e 关系为:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} n L \omega_e \quad (16)$$

其中, n 为缓存数组中包含的相电流数据对应的电周期数, L 为数组的长度,两者均为正整数。

3.3 程序执行流程

相电流处理算法基于 Ti 公司的 DSP 芯片 TMS320F28377S 运行,为了更好的利用 DSP 芯片资源实现多个任务的稳定运行,程序基于嵌入式前后台系统搭建。外部中断触发后 CPU 任务加载对应中断程序并在前台执行,当无中断触发时则执行后台程序进行 PID 参数更新及相电流补偿系数更新等任务。

采样程序执行流程如图 4 所示,相电流数据在 ADC 采样中断触发时进行数据采集,数据采集速度较排序算法执行速度要快,数据采集过程在中断中执行,如果此时进行排序操作将会造成中断过于臃肿。为解决上述问题分别设置了大小及数据类型均相同的缓存数组与排序数组。缓存数组用于暂时存储当前采集的相电流数据,通过对数组指针进行自增操作的方式逐次对数组中元素进行数据更新。

直接存储访问(direct memory access,DMA)可将存储在一片连续空间的数据从一个地址复制到另一个地址,CPU 仅进行下达移动指令到 DMA 控制器而移动动作本身由 DMA 外设进行,因此可以提高 CPU 运行效率^[16]。待整周期相电流数据将缓存数组填满之后,利用 DSP 芯片所自带的 DMA 外设,在无需 CPU 的干预下即可完成移动数据到排序数组的操作。

在由缓存数组到排序数组中进行转移的过程中,为避免在数据转移时排序数组中数据正在被使用产生数据访问

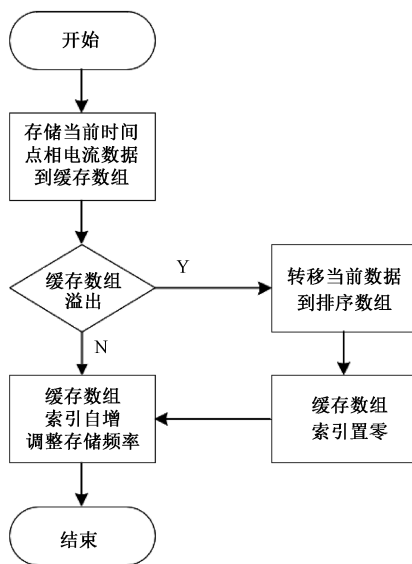


图 4 采样程序执行流程

冲突等问题。算法在设计过程中借鉴了操作系统中互斥量机制,通过设置标志位的方式防止多个任务抢占同一片内存使用权造成程序冲突的问题,同时也避免了 CPU 对已排序完成数据进行重复处理。在标志位为 0 时表示有新数据传入等待进行处理,当标志位为 1 时表示数据处理工作正在进行中,当标志位为 2 时表示数据处理工作已完成,可进行新数据的写入。后台程序执行流程如下图 5 所示,当有新数据传入时标志位被置为 0,程序进行排序操作,否则不执行任何操作,在排序工作完成后则将标志位置为 2 表示本轮数据处理已完成可以进行新数据的写入。

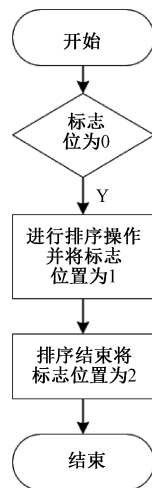


图 5 后台执行程序

算法使用的排序策略基于冒泡法进行,通过依次将数组中数据与其相邻数比较来进行排序。排序完成后取中值作为直流偏置量,在后续用于进行 Clark 变换的相电流数据的基础上减去直流偏置量大小即为不含直流偏置的交流信号。

当有多个中断同时提出 CPU 执行请求时则根据中断优先级高低进行执行。如图 6 所示,对多个中断任务根据优先级进行排序。

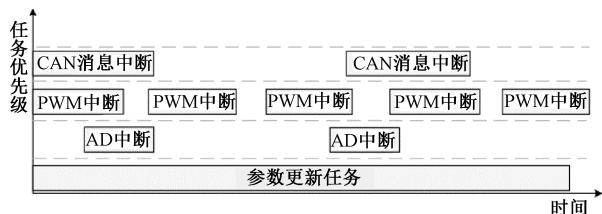


图 6 不同任务优先级分布

在 FOC 控制程序中,中断优先级最高的为 CAN 中断请求,当有外部指令到达时优先处理外部指令以保证外部指令的实时响应。PWM 用于进行 PID 调节及控制六路 PWM 输出占空比变化,中断频率为 20 kHz。为保证中断的快速退出,防止中断程序长时间占用 CPU 资源影响低优先级程序执行,中断执行时间应当尽可能小。AD 中断用于采集存储当前三相电流数据,并计算当前 dq 轴电流大小,为 PID 调节提供参考。后台主程序负责对相电流补偿系数进行计算,消除由于硬件精度不足造成的数据误差。

三相电流直流分量计算流程由两部分构成,分别为带有直流分量干扰信号的相电流采样部分以及对采样数据进行排序的数据处理部分。后台程序在对整周期相电流数据进行从大到小排序后,取中间部分数据并计算均值即为交流相电流信号中包含的直流分量大小。

4 仿真分析

4.1 传统低通滤波器法与排序法效果对比

搭建下图 7 所示仿真模型,分别使用低通滤波器及排序法对含有直流分量的交流正弦信号进行滤波。仿真中低

通滤波器截止频率分别设置为 5 Hz 及 2 Hz,输入交流正弦信号为模拟转速 100 rpm 下 10 对极永磁同步电机交流相电流信号。图 8 为仿真结果,由仿真结果可知通过降低低通滤波器截止频率可使滤波结果幅值降低,更接近于真实情况,但仍存在波动。而采用排序法则可获得稳定的直流分量结果。



图 7 两种算法对比模型

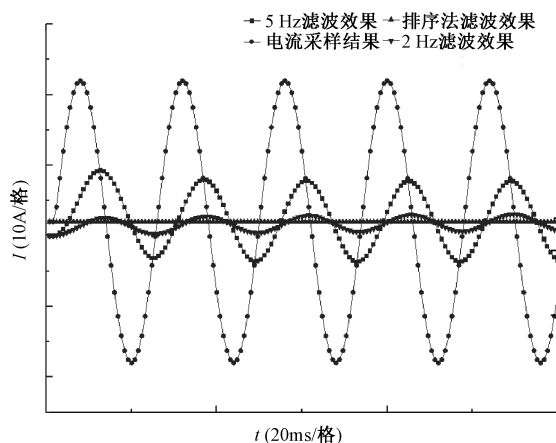


图 8 两种算法仿真结果

4.2 排序法直流分量抑制效果仿真

为验证直流分量去除对相电流非对称性抑制效果,基于 Simulink 搭建模型如图 9~11 所示。

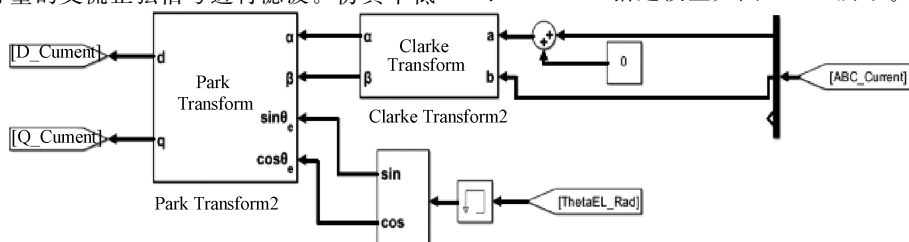


图 9 相电流解析部分

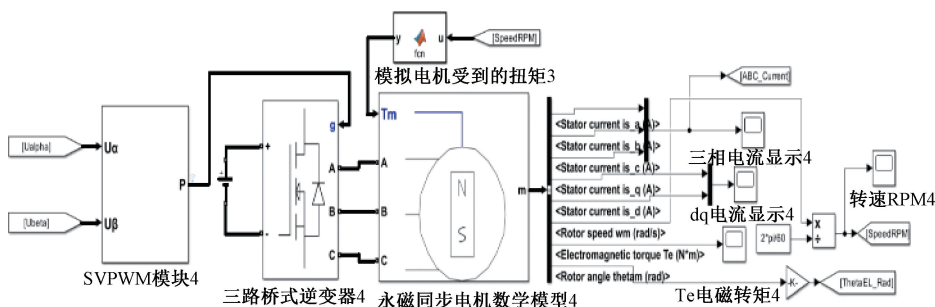


图 10 电机驱动部分

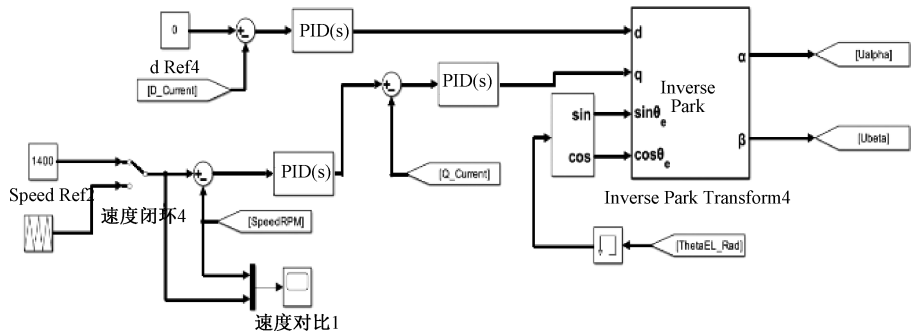


图 11 PID 调节部分

模型中电机母线电压为 600 V,转速为 2 000 rpm。检测相电流进行偏置 10 A 前后由电机输出端三相电流变化情况。图 12 和 13 中分别展示了进行去除相电流直流分量前后相电流情况,仿真结果表示在进行直流分量去除后相电流对称性及稳定性得到增加,减少了相电流波动。图 14 和 15 分别显示 dq 轴电流在去除直流分量前后变化,结果显示 dq 电流在进行直流分量去除后可以有效消除低频谐波。

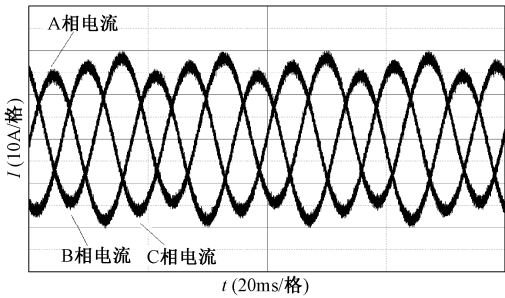


图 12 去除直流分量前三相电流

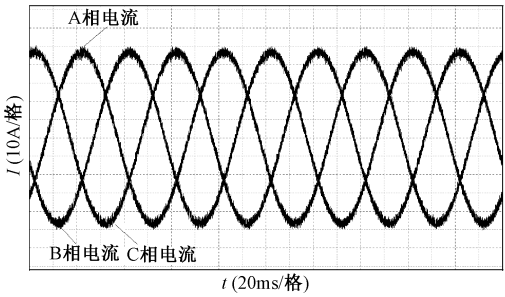


图 13 去除相电流直流分量后三相电流

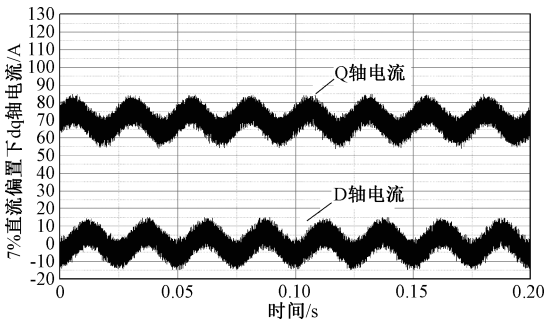


图 14 去除直流分量前 dq 轴电流变化

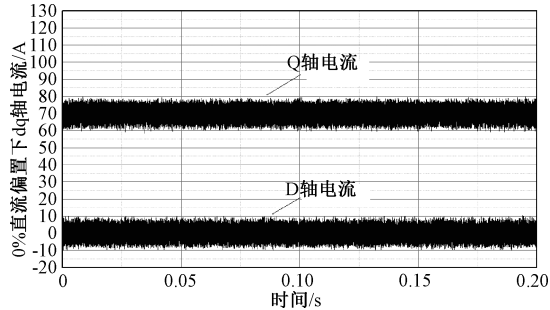


图 15 去除直流分量后 dq 轴电流变化

5 实验验证

为验证算法正确性,进行台架测试。实验针对电动飞机涵道风扇中所使用电机进行控制,主要实验设备如图 16、17 所示。



(a) 实验台架



(b) 电流钳

图 16 实验台架及电流钳



(a) 驱动控制器



(b) 供电电源

图 17 驱动控制器和供电电源

电机工作母线电压为 600 V,由带有短路保护功能的直流电压源进行供电。实验电机采用 EMRAX 公司 EMRAX228 电机,相间电感 $225.5\ \mu\text{H}$,单相电阻为 $15.48\ \text{m}\Omega$ 。控制程序基于 Ti 公司 DSP 芯片 TMS320F28377S 芯片进行控制运行,功率模块基于罗姆公司 SIC 模块 BSM400D12P3G002 进行电机驱动工作。电机运行时通过 CAN 通信将电机状态数据发送到图 18 中的上位机软件从而实现对电机状态进行观测。为了验证算法有效性,对电机在相同参数下分别进行去除直流分量与不去除的测试,图 19 展示在相同转速下去除直流分量后,相电流有效值(RMS)更小。下图 20 及 21 中展示了去除直流分量前后在台架上测得输出转矩变化情况,通过对比可以看出,直流分量去除后转矩输出更为稳定。

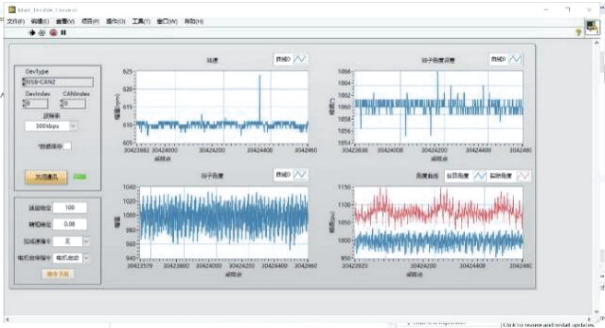


图 18 上位机软件

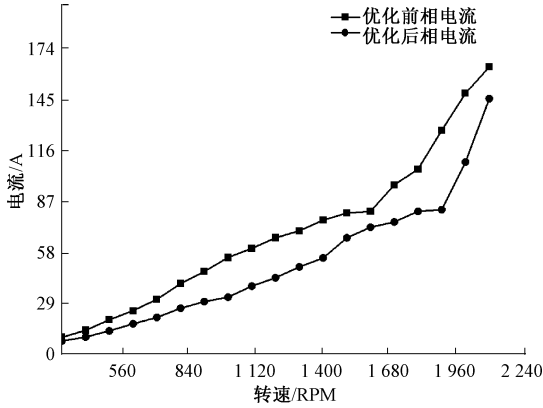


图 19 原始相电流与优化后相电流有效值对比

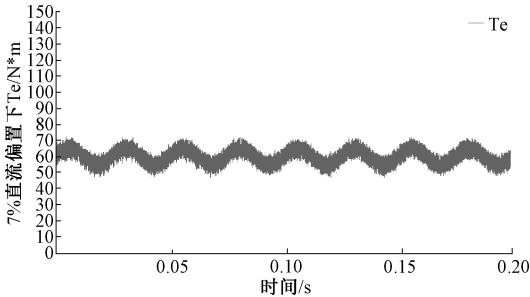


图 20 去除直流分量前台架电机输出转矩

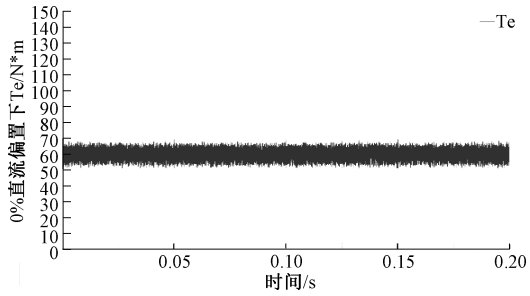


图 21 去除直流分量后台架电机输出转矩

6 结 论

本文针对永磁同步电机相电流采样过程中,受外部干扰造成采样信号包含直流分量问题,提出使用排序算法对直流分量进行去除。对直流分量所产生的控制效果、转矩及输出功率的变化,分别对表贴式及内置式两种永磁同步电机所控制产生的影响通过公式推导进行讨论,并得出以下结论:

对于表贴式电机将引入由于三相交流信号中心偏置造成的 $R\Delta I_m$,而对于内置式电机除此之外还会带来幅值随电角速度线性增大的谐波。

A、B 两相中交流信号产生偏置在 dq 轴电压所引发的谐波信号相位相差 60° 度而幅值相同。

直流分量的存在将给电机转矩输出带来波动,同时对于内置式永磁同步电机还将引入二倍频谐波。

电机铜耗与直流分量的平方成正比,当三相电流不对称时将引入额外的铜耗降低系统效率。

在进行数据采集时需保持式(16)中关系才能保证直流分量补偿系数准确计算,从而提高三相电流对称性进而有效降低转矩波动和提高效率。

参考文献

- [1] 王成元,夏加宽,孙宜标.现代电机控制技术[M].2版.北京:机械工业出版社,2014.
- [2] 杜思航.基于FOC算法的永磁同步电机控制器设计[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [3] 曹雷.永磁同步电机无速度传感器矢量控制系统设计[D].长沙:湖南大学,2021.
- [4] 刘伟.永磁同步电机FOC算法研究及控制器设计[D].石家庄:河北科技大学,2021.
- [5] 康乐,夏加宽,苏航,等.表贴式永磁电机各次电流引起径向振动的机理分析及综合抑制策略[J].电工技术学报,2022,37(18):4638-4650.
- [6] 王虎,应忠德,陈明亮.基于电压反馈的PMSM电流采样误差消除方法[J].控制工程,2021,28(7):1321-1327.
- [7] 刘平,王鑫,孙千志,等.永磁同步电机定子绕组温度估计的信号注入策略优化[J].电机与控制学报,2019,23(11):18-26.
- [8] 申永鹏,武克轩,吴成中,等.互补非零矢量单传感器相电流重构策略[J].电工技术学报,2023,38(8):2126-2135.
- [9] 李雪洋,李岩松,刘君.对称式闭环霍尔电流传感器研究与设计[J].电子测量与仪器学报,2022,36(8):69-76.

- [10] 陈泽平.基于电阻采样的永磁同步电机电流检测与重构[D].天津:天津科技大学,2022.
- [11] 朱贞,王本国,梁庆仟.带自标定的AD采样系统[J].电子技术与软件工程,2019,164(18):91-92.
- [12] 王剑,闫子壮.无刷直流电机无位置传感器直接转矩控制[J].控制工程,2023,30(3):487-493.
- [13] 梅柏杉,张鹏.基于高频信号注入的内置式永磁同步电机电感参数辨识[J].微特电机,2019,47(12):52-55,63.
- [14] WILSON S D, STEWART P, TAYLOR B P. Methods of resistance estimation in permanent magnet synchronous motors for real-time thermal management[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 698-707.
- [15] LIU G, CHEN B, WANG K, et al. Selective current harmonic suppression for high-speed pmsm based on high-precision harmonic detection method[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3457-3468.
- [16] 奚圣鑫,王宜怀,李跃华.基于STM32的DMA共性技术分析及应用[J].计算机应用与软件,2023,40(7):250-253.

作者简介

王向恩,硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机控制。

E-mail:1071094493@qq.com

黄平林,高级工程师,硕士生导师,主要研究方向为机电控制、特种电机开发、电力电子技术。

E-mail:pinglinhuang@ujs.edu.cn