

电机驱动产品的 FOC 驱动控制

冯建武 王六平 包崇位 陈大全

(深圳市其利天下技术开发有限公司 广东深圳 518000)

摘要：在当前的工业生产中,由于生产过程需要,需要大量地进行机械设备和相关产品制造。其中最重要的是驱动技术。而电机作为一种机电原件是实现电工电子系统运作的核心载体之一,是各行各业应用中经常见到的一种电气设备。随着社会的发展,各行各业对于伺服电机性能的要求也越来越高:特别是高精尖的医疗机器人行业对电机及驱动器在效率,转矩平稳性,噪音和动态响应方面等提出更高的要求。因此本文对 FOC 电机驱动的相关原理及发展前景做了研究。

关键词：电机驱动产品；FOC 驱动控制；原理

引言

随着电力电子技术和微电子技术的发展,交流伺服系统在工业自动化领域得到了广泛应用。目前,交流伺服系统已经成为现代制造业中最为重要的机电一体化设备之一。其中永磁同步电动机(PMSM)以其高效率、高功率密度等优点被广泛使用于各种场合。然而,传统的 PID 控制器由于自身参数难以调节以及对模型误差敏感等问题导致其性能无法满足越来越高的要求。因此,如何提高 PMSM 伺服系统的动态响应特性是当前研究热点之一,也为本文对 FOC 电机驱动控制的研究,做出了一定参考。

一、FOC 电机驱动器简介

1.1 简介

(1) 使用 FOC 矢量控制技术实现电机的高效率、低噪声。FOC 电机控制能够精准的控制磁场大小和方向,动态响应快,转矩波动小,是无刷电机高效控制的最佳选择。

(2) 市面上很多电机驱动产品的保护性能一般,为了进一步提高可靠性,我们不仅增加了霍尔异常、堵转异常等保护,还实现了在额定电压情况下任意短路不会损坏电机驱动器的机制;除此之外,我们的电机驱动器各项保护特性,都做了大量高裕量的测试验证,有力保证了电机驱动器的可靠性。

(3) 对于电机控制,我们深知环路控制的重要性,进行了大量的电机和驱动模型仿真,并结合独特的智能 AI 算法,获得真实的控制环路特性,直接生成 PID 控制参数,省去客户调试 PID 的过程,能够快速匹配不同的电机,即插即用。

1.2 FOC 控制原理

FOC 控制的其实是电机的电磁场方向。转子的转矩与于定子磁场矢量的乘积成比例关系。由矢量的关系我们可以知道,当发电机的力矩时刻达到最大时,定子场与转子的磁量就必须是相互相等的。而因为磁场的大小和方向都与额定电流的大小和流向密切相关,所以通过 FOC 控制算法对 BLDC 进行控制系统的关键就在于对三相电流的大小和流向进行控制。而控制电流的方法是:对三相输入电压和三相电流矢量的控制,以及转子的实时定位。在此基础上,提出了一种用于控制输入电流方向的方法⁰。它的本质就是把三相的电流向量合并,并把它分成两部分,即 d-q 结构,它与转子的磁轴方向垂直,并与之平行。垂直方向上的电流成分会形成一个与转子磁场正交的磁场,从而形成一个转动扭矩。而与转子磁轴线平行的电流成分,则会产生与转子磁场相同的磁场,从而不会产生力矩。此外,一种良好的控制方法,应该尽量的减少与转动磁轴方向平行的电流成份,因为这样的电流成份,可以增加电动机的过热,进而增加轴承的损坏。必须对线圈的磁场加以控制,并使之在沿定子磁轴向

相反的方向上形成较大的磁场。因此所获得的电机动力与这个电流分量的多少有比率。

在转子位置测量中,存在位置传感器和无位置传感器两种方法。在有传感器的情况下,电动机的传感器(通常是编码器)能够对电动机转子的位置进行反馈,所以可以不采用位置估计算法进行控制,比没有传感器更容易地进行控制,但对带有传感器的电动机应用,通常需要更高的控制性能。在没有传感器的情况下,由于电动机没有安装传感器,无法直接读取电动机的检测数据,从而获得电动机的转子位置,在控制中,必须采用定位估计法进行转子的定位, FOC 具体控制原理图见图 1。

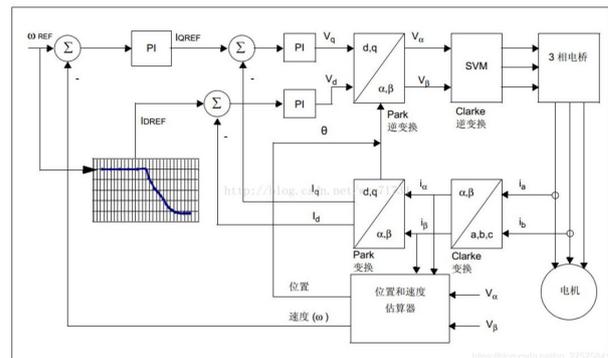


图 1: 具体的 FOC 控制原理图

二、伺服电机 FOC 控制方案

2.1 无刷电机工作原理

无刷直流电机的运行过程如下:

转子上有电感线圈,通过电感性器件产生电流,当电机在工作时,由于磁力作用会使电流从定子流过。定子绕组中感应出磁场。该直流电动机具有结构简单、成本低廉以及维护方便等特点;其基本原理是由铁芯构成了永磁体和励磁的两个部分组成:(1)转子 2 将电子线圈与电源相连接后产生感生电动势,在其内部通过控制电流的大小来实现驱动电机的启动;(3)转子 1 将直流电经线圈降压后与励磁绕组相连,从而使定子上产生磁场,并由磁场吸引电动势。当电流流过衔铁时反而成生和释放。当电流流过衔铁时,磁化磁场作用于衔铁并对其施加一定的力,使电动势消失。在驱动电机运行过程中由于各种因素限制了永磁体绕组和定子上自由电荷的移动。在这种驱动过程中,电流流过线圈的电动势会通过绕组释放出来。在电动势消失后,电流流过衔铁的永磁体和定子上自由电荷之间产生了电磁效应,从而使绕组中的涡旋分量克服。因此电机驱动系统可以通过控制施加于线圈外磁场大小来实现制动。当电动机运行时由于温度、负载等因素影响而导致转子旋转方向发生变化时会有转矩变化或转速

下降引起电机绕组端部电动势改变,从而影响了电机的驱动性能⁰。

目前市面上见到的伺服电机大多数是转子是永磁体,定子是线圈绕组,根据磁极异性相吸同性相斥的原理,这就是电机驱动的基本原理。下图所示为两线直流电机模型,由于电磁线圈通电后产生磁场,吸引永磁铁进行旋转。

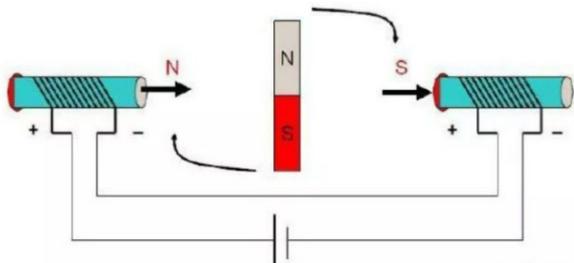


图 2: 两线直流电机模型

“无刷电机”线圈绕组分为三角形“ Δ ”和星形“Y”连接,绕组连接方式的差异会影响相电流和线电流的关系,这边不做赘述,想深入了解的可以去查询两种方式的差别。下面以采用两两导通的三相星形“Y”连接的无刷电机模型进行分析:如下图所示,无刷电机三相的连接方式是每一相引出导线与三相逆变桥相连,假如我们对 A、B 极分别施加正电压和负电压,那么由右手螺旋定则可以判断出线圈磁极的方向:A 线圈内为“N”级,B 线圈内为“S”级。由于转子是永磁铁,则转子由于磁场作用旋转到 A 与 B 线圈连线平衡位置。以此类推,若想让永磁体转子接着旋转,则改变线圈加电方向,可以得到每个通电状态下转子的角度,就是下图中的 6 个状态,每个状态相隔 60 度,6 个过程即完成了完整的转动,共进行了 6 次换相,这就是行业内通常说的无刷直流电机 BLDC 的“六步换向”控制方案,负责给三相线圈加电逻辑的部件是“逆变器”⁰。

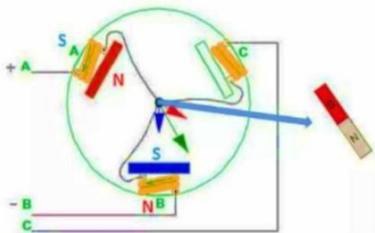


图 3: 三相星形“Y”连接的无刷电机模型

2.2 FOC 控制逻辑

FOC 是一种控制的算法。在整个系统中,它起着桥梁作用,可以改变电机状态,从而实现对电机参数和位置等方面的调节以及控制功能。通过分析计算得到了电机驱动模块、传感器及驱动器等相关数据信息;然后根据这些数据进行相应处理后选择合适方案并设计出合理结构。FOC 是一种自适应 PID 算法(PI)来调整输出转矩的闭环系统,在整个过程中,驱动系统是驱动产品的关键,它直接影响到整车性能和可靠性。电机作为一种能量转换装置,在工业生产中得到了广泛地应用。而 FOC 主要用作汽车电子控制部分的动力元件、执行器等部件来完成工作任务;本文以 FOC 为主要研究对象进行单片机技术与多传感器数据融合技术对传统制造工艺及设备结构参数改善后所做的优化设计,并通过仿真实验验证其可行性和实用性⁰。

三、电机驱动产品的 FOC 驱动控制发展现状

许多电动机控制领域都在不断地寻找各种方法来提高效率,同时也减少了系统的成本,其中 FOC (Field-Oriented Control) 成为了人们关注的焦点,并逐渐取代了传统的控制方式。目前,FOC 技术已经与 BLDC 电动机进行了很好的匹配,并且随着 MCU 的国产化速度的不断提高,它将会越来越广泛。FOC 又叫矢量变频器,能准确地调节磁场的大小和方向,使得电机转矩平稳,噪声小,效率高,而且动态响应快,因此在中低成本无刷电机领域得到广泛的应用。FOC 已经逐渐取代了传统的控制方法,在许多领域得到了广泛的应用。长期以来,电机控制并非电子工程师关注的焦点,很多开发者由于缺乏相关的经验和技能,很难很容易地设计出所需的控制线路。虽然电控一直是中国电子工程师的弱点,但是中国公司并没有因为技术难题而沉迷于传统交流电机的开发,近年来 FOC 电机的开发一直在推进,空调、无人机、机器人、医疗设备、数控机床等多领域都广泛运用到 FOC 技术,FOC 电机市场渗透率逐年增长。FOC 要求复杂的数学运算,传统的设计人员对此并不熟悉,所以过去的设计主要是由 DSP 来实现⁰。

在 FOC 技术方面,很多厂商都已经研发出了专门用于马达控制的芯片,并且利用自己的芯片来完成 FOC 马达的控制,但 FOC 马达的控制算法并不完全开放,只提供了一个 API。也有一些国产的芯片制造商将 FOC 控制模块整合到了芯片中,用户只需要通过配置相应的寄存器就可以实现对电机的控制。也有公司在相关的项目中,采用了上述的方法。然而,目前市场上还没有一个厂商能够真正实现开放源码 FOC 算法。大部分的工程师都不懂 FOC 的控制原理,也不可能自己写出相应的代码,只能通过修改一些不需要的代码来实现。研究的目标,就是要彻底解决这个问题,让每个人都能从 API 中调用相应的 API,而不需要调用库函数,让每个人都能在 FOC 算法中找到自己想要的东西。还会带领大家一起把相关算法的理论全部推导一遍,比如 SVPWM 算法、滑模观测器算法等,让大家知其然还要知其所以然。

四、结语

电机驱动技术已经成为现代科技领域的一个重要课题,对其研究具有深远意义,在工业生产过程中也有着广泛地应用。在汽车工业领域中,电机驱动技术的应用极为广泛,尤其是小批量、多品种的生产方式。一直以来,电机控制都不是电子工程师的重点领域,许多开发人员因缺乏经验或专业知识而无法轻松设计出必要的控制电路。因此,对电机驱动产品的 FOC 驱动控制的研究尤为必要。

参考文献:

- [1]林永龙,李勇峰,严成彬,张莹.基于 DRV8302 的 FOC 无刷电机驱动设计[J].电子设计工程,2022,30(23):61-65+70.
- [2]刘志鹏,张安东.可换向无感 FOC 控制策略设计与功能实现[J].自动化博览,2022,39(07):78-81.
- [3]莫帅,李旭,杨振宁,周长鹏,高瀚君,岑国建,黄云生.机器人关节无刷电机驱动与控制系统(英文)[J].Journal of Central South University,2021,28(12):3818-3828.
- [4]王其军,杨坤,苏占彪,杨峰.基于硬件 FOC 的无刷直流电机驱动器设计[J].传感器与微系统,2021,40(06):89-91+94.
- [5]沈伟,洪林,张骏,王宁.基于 BLDCM 和 FOC 算法的汽车电子水泵控制系统设计[J].现代制造工程,2020(09):108-116.

作者简介:冯建武(1986年12月)男,汉族,广东高州,本科,研发总监,研究方向:无刷电机驱动算法、观测器算法。