

直流无刷电机改进型直接转矩控制技术研究

张华军 赵科南 贺小波

宁波海伯集团有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17195

[摘要] 本文聚焦直流无刷电机改进型直接转矩控制技术。先介绍直流无刷电机结构、工作原理及传统直接转矩控制技术。接着分析传统技术缺陷与成因,如转矩波动、磁链轨迹畸变等。随后阐述改进型设计,包括总体思路、观测器设计、电压矢量选择策略、与SVPWM融合设计及稳定性与鲁棒性分析。实验表明,改进型技术有效抑制转矩脉动,提升控制精度,适用于高精度控制场景,对电机控制技术发展有重要意义。

[关键词] 直流无刷电机; 直接转矩控制; 转矩脉动抑制

中图分类号: TM33 **文献标识码:** A

Research on Improved Direct Torque Control Technology for Brushless DC Motors

Huajun Zhang Ke'nan Zhao Xiaobo He

Ningbo Haibo Group Co.,Ltd.

[Abstract] This paper focuses on improved direct torque control technology for brushless DC motors. It begins by introducing the structure and working principle of brushless DC motors, as well as traditional direct torque control technology. Subsequently, it analyzes the shortcomings and causes of traditional techniques, such as torque fluctuations and flux linkage trajectory distortion. The improved design is then elaborated, including the overall approach, observer design, voltage vector selection strategy, integration with SVPWM design, and stability and robustness analysis. Experimental results demonstrate that the improved technology effectively suppresses torque pulsation, enhances control precision, and is suitable for high-precision control scenarios, holding significant importance for the development of motor control technology.

[Key words] Brushless DC Motor; Direct Torque Control; Torque Ripple Suppression

引言

直流无刷电机凭借无电刷、少维护等优势,在工业、汽车等领域广泛应用。直接转矩控制技术作为高性能交流电机控制策略,以动态响应快著称。然而,传统直接转矩控制在直流无刷电机应用中,存在转矩波动大、磁链轨迹畸变等问题,限制其在高精度场景的应用。因此,研究改进型直接转矩控制技术,抑制转矩脉动、提升控制性能,成为当前电机控制领域的关键课题,具有重要研究价值与现实意义。

1 直流无刷电机及直接转矩控制技术基础

1.1 直流无刷电机结构与工作原理

直流无刷电机由定子、转子、位置传感器和电子换向电路四部分构成。定子采用硅钢片叠压而成,绕组按照三相对称方式布置,通过通入交变电流产生旋转磁场;转子为永磁体结构,采用钕铁硼等高性能永磁材料,可有效提升电机功率密度。位置传感器多采用霍尔元件或编码器,实时采集转子位置信号并传输至换向电路。其工作原理基于电磁感应定律和磁场相互作用原

理,电子换向电路根据位置传感器信号,依次给定子三相绕组通电,使定子旋转磁场与转子永磁磁场保持一定夹角,从而产生持续转矩驱动转子旋转^[1]。与传统有刷电机相比,该结构去除了电刷和换向器,避免机械磨损带来的寿命问题,同时减少火花干扰和维护需求,在工业驱动、新能源汽车等领域应用广泛。

1.2 直接转矩控制基本原理

直接转矩控制是一种高性能交流电机控制策略,核心思想是直接对电机的转矩和磁链进行闭环控制,无需通过电流闭环间接调节。该技术通过检测电机定子电压、电流和转速信号,利用磁链观测器和转矩观测器实时计算定子磁链幅值和电磁转矩实际值。将磁链实际值与给定值比较得到磁链误差,转矩实际值与给定值比较得到转矩误差,再结合定子磁链所在的扇区位置,通过开关表直接选择合适的电压矢量作用于逆变器。电压矢量的选择以快速减小磁链误差和转矩误差为目标,使磁链轨迹近似按圆形轨迹旋转,转矩波动控制在允许范围内。

1.3 传统直接转矩控制在直流无刷电机中的应用

传统直接转矩控制技术在直流无刷电机中的应用,以转子位置信号和定子电气参数为核心观测依据,构建基本控制框架。应用过程中,通过位置传感器获取转子位置以确定磁链扇区,利用电流传感器采集定子三相电流,结合直流母线电压信号,通过滞环比较器实现转矩和磁链的双闭环控制。具体实现时,将转矩滞环输出、磁链滞环输出与磁链扇区信号共同输入开关表,由开关表输出逆变器开关信号,控制定子绕组电压矢量切换。该应用方案保留了直接转矩控制动态响应快的特点,能快速跟踪转矩给定变化,满足电机启动和负载突变时的响应需求。在中小功率直流无刷电机驱动系统中应用广泛,如家用电器中的压缩机驱动、小型数控机床进给系统等。但在实际应用中,受滞环控制特性和电压矢量离散性影响,电机运行过程中存在转矩波动和磁链轨迹畸变等问题,限制了其在高精度控制场景的应用。

2 直流无刷电机传统直接转矩控制技术分析

2.1 传统DTC系统的建模与实现

传统DTC系统的建模以直流无刷电机数学模型和逆变器模型为核心,构建完整控制链路。电机建模采用两相静止坐标系,基于电压平衡方程和转矩方程建立数学模型,其中定子电压方程描述定子电压与电流、磁链之间的关系,转矩方程反映电磁转矩与定子磁链、转子磁链及磁链夹角的关联^[2]。逆变器模型采用三相桥式结构,将直流母线电压转换为三相交流电压,其开关状态由开关表输出的6个有效电压矢量和2个零矢量控制。系统实现时,硬件部分包含电机本体、位置传感器、电流传感器、逆变器和控制器,控制器采用DSP或MCU作为核心处理单元。软件流程为:初始化参数后,实时采集位置、电流和电压信号,通过观测器计算磁链和转矩,经滞环比较器得到误差信号,结合扇区判断输出开关信号控制逆变器。建模过程中需考虑电机铁损、永磁体磁阻等因素,但传统模型常简化这些参数,导致模型与实际系统存在偏差。

2.2 传统DTC技术的性能测试与缺陷分析

传统DTC技术的性能测试通过搭建实验平台展开,测试指标包括动态响应速度、稳态转矩波动、磁链轨迹精度和转速调节范围。实验平台由直流无刷电机、负载模拟器、传感器组、逆变器和上位机监测系统组成,在空载、额定负载和负载突变三种工况下进行测试。测试结果显示,传统DTC技术在负载突变时响应时间小于5ms,动态性能优异,但稳态运行时存在明显缺陷:转矩波动幅度可达额定转矩的±15%,尤其在低速运行时更为显著;磁链轨迹呈六边形或多边形,偏离理想圆形轨迹;转速越低,电流谐波含量越高,导致电机运行噪音增大。这些缺陷直接影响电机控制精度,在精密机床、机器人关节等对稳态性能要求高的场景中,传统DTC技术难以满足使用需求,需针对缺陷根源进行深入分析并提出改进方案。

2.3 缺陷成因的深层分析

传统DTC技术缺陷的根源主要源于控制机制和硬件限制两方面。从控制机制来看,滞环比较器的离散特性是核心因素,转矩和磁链滞环均采用固定环宽,当实际值接近给定值时,电压矢

量频繁切换,导致转矩和磁链频繁波动。同时,传统开关表仅提供有限的6个有效电压矢量和2个零矢量,无法实现电压矢量的连续调节,磁链轨迹只能通过分段近似实现圆形,必然产生轨迹畸变。从硬件限制来看,位置传感器的检测精度直接影响扇区判断准确性,霍尔传感器存在±30°的检测盲区,导致扇区判断出现误差,进而引发电压矢量选择错误。另外,电机参数变化对观测精度影响显著,传统观测器未考虑温度升高导致的定子电阻变化,以及负载变化引起的磁饱和效应,使磁链和转矩计算值与实际值存在偏差,进一步加剧转矩波动。逆变器的开关频率限制也会导致电压矢量作用时间控制精度不足,影响控制效果。

3 改进型直接转矩控制设计

3.1 改进型控制技术的总体设计思路

改进型直接转矩控制技术的总体设计思路以抑制转矩波动、优化磁链轨迹和提升参数鲁棒性为核心目标,从观测器、电压矢量选择和控制策略融合三方面构建改进框架。针对传统观测器精度不足问题,引入自适应算法动态修正电机参数,提升磁链和转矩观测精度;针对电压矢量离散性缺陷,摒弃固定开关表,采用矢量合成方式实现电压矢量的连续调节;针对控制策略单一问题,融合空间矢量脉宽调制技术,通过脉冲宽度调节进一步细化电压矢量控制^[3]。设计过程中遵循“观测精准化-控制连续化-策略融合化”的逻辑主线,先通过参数自适应观测器获取精确的磁链和转矩信息,再通过优化的电压矢量选择策略生成连续控制信号,最后结合空间矢量脉宽调制技术实现控制信号的精准输出。同时在设计中加入扰动补偿模块,针对负载突变和参数漂移等扰动因素,实时生成补偿信号,确保系统在复杂工况下的控制性能。

3.2 改进型转矩/磁链观测器设计

改进型转矩/磁链观测器采用自适应滑模观测器结构,由磁链观测模块、转矩计算模块和参数自适应修正模块三部分组成。磁链观测模块基于定子电压方程构建,引入滑模控制算法,通过设计合适的滑模面和切换函数,抑制观测过程中的扰动和噪声,提升磁链观测稳定性。转矩计算模块摒弃传统基于磁链和电流的间接计算方式,采用磁链矢量夹角直接计算转矩,结合转速反馈信号进行动态修正,减少计算延迟。参数自适应修正模块是核心改进部分,通过定子电流和磁链观测误差构建自适应律,实时辨识定子电阻和永磁体磁链等关键参数。当电机温度升高导致定子电阻变化时,自适应律通过误差信号自动调节电阻辨识值;当负载变化引发磁饱和时,通过磁链观测误差修正永磁体磁链参数。观测器输出经过低通滤波器平滑处理,进一步降低高频噪声对控制信号的影响,为后续控制提供精准的转矩和磁链反馈信息。

3.3 优化型电压矢量选择策略

优化型电压矢量选择策略摒弃传统固定开关表,采用“扇区细分+矢量合成”的双重优化方案。首先将传统6个扇区细分为12个扇区,每个扇区对应30°电角度,通过高精度位置传感器和扇区判断算法,实现磁链位置的精准定位,减少扇区判断误差导

致的电压矢量选择错误。在每个细分扇区内,根据磁链误差和转矩误差的大小,采用矢量合成方法生成目标电压矢量,该矢量由相邻两个有效电压矢量和零矢量按比例合成。通过建立误差与矢量合成比例的数学模型,利用PID调节器动态调节各矢量的作用时间,使目标电压矢量能精准跟踪磁链和转矩误差的变化。引入电压矢量作用时间优化算法,根据电机转速动态调整矢量作用时间,高速运行时延长有效电压矢量作用时间以提升响应速度,低速运行时增加零矢量作用比例以抑制转矩波动。该策略实现了电压矢量的连续可调,使磁链轨迹更接近理想圆形。

3.4改进型DTC与SVPWM的融合设计

改进型DTC与SVPWM的融合设计以DTC的动态响应优势和SVPWM的稳态控制优势为结合点,构建“动态调节+稳态细化”的混合控制架构。融合系统的核心是控制模式切换模块和SVPWM调制模块,控制模式切换模块根据电机运行状态自动切换控制模式:启动和负载突变时采用改进型DTC模式,通过直接电压矢量控制实现快速转矩响应;稳态运行时切换至融合模式,由改进型DTC生成目标电压矢量的幅值和相位,再由SVPWM调制模块将目标矢量转换为逆变器开关信号。SVPWM调制模块采用空间矢量脉宽调制算法,根据目标电压矢量在细分扇区中的位置,计算相邻有效矢量和零矢量的作用时间,通过载波比较生成脉冲宽度可调的开关信号。融合设计中加入死区补偿模块,针对逆变器功率器件的开关延迟,在脉冲信号中加入死区时间补偿,避免上下桥臂直通;同时优化调制波生成算法,减少开关损耗,提升系统效率。该融合设计兼顾了动态响应速度和稳态控制精度。

3.5改进型控制算法的稳定性与鲁棒性分析

改进型控制算法的稳定性分析主要依托李雅普诺夫稳定性理论与极点配置法深入展开。在研究过程中,首先构建改进型算法的闭环控制系统数学模型,在此基础上,定义一个综合能量函数作为李雅普诺夫函数,该函数涵盖了磁链误差、转矩误差以及参数辨识误差等多方面因素。通过对该函数求导,并严格验证其

导数在系统所有运行状态下均小于零,从而在理论上证明系统具备渐近稳定性。极点配置法也是保障系统稳定的关键手段。通过合理调整PID调节器和自适应观测器的参数,将系统闭环极点精准配置在复平面的稳定区域内,以此确保系统拥有足够的阻尼比和自然频率,为系统稳定运行筑牢根基。为验证算法的鲁棒性,研究采用仿真与实验相结合的方式^[4]。仿真环节设置了定子电阻 $\pm 20\%$ 波动、永磁体磁链 $\pm 15\%$ 衰减以及负载转矩2倍突变等极端工况,结果显示改进型算法的转矩波动幅度被严格控制在额定转矩的 $\pm 3\%$ 以内,磁链轨迹畸变率小于 5% 。实验部分则在不同温度和负载条件下开展测试,系统转速波动幅度小于 1% ,参数辨识误差小于 2% 。这一系列结果充分表明,该算法对参数变化和外部扰动具有强大的抑制能力,完全能够满足复杂工况下的稳定运行要求。

4 结束语

本文围绕直流无刷电机改进型直接转矩控制技术展开研究,针对传统技术缺陷,提出从观测器、电压矢量选择到控制策略融合的改进方案。通过理论分析、建模与实验验证,证明改进型技术能有效抑制转矩脉动、优化磁链轨迹,提升系统稳定性与鲁棒性。未来,可进一步探索更先进的控制算法与硬件优化,推动该技术在高精度、高性能电机控制领域的广泛应用,为工业自动化发展提供有力支持。

[参考文献]

- [1]王旭.直流无刷电机改进型直接转矩控制技术研究[J].防爆电机,2025,60(4):49-53.
- [2]林衍照,王亚刚.基于改进型全局滑模控制算法的无刷直流电机控制[J].控制工程,2025,32(3):475-480.
- [3]王卓,张新宇,高良超,等.基于改进滑模观测器的无刷直流电机控制研究[J].微特电机,2025,53(1):47-52,59.
- [4]朱信臣,吴宁,戚道才.直流无刷电机优化控制方法[J].电子与封装,2022,22(5):78-82.