

基于有限控制集模型预测的三相感应电机电流控制策略研究

林文富

凯利达科技股份有限公司 317500

【摘要】三相感应电机凭借结构简单、运行可靠、成本低廉等优势，在工业生产中应用广泛，电流控制的精度与响应速度直接决定电机运行性能。本文结合有限控制集模型预测控制的原理的特点，针对三相感应电机电流控制中存在的响应滞后、谐波畸变、稳态精度不足等问题，开展控制策略的设计与优化研究。通过构建电机数学模型、优化预测模型与成本函数、改进控制算法，实现电机电流的精准控制，提升电机运行的稳定性与可靠性。研究表明，所提出的控制策略能够有效降低电流谐波畸变率，加快响应速度，提升控制精度，为三相感应电机电流控制的设计与优化提供理论支撑与实践参考。

【关键词】有限控制集；模型预测控制；三相感应电机；电流控制；控制算法

Research on Current Control Strategies for Three-Phase Induction Motors Based on Finite Control Set Model Prediction

Lin Wenfu

Kellyda Technology Co., Ltd. 317500

【Abstract】Three-phase induction motors, renowned for their simple structure, reliable operation, and cost-effectiveness, are widely utilized in industrial production. The precision and response speed of current control directly determine motor performance. This study leverages the principles of finite control set model predictive control to address challenges such as response lag, harmonic distortion, and insufficient steady-state accuracy in current control systems for three-phase induction motors. Through establishing motor mathematical models, optimizing predictive models and cost functions, and improving control algorithms, precise current control is achieved to enhance operational stability and reliability. The research demonstrates that the proposed control strategy effectively reduces current harmonic distortion rates, accelerates response speeds, and improves control accuracy, providing theoretical foundations and practical references for current control design optimization in three-phase induction motors.

【Key words】Finite control set; Model predictive control; Three-phase induction motor; Current control; Control algorithm

引言

在工业生产朝着自动化、高精度方向发展的背景下，三相感应电机作为核心动力设备，其运行性能直接影响整个生产系统的稳定性与高效性。电流控制是三相感应电机控制的核心环节，其控制效果直接关系到电机的转速精度、转矩输出稳定性以及能量利用效率，良好的电流控制策略能够有效减少电机运行过程中的能量损耗，延长设备使用寿命。

当前，三相感应电机电流控制常用的策略存在诸多不足，传统线性控制策略响应速度较慢，难以适应复杂工况下的动态控制需求，且在负载波动时控制精度明显下降；常规模型预测控制策略虽响应速度较快，但存在谐波畸变率较高、计算复杂度大等问题，影响电机的稳态运行性能。随着微处理器技术的迅猛发展，有限控制集模型预测控制凭借控制灵活、动态响应快、易于实现等优势，在电机控制领域的应用逐渐广泛，但目前相关研究仍存在预测精度不足、算法优化不够深入等问题，且部分研究依赖具体应用案例，理论指导性不强。

针对上述问题，开展基于有限控制集模型预测的三相感应电机电流控制策略研究具有重要的现实意义与设计价值。本文通过优化有限控制集模型预测控制的核心环节，解决传统控制策略存在的缺陷，提出一套切实可行的电流控制优化策略，旨在提升三相感应电机电流控制的精度与响应速度，改善电机运行性能，为相关控制策略的设计与优化提供理论参考。

一、相关理论基础

开展基于有限控制集模型预测的三相感应电机电流控制研究，需先明确三相感应电机的运行特性与有限控制集模型预测控制的核心原理，为后续控制策略的设计与优化奠定理论基础，相关理论主要包括以下两方面。

1.1 三相感应电机运行特性与数学模型

三相感应电机的运行核心是通过定子绕组通入三相交流电，产生旋转磁场，进而带动转子旋转，实现电能向机械能的转换，其运行特性与定子电流、转子电流、旋转磁场转

速等参数密切相关。电流作为电机能量转换的核心载体,其幅值、频率与相位的稳定性直接影响电机的转矩输出与转速精度,若电流控制不当,会导致电机出现转速波动、转矩脉动、能量损耗增加等问题,甚至影响电机的正常运行。

为实现对电机电流的精准控制,需构建三相感应电机的数学模型,结合电机的运行特性,忽略磁饱和、涡流损耗等次要因素,基于同步旋转坐标系建立数学模型,将定子电流、转子电流分解为d轴和q轴分量,分别描述电流与磁场、转矩之间的关系。该模型能够清晰反映电机各参数之间的内在关联,为后续预测模型的构建与控制策略的设计提供理论依据,同时也为控制算法的优化提供了量化分析的基础。

1.2 有限控制集模型预测控制原理

有限控制集模型预测控制是一种基于模型的先进控制方法,其核心特点是控制对象的输入量为有限个离散控制信号,通过构建控制对象的预测模型,对每个控制信号对应的输出结果进行预测,再根据预设的成本函数对预测结果进行评价,选择最优的控制信号作用于控制对象,实现对输出量的精准控制。

该控制方法主要由预测模型、有限控制集、成本函数、滚动优化四个核心部分组成,其中预测模型是核心,用于根据控制对象的历史运行参数与当前控制信号,预测未来一段时间内的输出状态;有限控制集由离散的控制信号组成,决定了控制策略的可选范围;成本函数用于评价预测结果与目标值的偏差,是选择最优控制信号的依据;滚动优化则是通过实时更新运行参数,不断优化控制信号的选择,确保控制效果的稳定性。与传统控制方法相比,有限控制集模型预测控制无需复杂的调节器设计,动态响应速度更快,控制灵活性更高,更适用于三相感应电机的电流控制场景。

二、三相感应电机电流控制存在的问题分析

结合三相感应电机的运行特性与当前常用电流控制策略的应用现状,从控制精度、响应速度、稳态性能三个维度,分析电流控制过程中存在的核心问题,为后续控制策略的优化提供明确的方向,具体如下。

首先,控制精度不足。当前部分电流控制策略未充分考虑电机运行过程中的参数扰动,如定子电阻、转子电阻随温度变化而发生的波动,导致预测模型与电机实际运行状态存在偏差,进而影响电流控制精度,出现电流幅值偏差过大、相位偏移等问题,无法满足高精度生产场景的需求。同时,部分控制策略的成本函数设计不合理,未充分兼顾电流偏差与谐波抑制,进一步降低了控制精度。

其次,动态响应速度较慢。传统线性控制策略依赖于调节器的参数整定,其响应速度受调节器参数影响较大,当电机负载发生突变或运行工况发生变化时,无法快速调整控制信号,导致电流响应滞后,出现转速波动、转矩脉动等问题,

影响电机的动态运行性能。即使是常规模型预测控制策略,也因计算复杂度较高,导致控制信号的选择存在一定延迟,影响响应速度。

最后,稳态性能较差。在电机稳态运行过程中,部分控制策略存在电流谐波畸变率较高的问题,谐波电流会增加电机的能量损耗,导致电机发热严重,同时会影响电机的转矩输出稳定性,缩短电机使用寿命。此外,部分控制策略在低负载运行工况下,易出现电流振荡现象,进一步恶化电机的稳态运行性能,无法实现电机的高效稳定运行。

三、基于有限控制集模型预测的电流控制策略设计

针对上述电流控制存在的问题,结合有限控制集模型预测控制的原理与三相感应电机的运行特性,从预测模型优化、有限控制集设计、成本函数改进、控制算法优化四个方面,设计全新的电流控制策略。

3.1 预测模型优化设计

预测模型的精度直接决定电流控制的效果,针对传统预测模型未考虑参数扰动的问题,对三相感应电机的数学模型进行优化,引入参数自适应修正机制,实时监控电机运行过程中的定子电阻、转子电阻等关键参数,根据参数变化情况对预测模型进行动态修正,减少模型偏差。

基于同步旋转坐标系,优化电机电流预测模型,将定子电流d轴、q轴分量作为预测对象,结合电机的电磁转矩方程与运动方程,推导电流预测表达式,明确控制信号与电流变化之间的关联关系。同时,简化预测模型的计算过程,在保证预测精度的前提下,减少计算量,提升控制信号的响应速度,确保预测模型既能够准确反映电机的实际运行状态,又能够满足实时控制的需求。

3.2 有限控制集合理设计

有限控制集的设计直接影响控制策略的灵活性与控制效果,结合三相感应电机的供电方式,采用电压源逆变器作为控制信号的输出载体,其输出的电压矢量构成有限控制集。针对传统有限控制集控制信号数量过多、计算复杂度大的问题,优化控制集的构成,筛选出与电流控制目标匹配度较高的电压矢量,减少控制信号的数量,降低计算复杂度。

同时,结合电机的运行工况,对有限控制集进行动态调整,在电机负载突变或工况变化时,适当增加控制信号的数量,提升控制策略的灵活性;在电机稳态运行时,减少控制信号的数量,降低计算量,实现控制效果与计算效率的平衡。通过合理设计有限控制集,既能够保证电流控制的精度,又能够提升控制策略的实时性。

3.3 成本函数改进设计

成本函数是选择最优控制信号的核心依据,针对传统成本函数未充分兼顾电流偏差与谐波抑制的问题,改进成本函数的设计,引入电流偏差项、谐波抑制项与控制平滑项,实

现多目标优化。其中,电流偏差项用于衡量预测电流与目标电流之间的偏差,确保电流控制的精度;谐波抑制项用于抑制电流谐波,降低谐波畸变率,改善电机的稳态性能;控制平滑项用于减少控制信号的突变,避免电机出现转矩脉动、转速波动等问题。

通过合理设置各分项的权重系数,平衡各优化目标之间的关系,确保成本函数既能够优先保证电流控制精度,又能够有效抑制电流谐波,同时提升控制策略的平滑性。权重系数的设置基于电机的运行特性,无需依赖具体实验数据,通过理论分析确定合理的取值范围,确保成本函数的合理性与通用性。

3.4 控制算法优化设计

针对常规模型预测控制算法计算复杂度高、响应速度不足的问题,对控制算法进行优化,引入滚动优化改进机制,缩短优化周期,提升控制信号的更新速度。同时,采用简化的优化算法,减少每次优化过程中的计算量,在保证优化效果的前提下,进一步提升控制策略的实时性。

引入误差补偿机制,实时监测预测电流与实际电流之间的偏差,根据偏差变化情况对控制信号进行动态补偿,减少预测误差,提升控制精度。此外,优化控制算法的执行流程,将预测、评价、优化等环节进行合理整合,减少冗余计算,确保控制算法能够快速响应电机运行工况的变化,实现电流的精准控制。

四、控制策略的理论性能分析

为验证所设计的基于有限控制集模型预测的三相感应电机电流控制策略的有效性,从理论层面开展性能分析,结合电流控制的核心评价指标,从控制精度、动态响应速度、稳态性能三个方面进行分析。

在控制精度方面,通过预测模型的参数自适应修正机制,有效减少了参数扰动对控制精度的影响,预测模型与电机实际运行状态的偏差大幅降低;改进后的成本函数能够精准衡量电流偏差,结合误差补偿机制,进一步提升了电流控制精度,定子电流d轴、q轴分量的跟踪偏差可控制在较小范围内,能够满足高精度控制需求。与传统控制策略相比,控制精度提升明显,能够有效解决电流幅值偏差、相位偏移等问题。

在动态响应速度方面,优化后的有限控制集减少了控制

信号的数量,简化了控制算法的计算过程,缩短了控制信号的更新周期;滚动优化改进机制的应用,进一步提升了控制算法的响应速度,当电机负载突变或运行工况发生变化时,能够快速调整控制信号,电流响应滞后时间大幅缩短,有效解决了传统控制策略响应速度慢的问题,提升了电机的动态运行性能。

在稳态性能方面,成本函数中谐波抑制项的引入,能够有效抑制电流谐波,降低电流谐波畸变率,减少电机的能量损耗,避免电机发热严重的问题;控制平滑项的应用,减少了控制信号的突变,避免了电机出现转矩脉动、转速波动等问题,同时解决了低负载工况下电流振荡的问题,提升了电机稳态运行的稳定性与可靠性。

五、结论与展望

5.1 结论

本文围绕基于有限控制集模型预测的三相感应电机电流控制策略展开研究,通过分析三相感应电机电流控制存在的控制精度不足、动态响应速度慢、稳态性能差等问题,结合有限控制集模型预测控制的理论基础,设计了一套全新的电流控制策略,得出以下结论:优化后的预测模型引入参数自适应修正机制,能够有效减少参数扰动的影响,提升预测精度;合理设计的有限控制集实现了控制效果与计算效率的平衡,降低了计算复杂度;改进后的成本函数兼顾了电流控制精度、谐波抑制与控制平滑性,实现了多目标优化;优化后的控制算法提升了响应速度与实时性,减少了预测误差。

所设计的控制策略能够有效解决传统电流控制策略存在的缺陷,提升三相感应电机电流控制的精度、动态响应速度与稳态性能,减少电机能量损耗,延长电机使用寿命,为三相感应电机电流控制策略的设计与优化提供了理论支撑与实践参考,符合工业生产自动化、高精度的发展理念。

5.2 展望

随着微处理器技术与控制理论不断发展,基于有限控制集模型预测的三相感应电机电流控制策略可向高精度、智能化、轻量化方向发展。未来可进一步优化预测模型,引入更精准的参数辨识方法,减少模型偏差,提升控制精度;探索新型优化算法,进一步降低计算复杂度,提升控制策略的实时性与可靠性,适配更复杂的运行工况。

参考文献

- [1]姚广.三相开关磁阻电机电磁分析与控制策略研究[D].淮阴工学院, 2025.DOI: 10.27944/d.cnki.ghygy.2025.000081.
- [2]王志超.小电感三相永磁同步电机的模型预测电流控制研究[D].天津大学, 2021.DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2021.004751.
- [3]黄启岚.低载波比下多相感应电机的电流控制研究[D].浙江科技学院, 2021.DOI: 10.27840/d.cnki.gzkj.2021.000093.
- [4]杨正茂.三相逆变器有限集模型预测控制的加权因子优化研究[D].中南大学, 2022.DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2022.003470.