

永磁同步电机控制系统的稳定性研究

王圣超, 王炳强, 陈立

陕西长岭电子科技有限责任公司, 陕西 宝鸡 721000

DOI:10.61369/ME.2026060024

摘 要 : 永磁同步电机具有运行损耗小、动力密度大、调速范围广等技术优势, 在工业驱动、智能装备、新能源传动等领域得到了广泛的应用, 控制系统稳定运行的状态直接影响到设备传动精度和作业连续性。电机控制系统运行过程中, 由于负载突变、参数摄动、电磁干扰、控制算法响应偏差等各种工况的出现, 容易造成转速波动、电流震荡、系统失稳等运行故障。本文以永磁同步电机矢量控制架构为基础, 从系统运行机理、稳定性影响因素、核心控制技术、仿真调试优化、稳态运维调控等技术方面进行研究, 整理出系统失稳的技术原因, 改进闭环控制策略和参数匹配方案, 建立完整的稳定性调控技术体系, 提高永磁同步电机控制系统在复杂工况下稳态运行的能力。

关 键 词 : 永磁同步电机; 控制系统; 矢量控制; 运行稳定性

Research on the Stability of Permanent Magnet Synchronous Motor Control System

Wang Shengchao, Wang Bingqiang, Chen Li

Shaanxi Changling Electronic Technology Co., Ltd., Baoji, Shaanxi 721000

Abstract : Permanent magnet synchronous motors have technical advantages such as low operating losses, high power density, and wide speed regulation range. They have been widely applied in industrial drives, intelligent equipment, and new energy transmission fields. The stable operation state of the control system directly affects the transmission accuracy and continuous operation of the equipment. During the operation of the motor control system, various conditions such as load sudden changes, parameter perturbations, electromagnetic interference, and deviation in control algorithm response are likely to cause running faults such as speed fluctuations, current oscillations, and system instability. Based on the vector control architecture of permanent magnet synchronous motors, this paper conducts research from technical aspects such as system operation mechanism, stability influencing factors, core control technologies, simulation debugging optimization, and steady-state operation regulation. It identifies the technical reasons for system instability, improves closed-loop control strategies and parameter matching schemes, establishes a complete stability regulation technology system, and enhances the steady-state operation capability of the permanent magnet synchronous motor control system under complex conditions.

Keywords : permanent magnet synchronous motor; control system; vector control; operating stability

引言

工业自动化以及精密传动技术不断革新, 永磁同步电机渐渐取代传统的异步电机, 成为高精度传动设备的主要动力源, 符合低速大扭矩、宽范围调速、高精度稳定运行的工业需求。永磁同步电机依靠多变量、强耦合、非线性的工作机理来工作, 控制系统的闭环调节精度很容易受到内外工况的干扰而产生动态震荡和稳态偏移。常规固定参数控制方式不能适应复杂的负载和多变的运行工况, 容易产生持续转速脉动、电流谐波超标的状况, 造成系统动态失稳。依靠专业控制技术改善、参数精确契合和工况动态调节, 可以有效地抑制造成系统震动的根源, 加强系统的抗干扰能力, 从而保证永磁同步电机始终处在稳定的运行状态中。

一、永磁同步电机控制系统运行技术机理

(一) 电机本体电磁运行机理

永磁同步电机依靠转子永磁体建立恒定磁场, 定子绕组通入

交变电流产生旋转磁场, 依靠磁场耦合实现连续转矩输出。电机在工作时定子电流、磁链、转矩这三者之间存在着一种动态的耦合关系, 转子的位置发生改变会致使电磁耦合状况发生变化, 从而引发非线性的动态运行特性。电机在稳态运行时电磁参数不

变，转矩输出稳定，转速变化只在极小区间内。在动态工况下，负载及电压的变化均会破坏原有的电磁平衡状态，进而引发磁链偏移与转矩波动，从而影响整个控制系统的稳定运行。上述关系构成了系统稳定性调节的基本物理依据。

（二）矢量控制架构运行逻辑

目前，永磁同步电机主要使用转子磁场定向矢量控制架构，利用坐标变换将定子交变电流分解成直轴电流和交轴电流，从而达到励磁分量和转矩分了解耦的目的。控制系统分别调节两路电流的输出幅值和响应速度来准确地控制电机励磁强度和电磁转矩，实现宽范围平滑调速。解耦控制可以削弱变量耦合造成的运行干扰，但是坐标变换误差、电流采样偏差会造成解耦不完全，引起控制回路震荡，直接影响到系统的稳态控制精度，影响电机连续工作的稳定性。

（三）控制系统闭环调控流程

永磁同步电机控制系统使用双闭环控制结构，外环是转速闭环调节回路，内环是电流闭环调节回路。转速传感器实时采集电机实际转速，和给定转速做差值比较，转速偏差经过调节器运算后得到电流给定值。电流回路实时采集三相定子电流，经坐标变换后得到电流偏差调节信号，输出脉宽调制驱动信号，控制逆变器开关状态，实现电机转速和转矩的动态修正。双层闭环响应速度快、调节精度高、参数匹配好，直接决定整个控制系统动态稳定性、稳态精度。

（四）系统稳态运行判定技术标准

永磁同步电机控制系统稳态运行有明确的技术判定标准，稳态工况下电机转速波动幅度处于非常小的范围内，没有周期性的转速脉动和突变偏移。定子三相电流波形正弦度好，谐波含量符合设备运行标准，缺少高频震荡和电流尖峰。电磁转矩输出连续平稳，无明显转矩脉动，设备无异常振动、噪声。闭环调节系统无持续超调、低频振荡、稳态误差小，动态响应速度快、恢复时间可控，可以满足各种精密传动设备稳定运行的要求^[1]。

二、永磁同步电机控制系统稳定性核心影响技术因素

（一）电气参数扰动影响

电机在长时间运行过程中，定子电阻、直轴电感、交轴电感等主要的电气参数都会因为温度上升、磁体损耗增大、工作条件变坏而产生动态变化，出现参数扰动的现象。控制系统常规调节器按额定参数进行运算控制，实际参数和额定参数不匹配会造成闭环调节增益失调，减小系统的收敛速度。参数偏移幅度不断增大，就会引发电流回路震荡、转速稳态误差变大，导致系统稳态精度降低，严重时还会出现低频持续震荡，破坏控制系统稳定运行状态。

（二）负载动态突变干扰

工业实际运行环境下，电机负载处于动态变化中，瞬时加载、瞬时卸载、负载波动冲击等都会成为造成系统动态失稳的外在原因。负载突然变化会造成电机电磁转矩的瞬间平衡被破坏，造成转速瞬间下降和上升。常规固定参数调节器动态适配能力差，难以迅速响应负载的变化来实现参数的自适应调节，在动态

调节过程中会出现超调过大、调节时间过长、多次震荡收敛的现象，导致电机电态运行不稳定，影响设备连续作业的稳定性。

（三）信号采样与调制误差

控制系统电流采样、转速采样、脉宽调制环节都存在固有的误差和延时的偏差，会一直干扰系统的闭环调节精度。电流传感器的采样精度不足、采样延时过大都会造成反馈电流失真，从而引起电流回路调节误差。转子位置检测信号有抖动误差，会造成坐标变换准确度降低，解耦效果变差。逆变器的开关延时、死区时间都会造成输出电压的畸变，引入高频谐波干扰，造成发电机低速时出现震荡现象、高速时运行不稳定的情况，则会对系统的稳态运行质量造成一定的影响^[2]。

三、提升控制系统稳定性的核心控制技术

（一）改进型PI双闭环控制技术

在传统的PI双闭环控制的基础上加入积分分离和限幅调节算法，改善闭环调节的动态性能，提高系统的稳定性。对转速外环和电流内环分别设置积分阈值，偏差大时就取消积分作用，防止积分积累造成超调过大。当偏差收敛至稳态区间后，采用积分调节以消除系统的稳态误差。此外，增设输出限幅环节，对调节器的最大输出幅值进行限制，从而防止瞬时超调所引发的系统振荡。改进型PI控制能够有效平衡动态响应速度与稳态精度，削弱由参数扰动导致的调节偏差，适用于常规工况下的稳定控制需求。

（二）自适应参数辨识调控技术

采用在线参数辨识算法，对定子电阻、电感等电气参数的动态变化进行实时监测，从而达到控制参数自适应修正的目的。根据电机电态运行方程，利用实时采集到的电流、电压等数据，按照周期性的计算方式来逐步更新电气参数数值，准确找到参数扰动变化的规律。控制系统根据辨识得到的实际参数，动态调节PI调节器的增益和解耦运算参数，消除由于参数偏移造成的调控失配问题。该技术可以大大提高系统适应性，消除由于参数变化所引起的稳态振荡，提高系统长期运行稳定性。

（三）负载观测前馈补偿技术

搭建负载转矩观测模型，实时估计电机的负载转矩，加入前馈补偿控制环节，解决由于负载突然变化引起的动态失稳问题。利用电机的机械方程和电磁方程联立求解，准确地得到负载转矩的变化情况，从而提前预知负载变化的趋势。将负载观测值加入到转速闭环控制回路中，进行前馈补偿调节，提前修正控制输出量，抵消负载突然变化造成的转速冲击。前馈补偿和闭环反馈控制互相配合可以大大缩短动态调节时间，抑制动态超调和震荡，提高系统的负载抗干扰能力^[3]。

四、永磁同步电机控制系统稳定性仿真与调试技术

（一）系统仿真模型搭建参数配置

依靠仿真平台创建起完整的永磁同步电机控制系统模型，准确地对应实际设备的电气参数以及控制结构。录入电机额定功

率、额定转速、定子电阻、交直流电感、永磁体磁链等基本参数，搭建双闭环矢量控制仿真框架。同步搭建负载扰动模块、参数偏移模块、电磁干扰模块等，对工业实际复杂情况下的工况进行模拟。配置仿真步长和运算精度，与实物控制系统运行时序相适应，保证仿真模型和实际设备运行特性高度一致，为稳定性调试优化提供可靠的仿真载体。

（二）稳态工况仿真调试优化

进行额定工况下的稳态仿真测试，观测系统在稳态运行状态下转速、电流及转矩波形的表现。针对稳态运行时出现的轻微转速脉动及电流谐波超标等细微问题，对PI调节器的比例增益与积分系数进行精细调节，并优化积分分离阈值的参数设定。通过逐组比对参数调整后的波形收敛情况，选取最佳参数匹配组合，以消除系统的稳态误差与周期性振荡，确保在稳态工况下电机转速、电流及转矩保持稳定。

（三）动态工况仿真扰动测试

利用仿真模型对瞬时加载、瞬时卸载、连续负载波动及参数漂移等动态工况进行模拟，以测试控制系统在动态条件下的抗干扰能力。针对系统在上述工况下的转速跌落幅度、超调量、恢复时间及电流振荡次数等关键性能指标进行测试，并评估自适应调节、前馈补偿与谐波抑制等技术的实际作用。在此基础上，对控制系统开展有针对性的优化调整，以提高系统的响应速度与收敛速度，降低动态扰动引起的运行波动，从而确保系统在复杂动态工况下能够迅速恢复至稳态运行状态。

（四）实物平台参数标定校验

完成仿真优化之后进行实物平台参数标定，将仿真最优控制参数转移到实体控制系统上。建立实物测试平台，配置转速检测、电流检测、转矩检测设备，分别做空载、半载、满载工况的稳定性测试。对仿真得到的控制参数进行修正，消除由于硬件延时、采样误差、器件损耗等造成的参数偏差。逐工况校验系统稳态精度和动态响应性能，保证实物控制系统稳定指标完全满足要求，使仿真优化和实际运行准确对接^[4]。

五、永磁同步电机控制系统稳定性长效优化技术措施

（一）全工况参数自适应匹配优化

搭建全工况参数自适应调节体系，按照电机运转转速区间、

负载等级、温度状况来匹配最佳的控制参数。将低速、中速、高速运行区间和轻载、中载、重载负载区间进行划分，并且设置分区基准参数。依靠实时辨识出的电气参数和负载参数，对控制参数进行实时调整，从而达到各种工况下控制参数精准匹配的目的。彻底克服固定参数不能适应全工况运行的技术缺陷，全面提高全转速全负载区间系统的稳定性。

（二）信号采集与传输精度优化

对控制系统信号采集硬件进行升级配置，用高精度采样芯片、抗干扰传感器提高电流、转速信号的采集精度。优化信号传输线路的布置，区分强弱电线路走线，使用屏蔽线缆进行信号传输，规范接地工艺，降低工业电磁干扰。增设多级软件滤波算法，根据信号的波动特点，自适应调节滤波参数，去掉随机干扰信号、高频杂波。精准的信号数据可以保证闭环调节运算的准确性，从源头上避免由于信号误差引起的系统震荡和失稳问题。

（三）逆变器运行调制策略优化

不断改进逆变器的调制方式，根据不同的转速区间来调节调制方式，在低速区间使用细分调制算法提高低速电压输出的精度，抑制低速爬行和震荡现象。优化高速区间的开关频率设置，以达到平衡开关损耗和波形质量的目的，从而保证高速运行时的电流平滑。动态补偿开关器件的死区时间和导通压降来修正输出电压畸变的问题，减小电流谐波和转矩脉动。采用调制策略分级优化的方法，可以满足全部的全转速区间运行稳定性的调节要求^[5]。

六、结论

永磁同步电机控制系统稳定性受到电气参数摄动、负载动态扰动、信号调制误差、外部工况干扰等诸多技术因素的影响，多变量耦合的运行特性容易造成系统震荡、转速波动、稳态失稳等问题。采用改进的双环控制系统，并引入自适应参数辨识与负载前馈补偿技术，可有效提升系统的动态抗干扰能力和稳态精度。通过综合运用仿真调试与实物标定，辅以全工况自适应调节、信号精度优化以及温度老化补偿等长期技术手段，能够确保永磁同步电机控制系统在各种复杂的工业工况下稳定运行，从而为精密传动设备的自动化运行提供可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 曾小莉,王维庆,王海云.基于新型电压控制律的永磁同步电机滑模补偿控制[J].电力系统保护与控制,2023,51(10):153-162.
- [2] 余洋,张千慧,余宗哲,等.基于反推控制的永磁同步电机稳定性单矢量控制策略[J].电工技术学报,2024,39(14):4377-4390.
- [3] 储禹丞,张兰红,程梦坤.基于改进自适应趋近率的永磁同步电机无模型控制系统设计[J].计算机测量与控制,2024,32(5):137-143.
- [4] 刘鑫.基于滑模控制的永磁同步电机矢量控制系统研究与仿真[J].科学技术创新,2023(7):196-199.
- [5] 赵新,王海明,赵彦辉.内嵌式永磁同步电机矢量控制系统弱磁控制研究[J].电工电气,2024(7):37-42.