

直流电力拖动系统可逆调速控制的稳定性优化

宋双双

河南中柱建设集团有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：直流电力拖动系统在工业领域中占据重要地位，其可逆调速控制是实现电动机四象限运行的关键技术。然而，系统在正反向切换过程中存在的环流问题、参数摄动及负载扰动等因素严重制约了调速性能的稳定性。本文以直流电力拖动系统可逆调速控制为研究对象，围绕稳定性优化问题展开系统论述。首先阐述了可逆调速系统的基本架构与环流抑制原理，进而从双闭环控制结构入手，分析了电流环与转速环的PI控制器设计方法。在此基础上，探讨了基于劳斯判据的稳定性边界条件，并引入自适应控制、模糊控制及群体智能优化算法等参数整定策略，以提升系统的动态响应与抗扰动能力。研究表明，通过合理的控制器参数优化与先进控制策略的融合，可有效拓宽系统的稳定域，改善调速品质。

【关键词】：直流电力拖动；可逆调速；稳定性优化；双闭环控制；PI参数整定

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.091

1 引言

直流电力拖动系统因其调速范围广、起动转矩大、控制精度高等优点，在轧钢机、矿井提升机、龙门刨床等需要频繁正反转及快速制动的生产机械中得到了广泛应用。这些生产机械要求电动机既能正转又能反转，且常常需要快速地起动和制动，这就要求电力拖动系统具备四象限运行的特性，即构成可逆的调速系统。改变电枢电压的极性或改变励磁磁通的方向，是改变直流电机旋转方向的两种基本途径。

然而，可逆调速系统在实现电动与回馈制动状态切换的过程中，必然面临环流这一关键性问题。环流的产生不仅会增加系统的损耗与功率器件负担，严重时还会导致逆变失败甚至烧毁桥路，对系统的安全稳定运行构成威胁。因此，如何有效抑制环流、优化系统的动态稳定性，一直是直流调速领域的研究重点。

随着电力电子技术与自动控制理论的不断进步，逻辑无环流控制、错位无环流控制等策略相继提出并得到工程验证。与此同时，双闭环直流调速系统在结构上为内环电流环与外环转速环的级联设计，其PI控制器的参数整定效果直接决定了系统的稳态精度与动态品质。近年来，粒子群算法、遗传算法等智能优化方法已被引入同步电机调速系统的参数优化之中，取得了良好的效果。本文以此为背景，系统论述直流电力拖动系统可逆调速控制的稳定性优化，以期工程实践提供理论参考。

2 可逆调速系统结构及环流问题分析

2.1 可逆调速系统的基本架构

直流V-M（晶闸管-电动机）可逆调速系统，作为一种常见的直流电机调速方案，根据主回路的工作形式主要可分为有

环流和无环流两大类。在有环流系统中，正反两组晶闸管整流桥可以同时导通，通过精密的配合控制策略，如 $\alpha = \beta$ 工作制，确保电枢电流在正反转时平稳换向，从而减少转矩脉动并提升动态响应。然而，这种系统在桥路之间会产生持续的环流，导致额外的电能损耗和器件发热，不仅降低了整体效率，还增加了冷却系统的负担。相比之下，无环流系统通过先进的控制逻辑，如逻辑无环流或错位无环流方式，严格检测电流过零信号并阻断正反桥臂的同时导通，从根本上消除了环流损耗。这不仅显著提高了能效和可靠性，还简化了散热设计，降低了成本，因此无环流系统在工业应用中已成为主流选择，广泛应用于机床、轧机等高性能调速场合。

2.2 环流的产生机理与危害

在V-M可逆系统中，当正反整流桥同步接收触发信号时，即使平均输出电压保持一致，由于晶闸管开关特性、电网谐波及负载变化等因素，瞬时电压波形仍会出现差异，从而催生不流经电机电枢的内部环流。这种环流主要在两个整流桥之间形成回路，导致桥臂电流不均。环流的存在会加剧晶闸管和整流变压器的导通损耗与发热，缩短器件寿命，同时增大系统的无功损耗，降低整体功率因数，影响能源利用效率。若环流超出设计限值，还可能干扰换相过程，诱发逆变失败，造成晶闸管击穿、整流变压器过载，甚至引发电机运行失控或设备烧毁等严重故障。因此，环流抑制成为保障系统安全稳定运行的关键环节，需通过精确控制触发角、配置环流电抗器或采用闭环调节策略等手段，有效限制环流幅值，提升系统可靠性与性能。

2.3 逻辑无环流与错位无环流控制策略

逻辑无环流控制方案依赖于逻辑控制器来实时判别系统工况，严格遵循“先封锁、后开放”的操作准则。在切换过程

中,必须等待原工作组的电流完全归零后,才能投入另一组整流桥,从而通过精确的时序逻辑有效规避环流产生。这种方案对切换逻辑的可靠性要求极为严苛,任何误判或延迟都可能导致系统故障,因此常采用冗余设计或高精度传感器来确保安全。错位无环流控制方案则通过错移双组触发脉冲的相位,直接切断环流的流通路径,无需额外的硬件逻辑单元。为了优化动态特性,通常增设电压内环进行调节,以提升响应速度和稳定性,但这也使得电路设计复杂度相对偏高,涉及精密的相位控制和滤波环节,因此多应用于大容量调速场景,如工业电机驱动或电力牵引系统。两种控制方案各有其适用场景:逻辑无环流适用于对切换精度要求高、逻辑控制可靠的场合,例如中小型调速设备;错位无环流则更适合大功率、高动态响应的系统,能够减少硬件成本但增加调试难度。它们共同构成了无环流调速系统的核心实现方式,为不同类型的调速需求提供了灵活而高效的解决方案。

3 双闭环控制的稳定性分析

3.1 双闭环调速系统的数学模型

直流调速系统普遍采用转速-电流双闭环架构,这种设计通过外环转速调节器(ASR)和内环电流调节器(ACR)的分层控制,有效提升系统动态与静态性能。外环ASR专注于转速的精准调节,其输出作为内环ACR的给定值,从而设定电流参考;内环ACR则负责电流的快速跟踪,通过输出控制整流器件调压,实现对电机电压的灵活调整,从而兼顾电流快速响应与转速精准控制的双重目标。工程上,为优化内环动态特性,将电流环校正为典型I型系统,并选用PI调节器以增强抗扰能力;而转速环则校正为典型II型系统,以实现无静差调速,同样配置PI控制来消除稳态误差。调节器参数整定依据中频宽 $h=5$ 的准则,该准则基于频率法设计,确保系统在响应速度与稳定性之间取得平衡,从而完成可靠且高效的调速系统配置。

3.2 基于劳斯判据的稳定性条件

受整流滞后、电枢电磁惯性与机电惯性影响,系统特征方程为三阶,依托劳斯判据分析稳定性:系统稳定首要条件是特征方程全部系数大于0,开环放大倍数 K 需满足 $K < \frac{T_m(T_1+T_s)+T_s^2}{T_1T_s}$ 。机电、电磁时间常数越小,系统容许的极限

开环增益越低,稳定裕度随之缩减。工程设计里,满足静态性能所需的放大倍数经常超出稳定阈值。

3.3 稳定性与静态指标的矛盾及解决思路

在控制系统中,增大开环增益确实能够有效降低系统的静差,从而提升稳态精度,同时拓展调速范围,增强系统的整体

调节能力。然而,当开环增益超过一定阈值时,会减少系统的相位裕度,导致振荡加剧甚至失稳,这便揭示了稳态精度与动态稳定性之间固有的矛盾关系。为解决这一矛盾,现有的技术路径主要聚焦于两个方面。一是引入微分校正环节,通过增加系统的阻尼特性来抑制超调,在保障足够稳定裕度的基础上优化动态响应速度与平稳性。二是利用智能优化算法,如遗传算法、粒子群优化算法等群体智能方法,对PI控制器的参数进行全局寻优;这些算法能够在满足稳定约束的条件下,自动匹配出兼顾快速性与鲁棒性的最优参数组合,从而在复杂工况下实现性能最优化。群体智能算法凭借其并行搜索、自适应调整的优势,已成为当前参数整定研究中广泛采用的优选方案。

4 稳定性优化策略

4.1 PI控制器参数的工程整定方法

传统上,PI参数的获取可依据工程整定法,例如Ziegler-Nichols法或基于阶跃响应的经验公式法,这些方法通常依赖于系统的近似模型或实验测试数据。在双闭环直流调速系统中,设计流程严格遵循先内环后外环的顺序,即优先整定电流环以保障电流控制的快速性与准确性,随后再设计转速环来实现转速的稳态精度与动态跟踪。具体来说,电流环的PI参数通过将控制对象校正为典型I型系统得出,该结构侧重于提升系统的跟随性能与抗扰能力;而转速环则按照典型II型系统进行设计,并常取中频带宽常数 $h=5$,以在响应速度与稳定性之间取得较好折衷。整定后的参数可在离线状态下通过理论计算或仿真验证确定,然而这种固定参数方法对系统参数变化的适应性较差,当面临负载突变或模型参数摄动时,无法自动调整控制行为,可能导致调速性能恶化甚至出现振荡。因此,传统整定方式虽简单易行,但在动态工况下的鲁棒性有限,需要进一步引入在线调整机制或智能控制策略以增强系统适应性。

4.2 自适应与模糊控制策略

为克服传统定参数PI控制的局限性,自适应控制与模糊控制策略被引入调速系统的稳定性优化。自适应控制可根据系统运行状态的在线辨识结果实时调整调节器参数,使系统在参数变化时仍能保持优良的动态性能。模糊控制则通过专家经验语言规则构建控制决策表,无需精确的数学模型即可实现非线性补偿。

以PWM整流器的电压外环控制为例,模糊控制策略可在0.05秒内实现系统稳定,且功率因数达到0.99,显著提升了系统的抗扰动能力。在直流电机调速系统中,自适应模糊PI控制器同样表现出色,其闭环系统的超调量可控制在3%以内,兼顾了动态特性与静态精度的要求。

4.3 基于智能优化算法的参数整定

随着人工智能技术的快速发展,粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)等群体智能方法被应用于PI控制器的参数自整定。以同步电动机调速系统为例,利用混沌映射构造伪随机序列生成的混沌粒子群算法对PI调节器参数进行优化后,系统的上升时间、调节时间与超调量分别较传统算法降低8.7%、32.5%与48.4%。这一结果表明,群体智能算法能够有效跳出局部最优,在全局范围内寻得可在稳定域内工作的最优参数组合。

改进型遗传算法(IGA)通过优化选择、交叉与变异操作,同样在参数整定中表现出优异性能。研究表明,相较于经验整定与粒子群优化算法,基于IGA的整定策略将系统的调整时间缩短了79.6%,为高精度控制提供了有效解决方案。将此类优化方法移植至直流电力拖动系统可逆调速的PI参数整定

中,具有广阔的工程应用前景。

4.4 系统鲁棒性与抗扰动性能的提升

除参数整定外,提升系统鲁棒性亦是稳定性优化的重要方向。实际运行中,电枢电阻的温度变化、电网电压的波动以及负载转矩的突变均会对调速系统的输出精度造成扰动。构建基于线性矩阵不等式(LMI)的鲁棒控制器,在设计阶段即将参数的不确定性纳入系统模型,可确保系统在参数摄动范围内具备稳定的输出特性。

在直流配电网的电压鲁棒控制中,基于不确定与扰动估计器(UDE)的综合鲁棒控制策略展示了良好的母线电压维持能力,初始阶段的短暂波动后电压迅速稳定在设定值附近。此类鲁棒控制思想的引入,对直流电机可逆调速系统的负载适应性提升具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张永红,孙成星,贾博文,等.逻辑无环流可逆直流调速系统的研究[J].电器工业,2024(11):47-51.
- [2] 林莉,范米,林雨露,等.基于不确定与扰动估计器的直流配电网电压鲁棒控制[J].电工技术学报,2023,38(17):4657-4671.
- [3] 张成,韩存,任巍,等.同步电动机调速系统参数优化研究[J].电气传动,2022,52(20):19-24.
- [4] 栾一航,孙建军,庄凯勋,等.全功率变速抽蓄机组调速系统稳定性分析及参数优化[J].高电压技术,2025,51(4):1599-1608,中插9-中插10.