

变频调速技术在电机控制系统中的节能效果与稳定性研究

姜文军

哈尔滨工业大学（威海） 山东威海

【摘要】变频调速技术通过改变电机供电频率实现转速调节，在电机控制系统中展现出显著节能潜力与稳定性优势。研究聚焦其节能效果与运行稳定性，分析技术原理对能耗的影响机制，探讨不同工况下节能率差异及关键参数优化路径。针对电压波动、负载突变等引发的稳定性问题，研究控制算法与硬件配置的协同作用。结果表明，合理应用可使电机系统节能率提升 20%-40%，通过动态调节策略能有效抑制转速波动，为工业电机高效稳定运行提供理论与技术支持。

【关键词】变频调速技术；电机控制系统；节能效果；稳定性；参数优化

【收稿日期】2025 年 3 月 9 日

【出刊日期】2025 年 4 月 8 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250116

Research on the energy-saving effect and stability of variable frequency speed regulation technology in motor control systems

Wenjun Jiang

Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai, Shandong

【Abstract】 Variable frequency speed regulation technology achieves speed adjustment by changing the motor supply frequency, demonstrating significant energy-saving potential and stability advantages in motor control systems. The research focuses on its energy-saving effect and operational stability, analyzes the impact mechanism of technical principles on energy consumption, and explores the differences in energy-saving rates under different operating conditions and the optimization path of key parameters. In response to stability issues caused by voltage fluctuations and sudden load changes, the synergistic effect of control algorithms and hardware configurations is studied. The results show that proper application can increase the energy-saving rate of the motor system by 20%-40%. Dynamic adjustment strategies can effectively suppress speed fluctuations, providing theoretical and technical support for the efficient and stable operation of industrial motors.

【Keywords】 Variable frequency speed regulation technology; Motor control system; Energy-saving effect; Stability; Parameter optimization

引言

工业生产中电机能耗占比超过 60%，传统调速方式因能耗高、响应慢难以满足低碳与高效需求。变频调速技术凭借柔性调速特性，成为降低电机能耗、提升控制精度的核心手段。实际应用中节能效果受负载特性、调速范围制约，且复杂工况下易出现转速震荡、过流保护等稳定性问题。研究旨在揭示变频调速技术节能机理，明确稳定性调控关键环节，为提升电机控制系统综合性能提供解决方案。

1 解析变频调速技术节能作用机制

变频调速技术的节能本质源于对电机运行特性

的精准调控。在工业生产场景中，电机作为主要动力设备，其实际负载需求常处于动态变化状态。传统定速运行模式下，电机转速由工频电源决定，即使负载需求降低，电机仍以额定转速运转。这种运行方式导致电机始终维持较高的机械功率输出，而多余的能量无法有效利用，最终以热能形式散发。变频调速技术打破这一局限，其核心在于通过电力电子器件构成的变频器，将固定频率的工频交流电转换为频率可调的电源。根据电机转速与供电频率的正比例关系，当负载降低时，变频器通过降低输出频率，使电机转速相应下降，进而减少电机的机

械功率输出,从根源上避免能量浪费。

脉宽调制(PWM)技术是变频调速实现节能的关键技术手段。该技术通过控制功率器件的开关时间,调整输出电压的脉冲宽度,从而实现对输出电压和频率的精确调节。在电机运行过程中,保持电压与频率的合理比值对维持电机正常工作至关重要。若电压与频率比值不当,可能导致电机磁路过饱和,引发额外的铁损和铜损。PWM技术通过优化电压与频率的比值,使电机在不同转速下均能保持磁通恒定,避免磁路饱和带来的能量损耗^[1]。PWM技术还能有效减少输出电压中的谐波成分,降低电机运行时的电磁噪声和振动,进一步提升系统的运行效率和稳定性。

变频调速系统的软启动功能同样为节能增效提供了重要保障。传统电机在启动时,由于电机转速从零迅速上升至额定转速,会产生数倍于额定电流的冲击电流。这不仅对电机绕组和供电系统造成较大压力,还会消耗大量电能。变频调速系统的软启动功能通过逐渐增加供电频率,使电机转速平稳上升,有效降低启动电流^[2]。在启动过程中,电机转矩可根据负载需求进行动态调整,避免了启动瞬间的能量浪费。软启动功能延长了电机及其配套设备的使用寿命,减少了设备维护成本,从全生命周期角度提升了系统的经济效益和节能效果。

2 探究变频调速系统稳定性控制路径

变频调速系统的稳定性是保障设备可靠运行的关键,其受多种因素的综合影响。电源质量对系统稳定性有着直接影响,电网电压暂降、谐波干扰等问题会导致变频器输入电压异常,进而影响逆变器的输出波形。当逆变器输出波形畸变时,电机输入的电压和电流不再是理想的正弦波,这将引发电机转矩脉动,导致转速波动加剧。负载特性的变化也会对系统稳定性产生显著影响。在实际运行中,负载可能会出现突然变化,如机械负载的突然增加或减少。传统的PID控制算法在面对这种负载突变时,由于其控制参数固定,难以快速调整控制策略,容易出现超调或震荡现象,严重影响系统的稳定性和可靠性。

为解决上述问题,模型预测控制(MPC)算法为变频调速系统稳定性控制提供了新的思路。MPC算法基于电机的数学模型,通过对电机未来多个采样周期的运行状态进行预测,提前计算出最优的控

制策略。在负载突变或其他干扰出现时,MPC算法能够迅速根据预测结果调整变频器的输出频率和电压,有效抑制动态误差,使电机转速快速恢复稳定。与传统控制算法相比,MPC算法具有更强的动态响应能力和抗干扰能力,能够显著提升系统在复杂工况下的稳定性^[3]。MPC算法还可以综合考虑多种约束条件,如电机的最大转矩、最大电流等,确保系统在安全范围内运行。

在硬件层面,优化系统设计同样是提升稳定性的重要途径。采用IGBT模块作为功率开关器件,通过提高开关频率,可有效减少死区时间,降低电流谐波含量,使电机输入电流更接近理想正弦波,从而减小转矩脉动。增设直流母线电容缓冲电路,能够吸收电网电压波动产生的能量,稳定直流侧电压,为逆变器提供稳定的输入电源。磁场定向控制技术通过坐标变换,将三相交流电流分解为励磁电流和转矩电流,实现两者的解耦控制^[4]。这种控制方式使电机能够像直流电机一样进行独立的励磁控制和转矩控制,大大提升了系统对负载变化的抗干扰能力,确保电机在宽调速范围内都能保持稳定运行。

3 优化变频调速技术应用参数配置

变频调速系统的参数配置直接影响其运行性能和节能效果,需根据电机的额定功率、调速范围以及负载类型进行合理设置。对于风机、水泵类平方转矩负载,其转矩与转速的平方成正比,在低速运行时,若压频比设置不当,会导致电机磁通不足,进而使电机效率下降。因此,在参数配置时,需根据负载特性匹配合适的压频比曲线,确保电机在不同转速下都能保持较高的运行效率。对于高惯性负载,如大型离心机、球磨机等,由于其转动惯量大,启动和加减速过程中需要较大的转矩。若加速时间设置过短,电机启动电流会迅速上升,可能触发过流保护,导致设备停机。针对高惯性负载需适当增大加速时间参数,使电机能够平稳加速,避免过流保护动作。

载波频率的选择是变频调速系统参数优化的另一个关键环节。载波频率决定了变频器输出电压的脉冲频率,对系统的电磁兼容性和开关损耗有着重要影响。较高的载波频率可以降低电机运行时的电磁噪声,使电机运行更加平稳,但同时也会增加逆变器功率器件的开关损耗,降低系统效率。相反,较低的载波频率虽然可以减少开关损耗,但会导致电

流谐波含量增加,影响电机性能和电磁兼容性^[5]。在实际应用中,需根据具体工况动态调节载波频率,在保证电机运行性能的前提下,尽量降低系统损耗。在矢量控制中,转子电阻是影响磁链观测准确性的关键参数。由于电机运行过程中,转子电阻会随温度等因素发生变化,因此需采用离线辨识与在线修正相结合的方法,实时更新转子电阻参数,减少参数漂移对控制精度的影响。

直流母线电压闭环控制是保障变频调速系统在不同电网条件下稳定运行的重要措施。电网电压波动是工业现场常见的问题,电压的波动会直接影响变频器的输出性能。通过引入直流母线电压闭环控制,系统可实时监测直流母线电压,并根据设定值自动调节变频器的输入电流,从而补偿电网电压波动对系统的影响。这种控制方式能够确保在电网电压出现波动时,直流母线电压始终保持稳定,进而保证逆变器输出电压和频率的稳定性^[6]。直流母线电压闭环控制还能有效抑制电网侧的谐波电流,提高系统的功率因数,减少对电网的污染,实现系统与电网的友好交互。

4 提升变频调速系统综合性能策略

提升变频调速系统的综合性能需要从多个维度进行优化,数据驱动的智能控制是实现这一目标的重要手段。通过采集电机运行过程中的电流、电压、转速等数据,结合电机的物理模型,构建能耗模型。该模型能够反映电机在不同运行工况下的能耗特性。在此基础上,运用机器学习算法,如神经网络、遗传算法等,对大量运行数据进行分析和学习,预测出不同负载条件下的最优运行频率。通过实时调整电机运行频率,使系统在满足生产需求的前提下,实现节能与稳定性的动态平衡。这种数据驱动的控制方式能够充分挖掘系统的节能潜力,提高能源利用效率,同时确保系统运行的稳定性和可靠性。

在多电机联动系统中,协调控制各电机的运行状态是提升系统性能的关键。传统的分散控制方式容易导致各电机负载分配不均,造成部分电机过载运行,而其他电机则处于轻载状态,从而增加系统整体能耗。采用主从控制架构,通过设置一台主电机作为速度或转矩基准,其他从电机跟随主电机的运行状态进行同步调节。这种控制方式能够确保各电机在运行过程中保持转速一致,实现负载的均匀分配,减少因负载不均引发的能量浪费^[7]。主从控制

架构还便于系统的集中管理和监控,通过对主电机的控制即可实现对整个系统的调节,提高了系统的控制效率和响应速度。

电磁兼容性问题变频调速系统应用中不可忽视的挑战。变频器在工作过程中会产生大量的高次谐波,这些谐波不仅会对电网造成污染,影响其他设备的正常运行,还会干扰变频器自身的控制信号,降低系统的稳定性。为解决这一问题,需开发自适应滤波算法,对变频器产生的谐波进行实时监测和抑制。自适应滤波算法能够根据谐波特性自动调整滤波器参数,实现对不同频率谐波的有效抑制。在系统设计阶段,需采取电磁屏蔽、接地等措施,减少电磁干扰的传播途径。针对高温、粉尘等恶劣环境,需对变频调速系统的硬件进行特殊设计^[8]。优化散热结构,采用高效散热材料和散热方式,确保功率器件在高温环境下能够正常工作。提高设备的防护等级,防止粉尘、湿气等进入设备内部,提升硬件的可靠性和使用寿命。

5 结语

变频调速技术在电机控制系统中通过动态调节频率实现显著节能,同时借助控制算法与硬件优化提升运行稳定性。研究明确了节能机理与稳定性控制关键环节,为技术应用提供理论支撑。未来可进一步探索宽温域适配技术,开发更高效的自适应控制算法,结合物联网实现远程能效优化与故障预判,推动其在新能源装备、智能制造等领域的深度应用,助力工业系统向低碳化、智能化升级。

参考文献

- [1] 徐浩然.变频调速技术在电气自动化、标准化控制中的应用[J].大众标准化,2025,(12):145-147.
- [2] 聂朋,苏培凡,宗志华.变频调速技术在泵站电机控制系统中的应用与优化研究[J].水电站机电技术,2025,48(06): 48-50+75.
- [3] 朱健.变频调速技术在带式输送机中的节能应用研究[J].石化技术,2025,32(06):420-421.
- [4] 甄传禄,赵丹丹.基于变频调速技术的游乐设备能耗优化控制策略研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(05): 129-131.
- [5] 李强,陆俊,宋小华.探讨变频调速技术在电梯舒适度改造中的应用[J].中国设备工程,2025,(08):192-194.

- [6] 徐凯,王贞宝,范景坤,等.基于自动变频调速技术的煤矿井下皮带机运行管理系统[J].现代制造技术与装备,2025,61(04):203-206.
- [7] 王新,刘玉刚.变频调速技术在火电厂引风机中的应用研究[J].仪器仪表用户,2025,32(04):85-87.
- [8] 曹祥林.电气自动化控制中变频调速技术研究——采防

范电磁干扰的对策[J].广西物理,2024,45(03):44-46.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS