

Research on frequency converter application technology in electrical transmission automatic control

Ruipeng Li

China Power Investment Corporation Shanxi Lvliang Mining Co., Ltd., Lvliang, Shanxi, 033600, China

Abstract

In the context of accelerating industrial automation, the performance improvement of electrical drive automatic control systems, as a core technological support for industrial production, is of significant strategic importance for promoting industrial upgrading and achieving sustainable development. Frequency converters, leveraging the deep integration of power electronics and intelligent control technologies, have become a key driver of innovation in the electrical drive field. This paper systematically expounds on the core working principles of frequency converters based on theories of power electronic conversion, motor control, and system optimization methods. It delves into technical approaches related to energy conservation, system performance optimization, and provides an in-depth analysis of application scenarios such as speed control, load adaptation, and power quality improvement. The aim is to provide theoretical foundations and methodological guidance for technological innovation and engineering practice in electrical drive systems, thereby facilitating the advancement of industrial automation towards smarter and more efficient directions.

Keywords

frequency converter; electrical transmission automatic control; energy saving and consumption reduction

电气传动自动控制中变频器应用技术研究

李瑞鹏

中电投山西吕梁矿业有限公司, 中国·山西 吕梁 033600

摘要

在工业自动化进程加速推进的时代背景下, 电气传动自动控制系统作为工业生产的核心技术支撑, 其性能提升对推动产业升级、实现可持续发展具有重要战略意义。变频器凭借电力电子与智能控制技术的深度融合, 成为电气传动领域革新的关键驱动。本文基于电力电子变换理论、电机控制理论及系统优化方法, 系统阐述变频器核心工作机理, 深入探讨其在节能降耗、系统性能优化等方面的技术路径, 并对调速控制、负载适配及电能质量改善等应用场景进行深度剖析。旨在为电气传动系统的技术创新与工程实践提供理论依据与方法指导, 助力工业自动化向智能化、高效化方向发展。

关键词

变频器; 电气传动自动控制; 节能降耗

1 引言

随着工业 4.0 与智能制造战略的深入实施, 电气传动自动控制系统正朝着高精度、高效率、智能化方向发展。在能源危机与“双碳”目标的双重驱动下, 如何实现工业电机系统的节能增效已成为全球工业领域关注的焦点。变频器作为工业电机系统的核心控制设备, 通过对电机运行参数的精准调控, 可有效提升系统能效、优化运行性能。近年来, 电力电子器件性能的提升、先进控制算法的涌现以及物联网技术的融合应用, 为变频器技术的发展注入新的活力。深入研究变频器在电气传动自动控制中的应用技术, 对推动工业生产模式变革、实现绿色低碳发展具有重要的现实意义。

【作者简介】李瑞鹏(1990-), 男, 中国山西忻州人, 本科, 助理工程师, 从事变频器应用及故障处理研究。

2 变频器应用技术

2.1 变频器的核心工作机理

变频器的运行原理根植于电力电子变换与电机控制理论(见图 1)。其核心架构由整流电路、直流环节及逆变电路组成, 通过功率半导体器件的高频开关动作实现电能形式的转换与调控。在整流阶段, 三相桥式整流电路将工频交流电转换为脉动直流电, 该过程涉及二极管或 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)的单向导电特性, 实现电能的整流与升压。直流环节通常采用电容滤波或电感储能方式, 稳定直流母线电压, 为后续逆变提供稳定的能量输入^[1]。逆变过程是变频器实现变频控制的关键, 基于空间矢量脉宽调制(SVPWM)或直接转矩控制(DTC)等调制策略, 通过控制 IGBT 的开通与关断时序, 将直流电逆变为频率、幅值可调的三相交流电, 为电机提供适配的驱动电源。

从控制理论角度，变频器通过构建电机数学模型实现对转速、转矩的精确控制。基于派克变换与克拉克变换的矢量控制技术，将三相交流电机的定子电流分解为励磁电流与转矩电流，实现磁链与转矩的解耦控制，使交流电机获得与直流电机媲美的动态性能。直接转矩控制技术则摒弃复杂的坐标变换，通过直接控制定子磁链和电磁转矩，简化控制结构，提高系统响应速度。随着模型预测控制（MPC）、自适应控制等先进算法的引入，变频器的控制精度与鲁棒性得到进一步提升，能够有效应对复杂工况下的电机控制需求。

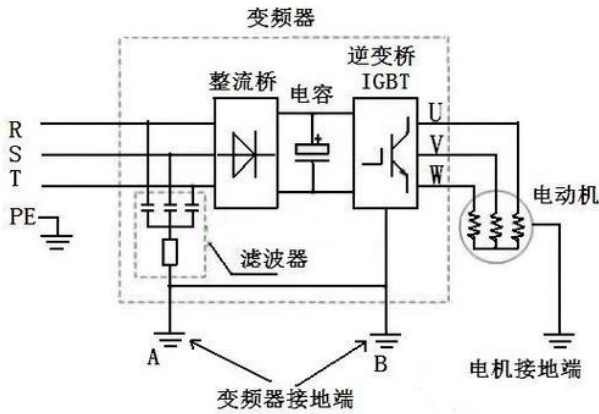


图 1：变频器原理图

2.2 变频器的节能与系统优化策略

变频器的节能特性源于其对电机运行状态的动态优化。根据电机运行的负载特性曲线，当负载率低于额定值时，传统定速运行的电机存在明显的“大马拉小车”现象，导致能量浪费。变频器通过实时监测负载转矩，动态调整电机转速与电压，使电机运行在高效区间。以风机、泵类负载为例，依据相似定律，电机转速降低时，其轴功率与转速的三次方成正比。通过变频调速，可使此类负载在部分负荷工况下显著降低能耗。此外，变频器的软启动功能通过斜坡升压方式限制启动电流，避免传统直接启动时的浪涌冲击，不仅降低启动能耗，还延长电机及传动系统的使用寿命。

在系统优化层面，变频器通过多维度的控制策略提升电气传动系统性能。在动态响应优化方面，采用基于滑模变结构控制或模糊控制的复合控制策略，可有效抑制系统超

调，缩短过渡过程时间。在稳态精度提升方面，引入自适应参数辨识算法，实时修正电机模型参数，降低因参数变化导致的控制误差^[2]。此外，通过变频器的协同控制功能，可实现多电机系统的同步运行与负荷均衡分配，提高生产系统的整体效率。例如，在连续生产线中，通过主从控制或交叉耦合控制策略，可确保各传动单元之间的速度同步与张力稳定，提升产品质量与生产效率。

2.3 变频器的重要地位与价值彰显

变频器作为电气传动自动控制系统核心组件，在工业生产中发挥着不可替代的作用。从能源利用角度，据国际能源署（IEA）统计，全球工业电机系统消耗的电能占总用电量的 45% 以上，而变频器的应用可使电机系统节能 10%~30%，在“双碳”目标背景下，其节能价值尤为显著。从生产工艺角度，变频器的高精度调速与动态响应特性，为高端制造领域提供了技术保障。例如在数控机床领域，通过变频器对主轴电机的精确控制，可实现微米级的加工精度。在纺织机械领域，变频器对多电机的协同控制确保了织物张力的稳定，提升产品品质。随着工业自动化技术的发展，变频器的功能已从单一的调速控制向智能化、网络化方向拓展。集成物联网技术的变频器可实现设备状态实时监测、故障预警与远程诊断，提升设备运维效率。融合人工智能算法的变频器能够根据生产数据自动优化控制参数，实现自适应运行。这些技术创新不仅提升了变频器的应用价值，也为电气传动系统的智能化升级奠定了基础。

3 变频器在电气传动自动控制中的应用

3.1 精准调速控制技术与实践

在电气传动系统中，变频器的调速控制技术直接影响生产工艺的稳定性与产品质量^[3]。矢量控制技术通过对电机磁场定向控制，实现转速与转矩的高精度调节，广泛应用于对动态性能要求较高的场合。例如在电梯传动系统中，基于矢量控制的变频器可实现 0.1m/s² 以下的加速度控制，确保电梯启停平稳，提升乘客舒适度。直接转矩控制技术凭借其快速的动态响应能力，在轧钢机、起重机等重载设备中发挥重要作用，可在负载突变时快速调整电机转矩，避免系统失速或过载（见表 1）。

表 1：不同控制技术性能对比表

控制技术	精度	响应速度	适用性
矢量控制	高	较快	较高
直接转矩控制	较高	快	中等
模型预测控制	极高	快	高

对动态性能和控制精度要求高的场合，如数控机床
需要快速动态响应的重载设备，如轧钢机
对于干扰抑制和参数不确定性要求高的系统，如电动汽车电驱动

近年来，模型预测控制（MPC）在变频器调速控制中的应用成为研究热点。MPC 算法通过建立系统预测模型，对未来多个采样周期的控制变量进行优化计算，可有效抑制系统干扰与参数不确定性。在电动汽车电驱动系统中，基于 MPC 的变频器能够根据路况与驾驶意图实时调整电机输出，提高能源利用效率与续航里程。

3.2 负载优化与系统适应性提升

针对不同类型的负载特性，变频器采用差异化的控制策略实现系统性能优化。对于恒转矩负载，如传送带、搅拌机，变频器需在低频段提供足够的启动转矩。通过采用低频转矩补偿技术，可提升电机在低速运行时的输出能力，确保设备顺利启动。同时，通过电流闭环控制与过载保护策略，

可有效防止电机因长时间过载导致的过热损坏。

在变转矩负载应用中，变频器结合负载特性曲线进行动态控制。以离心式风机为例，通过实时监测风量需求，采用 PID 闭环控制调节电机转速，使风机运行在高效区间。再者，引入智能控制算法如神经网络控制或专家系统，可根据历史运行数据预测负载变化趋势，提前调整变频器输出，进一步提升系统响应速度与节能效果^[4]。

3.3 节能与电能质量综合优化

变频器在节能与电能质量改善方面的协同作用，是提升电气传动系统性能的关键。在节能方面，除调速节能外，能量回馈技术的应用进一步拓展了变频器的节能潜力。在电梯、提升机等位能性负载应用中，当电机处于制动状态时，变频器可将电机产生的再生电能回馈至电网，实现能量的循环利用。这种能量回馈系统通常采用有源逆变技术，通过控制 IGBT 的开关频率与相位，将直流电逆变为与电网同频同相的交流电，提高系统整体能效。

在电能质量改善方面，变频器通过谐波抑制与无功补偿技术提升电网稳定性。传统变频器因采用 PWM 调制方式，会产生大量谐波电流注入电网。为解决这一问题，采用多电平拓扑结构或增加输出滤波器，可有效降低谐波含量。同时，通过引入静止无功发生器（SVG）或功率因数校正（PFC）电路，可实时补偿系统无功功率，提高电网功率因数，减少线路损耗。在大型工业园区中，通过集中配置变频器与电能

质量治理装置，可实现对电网谐波与无功的综合治理，保障电网安全稳定运行。

4 结论

变频器作为电气传动自动控制系统的核心技术装备，其应用技术的发展深刻影响着工业生产的效率与质量。本文通过对变频器工作机理、节能优化策略及应用实践的深入研究，揭示了其在工业自动化进程中的关键作用。随着电力电子技术、智能控制算法及物联网技术的不断创新，变频器将向更高功率密度、更精准控制、更智能化方向发展。未来，变频器在新能源、智能制造等新兴领域的应用将不断拓展，其与数字孪生、边缘计算等技术的融合，将为电气传动系统的智能化升级提供新的技术路径。深入开展变频器应用技术研究，对推动工业自动化高质量发展、实现“双碳”目标具有重要的理论意义与实践价值。

参考文献

- [1] 申鹏晨. 电气传动自动控制中变频器应用技术探析[J]. 模具制造, 2024, 24(4): 222-224
- [2] 闻娜, 刘成伟, 张晓阳, 高健, 麻丽明. 智能电网中自动化控制与储能技术的协同应用研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 219-221
- [3] 孟存. 电气仪表自动化控制中 PLC 技术的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 工程技术, 2025(1): 100-103
- [4] 吕起荣. 电气传动自动控制中变频器应用技术探析[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 工程技术, 2024(11): 216-219