

Application and Development of Power Electronics Technology in Motor Drive Systems

Beilin Zhang

School of Automation, Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China

Abstract

Motor drive systems are core equipment in industrial automation and transportation electrification, and their energy efficiency is crucial for achieving the “dual carbon” goals. This paper, focusing on the development of power electronics technology, reviews its application and development in motor drive systems from three aspects: power devices, main circuit topologies, and modulation and control strategies. It analyzes the technical limitations of silicon-based IGBTs and the performance advantages of SiC/GaN wide bandgap devices, elaborates on the engineering applications of two-level, multi-level, and matrix converters, and introduces the technical characteristics of SVPWM and model predictive control. Combined with scenarios such as industrial robots, electric vehicles, and lifting equipment, it proposes optimization methods such as the integration of wide bandgap devices and intelligent control, variable switching frequency, electrolytic capacitor-free, and digital twin. The research shows that the integration of related technologies can increase the efficiency of drive systems by 5% to 15% and double the power density, providing theoretical basis and technical support for the design of high-performance motor drive systems.

Keywords

Power electronics technology; Motor drive; Power converter; Wide bandgap semiconductor; Pulse width modulation

电力电子技术在电机驱动系统中的应用与发展

张蓓琳

中南大学自动化学院, 中国·湖南长沙 410083

摘要

电机驱动系统是工业自动化与交通电气化的核心装备, 其能效水平对实现“双碳”目标至关重要。针对传统电机驱动系统开关损耗大、谐波污染严重、功率密度偏低等问题, 本文以电力电子技术发展为主线, 从功率器件、主电路拓扑、调制与控制策略三个层面, 综述其在电机驱动系统中的应用与发展。分析了硅基 IGBT 的技术局限及 SiC/GaN 宽禁带器件的性能优势, 阐述了两电平、多电平及矩阵变换器的工程应用, 介绍了 SVPWM 与模型预测控制的技术特点。结合工业机器人、电动汽车、起重装备等场景, 提出宽禁带器件与智能控制结合、变开关频率、无电解电容及数字孪生等优化方法。研究表明, 相关技术融合可使驱动系统效率提升 5%-15%, 功率密度提高 2 倍以上, 为高性能电机驱动系统设计提供理论依据与技术支持。

关键词

电力电子技术; 电机驱动; 功率变换器; 宽禁带半导体; 脉宽调制

1 引言

电机驱动系统是工业机器人、电动汽车等高端装备的动力核心, 其能效直接影响工业节能与“双碳”目标实现。电力电子技术承担电能变换与调控的关键角色。传统直流调速采用晶闸管方案, 存在功率因数低、谐波大等缺陷。全控型器件 (IGBT) 成熟后, PWM 技术推动交流变频普及, 但在高速高精度场景下, 硅基器件仍面临开关损耗大、功率密度受限等挑战。以碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 为代表的宽禁带半导体具有高耐压、低损耗、高开关频率的优势, 结合模型预测控制等智能算法, 为驱动系统性能跃升提供了

新路径。本文系统梳理电力电子技术在电机驱动中的应用现状与发展脉络, 为工程实践提供参考。

2 电机驱动系统架构与性能需求分析

电机驱动系统是工业自动化与交通电气化装备的核心执行单元, 其能效、控制精度与可靠性直接决定整机性能。电力电子技术负责电能变换与功率调控, 是实现电机调速、精准控制与能量回馈的关键。典型驱动系统由功率主电路、控制电路、检测保护电路和电机本体组成, 电力电子变换器将工频电能转换为幅值、频率可调的交流电, 为电机提供驱动电源。

工程中, 三相异步电机驱动多采用“不控整流 + 直流滤波 + 电压源逆变器”结构, 是工业变频器主流方案; 对电梯、起重机等需四象限运行与能量回馈的设备, 则采用双

【作者简介】张蓓琳 (2005-), 女, 本科, 中国山西运城人。

向背靠背拓扑，实现再生能量回收。

实际应用对电力电子环节提出四项核心要求：一是高效率低损耗，需降低导通与开关损耗；二是高功率密度，适应车载、航空等狭小空间；三是优良输出波形，抑制谐波以减少电机损耗与绝缘老化；四是高可靠性，应对高温、振动、电磁干扰等恶劣工况。

各类性能指标相互制约，提升开关频率可改善波形但增加损耗，增加滤波环节可抑制谐波但降低功率密度。电力电子技术的优化本质是在效率、功率密度、波形质量与可靠性之间实现平衡，以满足复杂装备的应用需求。

3 电力电子关键技术及其在电机驱动中的应用

功率半导体器件是电力电子变换器的核心基础，其性能直接决定电机驱动系统的效率、功率密度与运行上限。电机驱动技术的发展，伴随功率器件从半控型到全控型、从硅基材料向宽禁带材料的迭代升级。

硅基 IGBT 凭借输入阻抗高、通态压降低、驱动简单等优势，长期作为中高压、中大功率电机驱动的主流器件。但受硅材料物理特性限制，其禁带宽度与击穿场强较低，高压下导通电阻大，且关断拖尾电流明显，难以在高频工况下保持高效率。

以 SiC、GaN 为代表的宽禁带半导体具有禁带宽、击穿场强高、开关损耗低等突出优势，可显著突破硅基器件瓶颈。在 650V 电压等级下，SiC MOSFET 开关损耗较 IGBT 降低 70% 以上，GaN 器件无反向恢复损耗，更适合低压高频场景。采用宽禁带器件后，驱动系统开关频率可由 8-10kHz 提升至 50-100kHz，电流纹波与电机噪声减小，无源元件体积大幅缩小，功率密度显著提升。

表 1 对比了三类器件的关键性能，宽禁带器件已成为高性能电机驱动系统的核心选择，推动系统向高效、高频、高功率密度方向发展。

表 1 不同功率器件在电机驱动系统中的性能对比

性能指标	硅 IGBT	SiC MOSFET	GaN HEMT
禁带宽度 (eV)	1.12	3.26	3.39
导通电阻 (相对值)	1.0	0.3-0.5	0.2-0.4
开关损耗 (相对值)	1.0	0.2-0.3	0.1-0.2
适用开关频率 (kHz)	5-20	20-100	50-500
最高工作结温 (°C)	150-175	175-225	150-200
功率密度提升潜力	基线	2-3 倍	3-5 倍

3.1 主电路拓扑结构的优化：从两电平到多电平

功率变换器拓扑直接决定电机驱动系统的电能变换效率、输出波形质量与适用功率范围。两电平电压源型逆变器结构简单、控制成熟，是中小功率工业变频驱动的主流方案，但在高压大功率工况下存在电压跳变 (dv/dt) 大、谐波含量高、电机绝缘应力大等问题，难以满足高端装备需求。

多电平拓扑可有效改善上述缺陷，其中二极管钳位型 (NPC) 三电平逆变器应用最为广泛。该拓扑每相可输出三

个电平，电压跳变幅度仅为两电平的一半，显著降低 dv/dt 应力与谐波畸变率，减小对电机与电网的冲击。同时，三电平结构可使用更低耐压等级的功率器件，器件电压应力均衡，散热条件更优，系统可靠性与使用寿命显著提升，在矿井提升机、船舶推进、轨道交通等中大功率场景中已成为标准配置。

矩阵变换器为直接交-交变换拓扑，省去直流母线电解电容，具备能量双向流动、输入电流正弦、功率因数可调等优势，系统可靠性更高。但该拓扑存在电压传输比低、换流控制复杂、工程实现难度大等问题，目前主要应用于航空电源、精密伺服等对体积与可靠性要求严苛的特定场景。

3.2 先进调制与控制策略：从 SVPWM 到模型预测控制

调制与控制策略是提升电机驱动系统运行精度、动态性能与能效水平的核心。空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 是当前应用最广泛的调制技术，将逆变器与电机作为统一整体，以定子磁链轨迹为控制目标，具有直流母线电压利用率高、输出谐波小、易于数字化实现等优势，可有效提升系统运行平稳性与能量利用率。

模型预测控制 (MPC) 是适配高性能驱动的新一代智能控制策略。有限集模型预测控制 (FCSMPC) 基于系统离散预测模型，在每个控制周期内遍历逆变器所有可行开关状态，滚动优化并选择最优开关状态直接驱动器件，无需单独设置 PWM 调制器。该方法可同时处理电流跟踪、开关频率抑制、共模电压降低等多目标约束，动态响应速度远优于传统 PI 控制，可将电流谐波畸变率降低 30% 以上，动态响应时间缩短至传统方法的 1/3。

尽管 MPC 存在计算量大、权重参数整定复杂等问题，但随着 DSP 与 FPGA 硬件性能提升，已逐步实现工程化应用。在高性能伺服、电动汽车牵引、高精度主轴驱动等场景中，MPC 正快速普及，推动电机驱动控制由传统线性调节向多目标智能优化方向升级。

4 电力电子技术在电机驱动中的典型应用与设计策略

4.1 工业机器人伺服驱动

工业机器人对伺服驱动系统提出了极高的动态响应和定位精度要求。传统工业机器人伺服驱动器多采用硅基 IGBT，开关频率通常限制在 8-16 kHz，导致电流纹波较大，进而产生转矩脉动和运行噪声。引入 GaN HEMT 后，开关频率可提升至 100 kHz 以上，电流环带宽从 1-2 kHz 扩展到 5-10 kHz，显著改善了机器人的轨迹跟踪精度和低速平稳性。同时，高频化使得直流母线电容和输出滤波电感的体积大幅减小，可将驱动器的功率密度从传统 20-30 kW/L 提升至 60-80 kW/L，有利于实现机器人关节的集成化设计。

4.2 电动汽车牵引驱动

电动汽车的续航里程是用户关注的核心指标，而牵引

驱动系统的效率直接影响整车的能耗表现。在电动汽车的主驱逆变器中，SiC MOSFET 正在逐步取代硅 IGBT。以特斯拉 Model 3 为例，其主驱逆变器采用了 24 个 SiC MOSFET 模块，相比 Model X 的硅 IGBT 方案，逆变器损耗降低了约 60%，整车续航提升了约 6%。此外，SiC 器件的高温工作能力（结温可达 200℃以上）简化了冷却系统设计，可采用更小的散热器甚至自然冷却，进一步降低了系统体积和重量。目前，800V 高压平台逐渐成为电动汽车的主流架构，SiC 器件凭借其在高电压下的低开关损耗优势，已成为该平台的核心选择。

4.3 电梯与起重装备

电梯、起重机等装备在制动过程中会产生再生能量，传统方案通过制动电阻将能量以热能形式消耗，造成严重浪费。采用 PWM 整流器构成的双向“背靠背”拓扑，可以将再生能量回馈至电网，实现节能效果。该方案对功率器件的开关频率和反向恢复特性提出了更高要求——SiC MOSFET 的体二极管反向恢复损耗极低，非常适合此类频繁起制动的应用场景。实际工程数据显示，采用 SiC 基双向变换器的电梯驱动系统，相比传统电阻制动方案可节能 25%-35%，同时减少了制动电阻的发热和体积占用。

5 电机驱动系统能效优化的协同策略与智能化趋势

5.1 变开关频率与无电解电容的协同节能

传统变频器通常采用固定开关频率，导致轻载工况下开关损耗占比过高。变开关频率策略根据负载转矩与转速实时调节开关频率：重载时保持较高频率以保障波形质量，轻载时主动降频削减损耗。实测表明，在工业机器人典型工作循环中，该策略可使逆变器总损耗降低 20%-30%。

与此同时，直流母线电解电容是变频器寿命最短的元件之一。无电解电容技术通过大幅减小母线容值（从数千 μF 降至数十 μF ），改用薄膜电容或陶瓷电容替代，并结合电机绕组电感缓冲功率波动。该方案可显著延长系统寿命、提高功率因数，但需配合强鲁棒性控制算法以应对母线电压波动。将变开关频率与无电解电容设计联合实施，能够兼顾轻载节能与高可靠性，形成“硬件精简-软件补偿”的协同增效机制。

5.2 宽禁带器件与智能控制的深度集成

SiC/GaN 器件的高频化优势为控制算法升级创造了条件。模型预测控制（MPC）无需传统 PWM 调制器，可直接

优化开关状态，与高频器件配合可将电流总谐波畸变率降低 30% 以上，动态响应时间缩短至 PI 控制的 1/3。此外，基于机器学习的故障诊断技术通过提取电流、电压波形特征，可在数个周期内识别 IGBT 开路等典型故障，触发容错控制或停机保护。将 MPC 与故障诊断算法嵌入宽禁带驱动器中，使系统具备自感知、自决策能力，是实现“高效能+高可靠”双目标的关键路径。

5.3 数字孪生驱动的全生命周期管理

数字孪生技术通过构建电磁-热-机械多物理场虚拟镜像，实时映射功率器件的结温、电流、电压等运行数据。基于该模型可在线预测器件剩余寿命、识别异常热累积，并动态调整开关频率或调制策略以规避过热风险。目前，该技术已在风电变流器和轨道交通牵引系统中进入试点应用，初步实现了从被动维修向预测性维护的转变。未来，数字孪生将与边缘计算深度融合，推动电机驱动系统向自优化、自愈合的智能化方向演进。

6 结语

本文系统梳理了电力电子技术在电机驱动系统中的应用现状与发展趋势。研究表明，以 SiC、GaN 为代表的宽禁带器件可显著降低开关损耗、提升开关频率与功率密度；多电平拓扑能有效抑制 dv/dt 和谐波，与宽禁带器件结合可兼顾性能与成本；模型预测控制动态响应快、谐波抑制能力强，优于传统 PI 控制。在典型应用中，宽禁带器件与智能算法协同可显著提升伺服、车载、起重等系统的能效与可靠性。变开关频率、无电解电容与数字孪生等系统级策略，可进一步实现节能降耗与智能运维。未来，电力电子技术将向高频化、集成化、智能化方向发展，为高效节能电机驱动系统提供核心支撑。

参考文献

- [1] 刘宇龙,陈垒,谢小荣.新型电力系统宽频振荡分析与控制技术研究进展与展望[J/OL].电力自动化设备,1-16[2026-04-14].
- [2] 丁大尉,王高林,张国强,等.三相供电交流电机驱动系统无电解电容控制技术综述[J].电气工程学报,2021,16(04):2-11.
- [3] 苏勇.电力电子技术在电机控制中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(11):127-129.
- [4] 侯克渐.电力电子变换器在永磁同步电机驱动系统中的集成控制与优化研究[J].中国设备工程,2025,(20):249-251.
- [5] 邵佳威,蒋全.三相电机驱动系统相电流检测技术的现状以及未来发展趋势[J].电子测量技术,2020,43(06):134-142.