

Application of new power electronic devices in efficient motor drive system

Kaiguang Sui

General Power Plant Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

Abstract

In the face of escalating global energy crises and growing environmental concerns, improving energy efficiency has become a focal point of attention across various sectors. Motors, widely used in industrial and daily life as power equipment, have a significant proportion of energy consumption in their drive systems. Therefore, developing efficient motor drive systems is urgent and has become a hot research direction in both scientific and industrial circles. New power electronic devices, such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) devices, exhibit superior performance due to their wide bandgap characteristics, including high power density, low on-state resistance, and fast switching speed. In efficient motor drive systems, these new devices play an indispensable role in key aspects like speed control and power factor correction. This paper delves into the application of new power electronic devices in efficient motor drive systems, detailing their working principles, significant advantages, and the challenges they face in practical applications. It aims to lay a solid theoretical foundation for further development of efficient motor drive systems and support the industry's transition towards more efficient and energy-saving practices.

Keywords

new power electronic devices; efficient motor drive system; application

新型电力电子器件在高效电机驱动系统中的应用

隋凯光

通辽发电总厂有限责任公司, 中国·内蒙古 通辽 028000

摘 要

在全球能源危机持续加剧、环保诉求愈发高涨的当下, 能源利用效率的提升已成为各界关注的焦点。电机作为工业及日常生活中广泛应用的动力设备, 其驱动系统的能耗占比不容小觑, 因此, 研发高效电机驱动系统迫在眉睫, 已然成为科研与产业界的热门研究方向。新型电力电子器件, 诸如碳化硅 (SiC) 与氮化镓 (GaN) 器件, 凭借宽禁带特性展现出高功率密度、低导通电阻以及快开关速度等卓越性能。在高效电机驱动系统里, 这些新型器件于调速控制、功率因数校正等关键环节发挥着不可或缺的作用。本文深入剖析新型电力电子器件在高效电机驱动系统中的应用, 详细阐释其工作原理、显著优势以及实际应用面临的挑战, 期望能为高效电机驱动系统的进一步发展筑牢理论根基, 助力产业迈向高效、节能的新征程。

关键词

新型电力电子器件; 高效电机驱动系统; 应用

1 引言

电机作为工业领域中应用最为广泛的动力设备之一, 其能耗占据了全球总能耗的相当大比例。在能源危机和环保要求日益严苛的背景下, 提高电机驱动系统的效率成为降低能源消耗、减少环境污染的重要途径。高效电机驱动系统不仅能够降低运行成本, 还符合可持续发展的战略目标。电力电子器件作为电机驱动系统的核心组成部分, 其性能的优劣直接影响着电机驱动系统的整体性能。传统电力电子器件在功率密度、开关速度、导通损耗等方面存在一定的局限性,

难以满足高效电机驱动系统不断增长的需求。新型电力电子器件的出现, 为解决这些问题提供了可能。新型电力电子器件基于新的材料和制造工艺, 具有高功率密度、低导通电阻、快开关速度等优点, 能够显著提高电机驱动系统的效率和性能。因此, 研究新型电力电子器件在高效电机驱动系统中的应用具有重要的现实意义。

2 新型电力电子器件概述

2.1 碳化硅 (SiC) 器件

碳化硅作为一种极具潜力的宽禁带半导体材料, 拥有一系列令人瞩目的物理特性。与传统硅材料相比, 其禁带宽度约为硅的 3 倍, 这一显著差异赋予了 SiC 器件承受更高电压的能力。在实际应用中, 例如在高压电力传输和工

【作者简介】隋凯光 (2000-), 男, 蒙古族, 中国内蒙古通辽人, 本科, 从事电力系统自动化研究。

业电机驱动等高电压场景下，SiC 器件能够稳定运行，保障系统的可靠供电。其击穿电场强度更是硅的 10 倍之多，这使得在满足相同耐压要求时，SiC 器件可设计得更轻薄，进而有效降低了导通电阻。以电动汽车的车载充电机为例，采用 SiC 器件后，导通电阻的降低减少了电能传输过程中的损耗，提高了充电效率。此外，SiC 的热导率约为硅的 3 倍，优异的散热性能使得器件在高功率运行时能够快速将热量散发出去，大幅提升了功率密度。在开关速度方面，SiCMOSFET 相较于传统硅 IGBT 优势明显^[1]。在高频应用场景，如 5G 基站的电源转换模块中，SiCMOSFET 能够在短短数十纳秒内完成开关动作，而硅 IGBT 则需几百纳秒，这种快速的开关速度不仅降低了开关损耗，还使得电机驱动系统能够在更高频率下工作，有效减小了滤波器等外围元件的尺寸和重量，极大地提高了系统的功率密度。

2.2 氮化镓 (GaN) 器件

氮化镓同样属于宽禁带半导体材料的范畴，具备一系列独特且优异的性能特点。其器件拥有极高的电子迁移速度，达到硅的 2-3 倍，这一特性使得 GaN 器件在开关速度上表现卓越，能够进一步降低开关损耗。在高频电路中，快速的电子迁移使得信号的响应更加迅速，减少了能量在开关过程中的浪费。与 SiC 器件相比，GaN 器件具有独特优势，它能够在更薄的外延层上实现高耐压，这意味着在有限的空间内可以集成更多的功能，提高了芯片的集成度^[2]。同时，GaN 器件的寄生电容更小，这对于高频应用而言至关重要，寄生电容的减小有效降低了信号的干扰和失真，提升了电路的稳定性。在实际应用领域，GaN 器件在低电压、高频率的电机驱动场景中表现尤为突出。以无人机为例，其电机驱动系统对体积和重量要求严苛，GaN 器件凭借高频特性，不仅使电机驱动系统体积更小、重量更轻，还显著提高了系统的效率和动态响应性能。无人机在飞行过程中能够更加敏捷地响应操控指令，实现精准飞行。并且，由于 GaN 器件的快速开关特性，电机的控制精度得到极大提升，运行过程更加平稳，减少了振动和噪音，提升了用户体验。

3 新型电力电子器件在高效电机驱动系统中的应用原理

3.1 电机调速控制

在高效电机驱动系统里，电机调速堪称核心功能，其不仅是节能降耗的关键，更是契合多样工况需求的必要手段。新型电力电子器件借助脉宽调制 (PWM) 这一精妙技术达成电机调速控制。以 SiCMOSFET 在三相交流电机驱动系统的应用来说，由 SiCMOSFET 搭建的逆变器宛如一个电力转换枢纽，能将直流电源有条不紊地变换为三相交流电压。在这一过程中，通过对 SiCMOSFET 导通与关断时间的精准把控，也就是灵活调节 PWM 信号占空比，就能对输出交流电压的幅值与频率实现精确调控^[3]。在工业流水线场景

中，当电机需加速以提升生产效率时，增大 PWM 信号占空比，输出交流电压幅值随之升高，频率同步上扬，电机转速迅速攀升；而在需要精准定位的自动化设备中，电机减速时，减小占空比，电压幅值与频率双降。SiCMOSFET 的快速开关特性优势尽显，能让 PWM 控制精度大幅提升，输出电压与电流谐波大幅减少，电机转矩脉动显著降低，电机运行效率与稳定性得以全方位增强。

3.2 功率因数校正

功率因数作为衡量电机驱动系统电能利用效率的关键指标，其重要性不言而喻。在传统电机驱动系统中，非线性负载的存在犹如一颗“电能损耗炸弹”，致使输入电流波形严重畸变，功率因数惨不忍睹。新型电力电子器件此时挺身而出，可用于功率因数校正电路，成为改善系统功率因数的“救星”。以 GaN 器件在 Boost 型功率因数校正电路中的应用为例，电路运行时，GaN 器件凭借超快的开关速度，如闪电般快速导通与关断，将输入交流电巧妙斩波并升压处理。通过精细调控 GaN 器件的开关频率与占空比，输入电流仿佛被一只无形的手牵引着，紧紧跟随输入电压正弦波变化，功率因数由此显著提高。在数据中心供电系统中，GaN 器件的高开关速度与低导通电阻特性大显身手，使功率因数校正电路能在高频下稳定工作，电感、电容等无源元件尺寸大幅缩小，电路功率密度得以提升，同时低导通电阻极大降低导通损耗，进一步优化了系统整体效率^[4]。

4 新型电力电子器件应用面临的挑战及解决策略

4.1 成本问题

新型电力电子器件如 SiC 和 GaN 器件，当下成本居高不下，严重制约其大规模推广应用。从材料制备环节来看，宽禁带半导体材料工艺复杂程度远超传统材料。以 SiC 晶体生长为例，需在高达 2000℃ 左右的高温以及数兆帕的高压极端环境下进行，且生长速率极为缓慢，每小时仅能生长数微米，致使 SiC 衬底价格相较于硅衬底高出数倍乃至数十倍^[5]。在制造工艺方面，新型器件与传统硅器件大相径庭，需全新的光刻、刻蚀、掺杂等设备与技术。例如，SiC 器件制造需能精确控制原子尺度的刻蚀设备，这类设备不仅价格昂贵，维护成本也极高。为攻克成本难题，科研人员正全力优化材料制备工艺。像采用物理气相传输法改进 SiC 晶体生长技术，通过精准调控生长环境参数，已将生长速度提升近 30%，同时大幅提高晶体质量，降低次品率，从而拉低 SiC 衬底价格。随着市场对新型电力电子器件需求井喷式增长，诸多厂商纷纷扩大产能，规模效应逐步凸显，预计未来几年，器件成本有望因规模生产降低 20%-30%。此外，学界与产业界还积极探索如氧化物半导体等新型替代材料与创新制造方法，力求开辟更具成本效益的路径^[6]。

4.2 散热问题

新型电力电子器件凭借高功率密度优势在高效电机驱动系统中崭露头角,但随之而来的散热难题不容忽视。因其在狭小空间内汇聚大量功率,工作时产生的热量远超传统器件。即便 SiC 和 GaN 材料自身热导率优于硅,可在实际应用场景,如电动汽车的车载逆变器,由于空间紧凑、运行工况复杂,散热依旧棘手^[7]。优化器件封装结构是关键一步,选用热导率达 $200\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上的陶瓷封装材料,能有效将器件内部热量导出,相较于传统塑料封装,散热效率提升 50% 左右。设计高效散热系统同样重要,如在工业电机驱动模块中,增大散热器鳍片表面积,配合强制风冷,可使器件工作温度降低 15°C - 20°C ; 对于高功率应用,液冷散热方案能精准控制冷却液流量与温度,确保器件稳定运行。合理优化电路布局,通过仿真软件模拟电流分布,均衡功率分配,避免局部区域功率过度集中产生过热现象。先进热管理技术不可或缺,利用传感器实时监测器件关键部位温度,当温度逼近警戒值,自动降低电机驱动系统输出功率,或调整风扇转速、冷却液流速,保障器件始终在安全温度区间稳定工作^[8]。

4.3 驱动和保护电路设计

新型电力电子器件特性与传统器件差异显著,适配的驱动和保护电路设计成为应用的关键挑战。SiC 和 GaN 器件开关速度极快,上升与下降时间可短至数纳秒,这在带来高频高效优势的同时,也极易引发高达数百伏甚至上千伏的电压尖峰以及数十安培的电流尖峰。若驱动电路设计不佳,如驱动芯片响应迟缓,无法在极短时间内为器件提供足额驱动电流,将导致器件开关延迟,增大开关损耗,甚至引发器件过热损坏^[9]。在设计 SiCMOSFET 驱动电路时,需选用具备纳秒级响应速度的专用驱动芯片,像某款高性能驱动芯片,其传播延迟小于 50ns ,可精准控制 SiCMOSFET 的导通与关断。同时,精心布局驱动电路布线,采用多层 PCB 板、缩短线路长度、增加线路宽度等方式,大幅减小寄生电感和电容,将电压、电流尖峰降低 30%-40%。保护电路设计关乎器件安全运行,设置过流保护时,利用高精度电流传感器实时监测电路电流,一旦电流超过预设阈值,如超过额定电流 1.5 倍,通过快速比较器与逻辑电路,在数微秒内触发关断信号,切断器件供电。搭配缓冲电路,如采用 RCD 缓冲电路吸收电压尖峰能量,可有效避免器件因瞬间高压击穿,

全方位守护新型电力电子器件稳定、可靠工作^[10]。

5 结论

新型电力电子器件如碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 凭借其高功率密度、低导通电阻、快开关速度等优势,在高效电机驱动系统中展现出巨大的应用潜力。通过在电机调速控制和功率因数校正等方面的应用,能够显著提高电机驱动系统的效率和性能,满足能源节约和环保的需求。然而,新型电力电子器件在应用过程中也面临着成本较高、散热困难以及驱动和保护电路设计复杂等挑战。通过优化材料制备和器件制造工艺、改进散热技术以及精心设计驱动和保护电路等策略,可以逐步解决这些问题,推动新型电力电子器件在高效电机驱动系统中的广泛应用,为工业领域的节能和可持续发展做出重要贡献。随着技术的不断进步和研究的深入,新型电力电子器件在高效电机驱动系统中的应用前景将更加广阔。

参考文献

- [1] 杜元阳.碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望[J].湖北农机化,2019,(10):21-22.
- [2] 薛志荣.电力电子器件的应用和发展[J].通信电源技术,2019,36(04):108-109.
- [3] 林兴浩,尚学峰.基于文献计量的新型电力电子器件研究态势分析[J].世界科技研究与发展,2018,40(04):355-367.
- [4] 张岚,程威.浅谈电力电子器件的应用现状和发展[J].科技风,2017,(16):224.
- [5] 李祥东.新型AlGaN基电力电子器件研究[D].西安电子科技大学,2015.
- [6] 钱照明,张军明,盛况.电力电子器件及其应用的现状和发展[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5149-5161.
- [7] 王莉,朱萍.新型宽带SiC功率器件在电力电子中的应用[J].南京航空航天大学学报,2014,46(04):524-532.
- [8] 赵善麒,盛况,刘扬.新型电力电子器件专辑—特邀主编评述[J].电力电子技术,2012,46(12):1.
- [9] 2012年第12期“新型电力电子器件专辑”[J].电力电子技术,2012,46(08):99.
- [10] 国家发改委全力支持新型电力电子器件产业化[J].中国科技产业,2010,(04):36.