

纯电重卡电机控制器效率提升技术研究

李 静 拓朝辉 杨明明

西安智德汽车电子控制系统有限公司 陕西 西安 713702

摘要: 本文旨在探讨纯电重卡电机控制器效率提升的关键技术, 通过理论分析与实践验证, 提出了一系列有效策略, 以期在提升整车经济性与续航能力的同时, 降低能耗与重量。文章首先概述了电机控制器在纯电重卡中的重要性, 随后详细阐述了载频动态调整、DPWM发波技术、过调制技术及HSM电机应用等效率优化方法, 并对未来发展方向进行了展望。

关键词: 纯电重卡; 电机控制器; 效率

引言

随着新能源汽车产业的快速发展, 纯电重卡作为绿色物流的重要载体, 其性能优化尤其是电机控制器效率的提升成为研究热点。电机控制器作为连接电池与电机的关键部件, 其效率直接影响整车的能耗与经济性。本文将从技术角度出发, 深入分析纯电重卡电机控制器效率提升的关键技术。

1 电机控制器效率提升的背景与意义

1.1 电机控制器在纯电重卡中的作用

电机控制器在纯电重卡中扮演着至关重要的角色, 它是连接电池与电机的桥梁, 负责将电池输出的直流电高效、准确地转换为驱动电机所需的交流电。这一转换过程不仅关系到整车的动力输出, 更直接影响到电能的有效利用。因此, 电机控制器可以被视为整车动力系统的“神经中枢”。其效率的高低直接决定了电能转换过程中的能量损耗。一个高效的电机控制器能够最大限度地减少电能转换过程中的损失, 使得更多的电能能够用于驱动车辆, 从而提升整车的续航能力和经济性。相反, 一个效率较低的电机控制器则会导致大量的电能损耗, 不仅降低了续航能力, 还增加了整车的运行成本。

1.2 提升电机控制器效率的重要性

在纯电重卡领域, 提升电机控制器的效率具有极其重要的意义。首先, 从经济性的角度来看, 电控系统效率的提升可以显著降低整车的能耗, 进而减少运行成本。这对于物流运输等需要长时间、高频率使用纯电重卡的行业来说, 无疑是一个巨大的优势。其次, 提升电机控制器的效率还有助于减轻整车的重量。这是因为高效的电机控制器往往采用更先进的材料和工艺, 能够在保证性能的同时实现轻量化设计。这对于需要严格控制载重的纯电重卡来说, 同样是一个不可忽视的优势^[1]。更为重要的是, 在电池技术尚未取得突破性进展的背景

下, 提升电机控制器的效率成为提升整车性能的重要途径。通过优化电机控制器的设计和工作原理, 可以在不增加电池容量的情况下, 有效提升整车的续航能力和动力性能。这对于推动纯电重卡产业的发展和具有深远的意义。

2 纯电重卡电机控制器效率提升的关键技术

2.1 载频动态调整技术

在纯电重卡电机控制器的效率优化领域, 载频动态调整技术是一项极具创新性的策略。逆变器作为电控系统的核心组件, 其损耗问题尤为突出, 其中开关部分的损耗占据了逆变器总损耗的70%。为了有效降低这部分损耗, 载频动态调整技术应运而生。该技术通过实时监测电机的工作状态, 并依据预设的算法, 在不同工作区间内动态地调整载波频率。在低转速区间, 由于电机的工作负载较轻, 通过降低载波频率, 可以显著减少开关次数, 进而降低开关损耗。这一调整不仅减少了电能的浪费, 还有效延长了开关器件的使用寿命。而在高频阶段, 为了保持电机的优异性能和高效运行, 载频动态调整技术会智能地恢复高频载波控制。这种高频控制能够确保电机在高速运转时的稳定性和响应速度, 同时兼顾了性能与效率。为了实现这一动态调整过程, 该技术采用了先进的控制算法和精确的传感器技术。控制算法能够实时分析电机的工作数据, 并快速做出调整决策。而传感器则负责准确采集电机的工作状态信息, 为控制算法提供可靠的数据支持。相关研究表明, 采用载频动态调整技术的电机控制器, 其效率最大可以提升约2%。这一提升对于纯电重卡而言具有重要意义, 它意味着在相同的电池容量下, 车辆可以行驶更远的距离, 从而提高了整车的续航能力和经济性。

2.2 DPWM发波技术

在纯电重卡电机控制器的效率优化策略中, DPWM

(不连续脉冲宽度调制)技术是一项重要的技术创新。与传统COWM(连续脉冲宽度调制)技术相比,DPWM技术通过巧妙地减少开关次数,显著降低了开关损耗,从而提升了电机控制器的整体效率。DPWM技术的核心在于其独特的调制方式。在特定的调制比M范围内,当 $M>0.816$ 时,CPWM和DPWM调制下的谐波成分变得近似相同。这意味着,在此区域内采用DPWM技术,可以在不牺牲电机性能的前提下,有效降低开关器件的损耗。为了实现这一目标,DPWM技术采用了不连续的脉冲宽度调制方式。与传统的连续调制方式不同,DPWM技术在每个开关周期内,都会有一段时间内使开关器件保持关闭状态,从而减少开关次数。这种不连续的调制方式不仅降低了开关损耗,还有助于减少电磁干扰和噪声,提高电机的运行稳定性。此外,DPWM技术还具有易于实现和成本低廉的优点。由于该技术不需要额外的硬件支持,只需要对电机控制器的软件算法进行简单修改,即可实现DPWM调制。这使得DPWM技术在纯电重卡电机控制器中具有广泛的应用前景。在实际应用中,DPWM技术可以与其他效率提升技术相结合,共同推动电机控制器效率的进一步提升。例如,可以将DPWM技术与载频动态调整技术相结合,通过在不同工作区间内动态调整载波频率和调制方式,实现电机控制器效率的全面优化。

2.3 过调制技术

过调制技术作为一种先进的电机控制策略,在纯电重卡电机控制器效率提升中扮演着重要角色。该技术通过超越常规线性调制范围,进入非线性调制区域,从而显著提高了弱磁区的输出功率和输出转矩,进而有效提升了整车的高速动力性能。过调制技术的基本原理在于增加调制信号的幅值,使其超过逆变器或电机所能承受的最大线性范围。这一过程中,虽然会引入一定的非线性失真和谐波成分,但能够显著提升输出电压和峰值功率。具体来说,当调制比(即调制信号的幅值与载波信号幅值的比值)超过1时,即进入过调制区域,此时输出电压不再随调制比线性增加,但能够通过特定的算法实现非线性控制,以达到所需的输出功率和转矩。过调制技术通过提高调制比,使得逆变器在弱磁区能够输出更大的电压和电流,从而显著提升了电机的输出功率和转矩。这对于纯电重卡在高速行驶或重载工况下的动力性能至关重要。在输出相同功率的情况下,过调制技术使得电流幅值有所降低。这不仅减小了系统的发热量,降低了对散热系统的要求,还有助于提高控制器的过载能力和延长续航里程。虽然过调制会引入一定的非线性失

真和谐波成分,但通过合理的控制算法和滤波器设计,可以将其影响降到最低。同时,过调制技术使得电机控制器在更宽的工作范围内保持高效运行,从而提升了整车的能量利用效率^[2]。过调制技术的实现方式多种多样,包括但不限于直接过调制、空间矢量过调制等。其中,空间矢量过调制因其能够充分利用逆变器的电压空间矢量,实现更精确的非线性控制而备受青睐。在实际应用中,电机控制器会根据当前的工作状态和负载需求,自动选择合适的过调制模式以实现最优的性能输出。

2.4 HSM电机应用

HSM(广域高效混合同步电机)作为一种先进的电机技术,在纯电重卡领域展现出了卓越的性能优势,特别是在提升电机效率方面表现突出。相比传统的IPM(内置永磁同步)电机,HSM电机能够兼顾低速区与高速区的效率,尤其在中高速恒功率运行区域内,其效率优势更为显著。HSM电机采用独特的混合磁路设计,结合了永磁体的高磁能积与磁阻转矩的高效利用。这种设计使得HSM电机在低速区能够充分利用永磁体的磁通,提供高转矩输出;而在高速区,则通过磁阻转矩的增强作用,保持较高的效率水平。这种混合磁路设计是HSM电机实现高效运行的关键。HSM电机的定子结构经过精心优化,以减少磁阻和涡流损耗,提高电机的整体效率。定子的槽形和绕组布局经过精确计算,以最小化磁通畸变和谐波损耗;而转子的磁极形状和永磁体布置则经过细致调整,以优化磁通路径和转矩输出。HSM电机的高效运行还离不开先进的控制策略支持。通过采用先进的矢量控制或直接转矩控制算法,HSM电机能够实现精确的转矩和速度控制,确保在不同工况下都能保持最佳的运行状态。同时,结合载频动态调整技术和DPWM发波技术等优化手段,进一步降低了开关损耗和电磁干扰,提高了系统的整体效率^[3]。实验表明,HSM电机在低速区和高速区的效率均高于传统IPM电机。在低速区,HSM电机能够充分利用永磁体的优势,提供更高的转矩输出和效率;而在高速区,则通过磁阻转矩的增强作用保持高效运行。这种全面的效率提升使得HSM电机在纯电重卡等需要高效动力系统的领域具有广泛的应用前景。

3 未来发展方向

3.1 高功率密度与低损耗材料

在纯电重卡电机控制器技术的未来发展中,高功率密度与低损耗材料的应用将成为重要趋势。这一趋势不仅符合新能源汽车行业对高效、节能的追求,也是提升整车性能和经济性的关键所在。以碳化硅(SiC)为代表的宽禁带半导体材料,因其优异的电学性能和热稳定

性,正逐步取代传统的硅基材料。SiC MOSFET在电机控制器中的应用,能够显著降低开关导通损耗,提高能量转换效率。这得益于SiC材料的高击穿电压、低导通电阻和低开关损耗特性,使得电机控制器在相同体积下能够输出更高的功率,从而实现高功率密度设计。为了进一步提升电机控制器的功率密度和散热性能,新型封装技术如双面冷却集成将成为研究热点。这种技术通过在功率芯片的两侧均设置散热结构,有效降低了热阻,提高了散热效率。同时,结合先进的封装工艺和材料科学,可以实现更紧凑、更轻量化的电机控制器设计,满足新能源汽车对空间利用和重量控制的需求。

3.2 智能门极驱动技术

智能门极驱动技术作为新能源汽车电机控制器领域的一项关键技术,正逐步成为提升系统效率与可靠性的重要手段。该技术通过主动精细化最优控制IGBT(绝缘栅双极型晶体管)的开关过程,显著降低了损耗并提升了电压利用率,为纯电重卡等新能源车辆带来了性能上的飞跃。智能门极驱动技术能够实时监测IGBT的工作状态,包括电流、电压及温度等关键参数。基于这些实时数据,该技术通过复杂的算法计算,对IGBT的开关过程进行精细化的最优控制。这包括精确控制开通和关断的时间点、电压和电流波形等,以减少开关过程中的能量损耗,提高转换效率。通过精细化控制,智能门极驱动技术有效降低了IGBT在开关过程中的损耗,包括导通损耗和开关损耗^[4]。同时,该技术还能提升电压的完整利用率,使电机控制器在更宽的电压范围内保持高效运行,从而提高了整车的能源利用效率。智能门极驱动技术不仅关注IGBT的开关过程控制,还集成了强大的监控与诊断功能。通过实时监控IGBT的工作状态参数,该技术能够及时发现潜在的故障隐患,如过热、过流等异常情况。一旦检测到异常,智能门极驱动技术将迅速采取保护措施,如降低功率输出、切断电源等,以防止故障进一步扩大,确保电机控制器的安全性与可靠性。

3.3 电磁兼容性与可靠性设计

面对新能源汽车日益严苛的电磁兼容性与可靠性要

求,基于有限元分析的高频仿真模型及鲁棒性验证方法正逐步成为核心技术路径。这一技术路线通过构建精确的高频仿真模型,模拟电机控制器在复杂电磁环境中的工作状态,全面评估其电磁兼容性。具体而言,有限元分析技术能够细致模拟电磁场的分布与变化,对电机控制器的关键部件如IGBT模块、滤波电路等进行精确建模,分析其在高频信号下的响应特性。同时,结合鲁棒性验证方法,对电机控制器在各种极端工况下的性能进行反复测试与验证,确保其能在强电磁干扰下稳定运行,避免因电磁兼容性问题导致的系统故障或性能下降。此外,该技术路线还注重材料特性、结构布局以及散热设计等多方面的综合优化,通过精细调控各设计参数,进一步提升电机控制器的电磁兼容性与可靠性水平。总之,基于有限元分析的高频仿真模型及鲁棒性验证方法,将为新能源汽车电机控制器的电磁兼容性与可靠性设计提供强有力的技术支持。

结语

本文通过对纯电重卡电机控制器效率提升技术的深入研究,提出了载频动态调整、DPWM发波技术、过调制技术及HSM电机应用等一系列有效策略。这些技术不仅能显著提升电机控制器的效率,还能在降低整车能耗与重量的同时,增强整车的动力性能与续航能力。未来,随着高功率密度材料、智能门极驱动技术及电磁兼容性与可靠性设计的不断发展,纯电重卡电机控制器的性能将进一步提升,为新能源汽车产业的绿色可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]周作栋,郑开森,陈明福,等.新能源载货商用车驱动电机及控制策略综述[J].内燃机与配件,2023,(02):88-90.
- [2]黄文凯,程辉军,储爱华.纯电重型商用车四电机系统动力性及经济性研究[J].汽车工程,2023,45(01):70-76+85.
- [3]钱宝存,范申,孙岗奥.纯电重卡商用车电平衡设计研究[J].汽车电器,2023,(11):19-20.
- [4]孙岳.商用车驱动电机控制系统设计及控制特性研究[D].北京林业大学,2020.