

高功率密度永磁同步电机设计与热管理优化研究

陆海斌

奇瑞汽车股份有限公司 安徽芜湖

【摘要】高功率密度永磁同步电机(PMSM)作为电动机领域中的重要发展方向,在新能源汽车、工业设备等领域具有广泛的应用前景。然而,高功率密度带来的热管理问题也成为其推广应用中的瓶颈。本文围绕高功率密度 PMSM 的设计与热管理优化展开研究,分析了电机在高功率密度下的热源分布特性,并探讨了冷却系统和材料优化对电机性能的影响。通过对电机设计及其热管理策略的优化,提出了一种提升电机热效率和功率密度的综合方案,为进一步提升 PMSM 在高效能设备中的应用提供理论依据和技术支持。

【关键词】高功率密度; 永磁同步电机; 热管理; 冷却系统; 材料优化

【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.20250112

Research on design and thermal management optimization of high power density permanent magnet synchronous motors

Haibin Lu

Chery Automobile Co., Ltd. Wuhu, Anhui

【Abstract】As an important development direction in the field of electric motors, high power density Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) have broad application prospects in new energy vehicles, industrial equipment, and other fields. However, the thermal management issues caused by high power density have become a bottleneck in their popularization and application. This paper focuses on the design and thermal management optimization of high power density PMSMs, analyzes the heat source distribution characteristics of the motor under high power density, and discusses the impact of cooling system and material optimization on motor performance. Through the optimization of motor design and its thermal management strategies, a comprehensive scheme to improve motor thermal efficiency and power density is proposed, providing theoretical basis and technical support for further enhancing the application of PMSMs in high-efficiency equipment.

【Keywords】High power density; Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM); Thermal management; Cooling system; Material optimization

引言

随着新能源产业的快速发展,电动汽车、风力发电和高效能工业设备对电动机的性能要求不断提升,尤其是在功率密度和热管理方面。高功率密度永磁同步电机(PMSM)因其优越的效率和体积优势,成为了众多高效能电动机的首选。然而,高功率密度所带来的热量积累问题,严重影响了电机的运行效率和稳定性。过高的温度不仅会加速电机材料的老化,还会导致效率下降甚至故障发生。如何在保持高功率密度的前提下,有效地控制电机的温度,成为了当前电机设计中的重要研究课题。本文将围

绕高功率密度 PMSM 的设计与热管理优化展开探讨,提出新的设计方法和技术路径,以期提升电机的整体性能和应用寿命。

1 高功率密度永磁同步电机设计中的关键问题

高功率密度永磁同步电机的设计面临着一系列技术挑战。随着功率密度的不断提升,电机的体积逐渐减小,但这也导致了热量的增加。在高功率密度条件下,电机的热管理成为设计中的核心难题。电机内部的热源分布不均,特别是在高负荷运行时,铁芯、绕组和永磁材料等部件会产生大量热量,而这些热量如果无法有效散发,将直接影响电机的效率和寿命。

为了应对这一问题,设计师需要精确计算电机各部件的热分布,并在设计中考考虑如何优化热量传导、对流和辐射等散热机制,以保持电机的稳定运行。

电机材料的选择和优化对功率密度的提升起着至关重要的作用。永磁材料的磁性性能是决定电机功率密度的关键因素,但高功率密度的要求往往意味着磁场强度的提升,这就会导致永磁材料的温升增加,进而影响其性能。在设计高功率密度永磁同步电机时,需要平衡磁性材料的选择和热管理需求。除此之外,电机的转子和定子结构设计也需考虑热膨胀、温差引起的应力以及材料的热稳定性,这对于保障电机长期高效运行至关重要。

为了优化高功率密度永磁同步电机的设计,冷却技术成为不可忽视的一环。常规的空气冷却方法往往不足以应对高功率密度电机所产生的过热问题,因此液冷系统、直接冷却技术和更高效的热导材料等被引入到设计中^[4]。液冷系统由于其较高的热传导能力,能够有效带走电机内部的热量,从而降低温升,提升电机的工作稳定性和寿命。结构上的优化也至关重要,比如在电机内部合理布局散热通道,利用自然对流或强制对流增强热量的传递,都是提高电机热管理能力的有效手段。整体而言,只有从材料选择、结构优化以及冷却系统等多方面综合考虑,才能在保证高功率密度的确保电机的热管理效果和可靠性。

2 高效热管理策略对电机性能的影响

高效热管理策略对电机性能的提升至关重要,尤其是在高功率密度永磁同步电机(PMSM)中,热管理技术直接影响电机的工作效率、稳定性以及使用寿命。随着电机功率密度的提高,热负荷增大,电机内部的温度分布变得更加复杂。如果不能有效管理这些热量,电机将面临过热风险,导致功率损失、材料老化甚至故障。高效热管理不仅是保证电机正常运行的基础,更是提升电机性能的关键手段。

热管理策略的核心在于有效地将电机内部产生的热量及时散发出去,避免局部过热对电机性能产生不良影响。在高功率密度电机中,采用液冷系统作为主流冷却技术之一,能够显著提升热传导效率,保持电机运行的稳定性。液冷系统通过在电机内部设计冷却通道,将冷却液体直接流经电机发热部位,如绕组和铁芯区域,迅速带走热量。这种直接接触的冷却方式能有效降低电机的温升,避免过高温度对电机的永磁材料和绕组绝缘层造成损害,确保电

机在高功率密度运行下仍能维持良好的性能。冷却液的选择、流动方式和冷却通道设计都会影响系统的散热效率,优化液冷系统设计对提升电机的热管理效果至关重要。

除了液冷系统,其他高效热管理手段也能发挥重要作用,例如增强型散热器、热管技术等。散热器的设计不仅要保证电机内部热量的迅速传递,还要考虑热辐射的作用,减少电机表面的热积聚。而热管技术通过利用液体蒸发和冷凝过程,能够将电机内部的热量从热源处快速传输到远离热源的区域,从而有效提高散热效果^[2]。在高功率密度永磁同步电机的设计中,这些先进的热管理技术的结合使用,不仅可以降低电机的运行温度,还能提高电机的功率输出和运行效率。通过实施有效的热管理策略,电机能够保持稳定的性能表现,并在长时间运行下延长其使用寿命,减少维修成本和故障风险。

电机的热管理效果还与其设计密切相关。优化电机的气流路径、提高材料的热导率、选用更耐高温的绝缘材料等都能对电机的热性能产生积极影响。通过改进热管理策略,电机在高功率密度下的散热能力得到提升,从而提高了电机的整体性能,不仅在高负荷下能维持较低的温升,还能在长时间运行中减少功率损耗,确保电机的高效稳定工作。热管理策略的优化,不仅是提高电机性能的必要手段,也是推动高功率密度永磁同步电机进一步发展的重要因素。

3 冷却系统与材料优化的综合方案

在高功率密度永磁同步电机的设计中,冷却系统与材料优化的综合方案起着决定性作用。电机内部发热源的分布和高功率密度要求使得传统冷却方式无法满足电机散热需求。冷却系统的设计必须与电机结构、材料特性紧密结合,以实现最佳的热管理效果。液冷系统作为一种高效冷却技术,能够通过冷却液直接带走热量,降低电机的温升。然而,仅仅依赖冷却液的流动并不足以完全解决散热问题,材料的选择同样至关重要。电机中使用的导热材料和绝缘材料直接影响热量的传导效率与电机的整体性能。通过优化冷却通道的设计和提高材料的热导率,冷却系统和材料能够协同作用,最大限度地提升电机的散热能力。

材料优化的方向主要集中在提高导热性和耐高温性能。高导热材料能够迅速将电机产生的热量传导到冷却系统,从而加速热量的散发。常见的导热

材料如铜、铝以及新型复合材料,在设计中根据电机的实际需求进行选择。而在高功率密度条件下,永磁材料的高温稳定性也是设计中的重要考量。高温下,永磁材料的磁性性能会发生衰减,选用高温稳定性较强的永磁材料,可以有效避免高温导致的磁性性能下降,保证电机在高功率运行下的稳定性。绕组的绝缘材料也需要具有较好的耐温性,以防止高温环境下出现短路或其他电气故障。材料的优化不仅体现在导热性上,还应考虑到各个部件的耐高温和长期使用的可靠性。

冷却系统与材料优化的综合方案能够显著提升电机的热管理效果,并有效提升电机的性能。在液冷系统中,冷却液的流动方式和冷却通道的设计将影响热量的传导效率。冷却液的流速、流动方向和冷却液的物理化学性质都应考虑进来,以确保热量在电机内部能够快速而均匀地分布。在冷却系统的设计中,还可以采用热管技术等新兴散热技术,进一步提高热传导效率^[3-7]。结合高导热材料的应用,这些优化方案能够更有效地解决高功率密度电机面临的热管理问题。通过将冷却系统和材料优化有机结合,能够提升电机在高功率密度下的稳定性和可靠性,满足日益严苛的高效能电动机需求。

4 高功率密度永磁同步电机热管理优化路径探索

在高功率密度永磁同步电机的热管理优化过程中,提升电机散热效率是核心目标之一。电机内部的热源分布复杂且不均匀,如何通过设计优化有效地引导和分散这些热量,成为热管理优化的关键路径。液冷系统作为主要的冷却方案,因其高效的热导性能和可调节性,已经广泛应用于高功率密度电机中。然而,仅有液冷系统无法完全解决电机的散热问题。为此,在冷却系统的设计上,需要通过精确的热仿真分析,确定电机中各个热源的分布,并根据不同部位的热需求合理布置冷却通道。冷却液的选择及其流速、流动方向等参数也需要经过精心调控,以确保冷却效果的最优化。通过优化冷却系统和材料特性的结合,可以有效地降低电机的温升,提高其工作稳定性和长期耐久性。

除了冷却系统,材料的热性能优化也是热管理方案中不可或缺的一环。随着高功率密度电机对材料的要求不断提高,选择高导热、高耐温的材料成为优化路径的重要组成部分。在设计中,永磁材料和绕组绝缘材料的选择尤为关键。优选具有高温稳

定性的永磁材料,可以避免电机在高功率运行时因温度过高而导致磁性衰减,从而保持电机的高效能输出^[8]。优化电机外壳和转子结构的散热性能,采用高导热的金属材料,能够加速热量的传导和散发,进一步降低温度。综合考虑冷却系统与材料优化,制定出合理的热管理方案,能够有效提升高功率密度永磁同步电机的整体性能,使其在高效能应用中更加稳定可靠。

5 结语

高功率密度永磁同步电机在各类高效能应用中具有广泛前景,但随之而来的热管理问题仍是其推广应用的关键挑战。通过优化冷却系统和材料性能,能够有效提升电机的热管理能力,确保电机在高功率密度运行下的稳定性和高效性。液冷系统与高导热材料的结合为电机的散热提供了有效路径,而热仿真技术和精细化设计则确保了冷却效果的最大化。随着技术的不断进步,未来高功率密度永磁同步电机将更加高效、可靠,为新能源和工业领域的发展提供强大动力支持。

参考文献

- [1] 朱龙飞,尹帅,陈思思,等.基于铁钴合金的高功率密度永磁同步电机设计[J].微电机,2025,58(01):39-44.
- [2] 史恒.无人机高功率密度永磁同步电机设计与优化[D].杭州电子科技大学,2024.
- [3] 郭昊天,曹鑫,潘家龙,等.高功率密度永磁同步电机多物理场设计与优化[J].微特电机,2024,52(04):16-21+27.
- [4] 于占洋.全电机用高功率密度外转子永磁同步电机设计研究[D].沈阳工业大学,2021.
- [5] 陈亮.高温高功率密度永磁同步电机设计及分析[D].浙江理工大学,2020.
- [6] 郝金顺.高功率密度永磁同步电机设计与多目标优化研究[D].中国地质大学(北京),2020.
- [7] 蒋超,乔鸣忠,彭威,等.舰用泵高功率密度永磁同步电机设计与分析[J].微电机,2019,52(11):1-6.
- [8] 刘欢.多电机用高功率密度永磁同步电机设计与仿真研究[D].东南大学,2019.

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