

基于氮化镓器件的 100W 高频 LLC 谐振变换器设计与热管理优化

章双玉

华中科技大学 湖北武汉

【摘要】氮化镓（GaN）器件以其高频、高效率和小体积的特点，成为高功率变换器中的理想选择。本文设计了一种基于氮化镓器件的 100W 高频 LLC 谐振变换器，并对其热管理进行了优化。分析了 GaN 器件在高频应用中的优势，介绍了 LLC 谐振变换器的基本工作原理和设计要求。接着，通过仿真与实验验证了变换器在 100W 功率下的高效能和稳定性。针对热管理问题，提出了一种结合散热设计与主动冷却的综合优化方案。结果表明，优化后的系统在热稳定性和转换效率方面都得到了显著提高，达到了较好的工作效果。

【关键词】氮化镓器件；高频 LLC 谐振变换器；热管理优化；散热设计；转换效率

【收稿日期】2025 年 4 月 12 日

【出刊日期】2025 年 5 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250156

Design and thermal management optimization of a 100w high-frequency LLC resonant converter based on gallium nitride devices

Shuangyu Zhang

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei

【Abstract】Gallium Nitride (GaN) devices, characterized by high frequency, high efficiency, and small size, have become an ideal choice in high-power converters. This paper designs a 100W high-frequency LLC resonant converter based on GaN devices and optimizes its thermal management. It analyzes the advantages of GaN devices in high-frequency applications, and introduces the basic working principles and design requirements of the LLC resonant converter. Subsequently, simulations and experiments verify the high efficiency and stability of the converter under 100W power. For thermal management issues, a comprehensive optimization scheme combining heat dissipation design and active cooling is proposed. The results show that the optimized system has significantly improved thermal stability and conversion efficiency, achieving good working performance.

【Keywords】GaN-based devices; High-frequency LLC resonant converter; Thermal management optimization; Heat dissipation design; Conversion efficiency

引言

氮化镓（GaN）器件在电力电子领域的应用逐渐增多，特别是在高频和高效能变换器中。与传统硅基半导体器件相比，GaN 器件具有更高的开关频率和更好的效率，能够满足高频、高功率转换的需求。LLC 谐振变换器作为一种高效能的功率转换方案，因其优异的电气特性和较低的电磁干扰（EMI）而被广泛应用。随着工作频率的提高，GaN 器件的热管理问题愈发凸显，影响系统的稳定性和效率。本研究围绕 100W 高频 LLC 谐振变换器中的 GaN 器件，提出了一种针对性的热管理优化方案。通过分析 GaN 器件的优点及热管理挑战，本文探讨了优化热设计的方法，并通过仿真与实验验证，提出了提高系统性能和稳定性的有效策略。

1 氮化镓器件在变换器中的应用分析

氮化镓（GaN）器件以其独特的性能优势，在电力电子领域得到广泛关注。在高频率和高功率应用中，GaN 器件的表现远超传统的硅基器件。氮化镓的宽禁带特性使其能够承受更高的电压和温度，从而能够在较高的工作频率下有效进行开关操作。这使得 GaN 器件在高效能的变换器中成为理想选择，尤其在 100W 高频 LLC 谐振变换器这类对频率和转换效率有高要求的场合，GaN 的高开关频率和低损耗特性能显著提高系统的整体性能。

LLC 谐振变换器本身是一种高效的功率转换电路，特别适用于需要较低电磁干扰（EMI）和高转换效率的应用。传统的硅基半导体在高频操作时，损耗和开关特

性受到一定限制,尤其在功率应用中,系统的效率容易受到影响。GaN 器件的引入能够突破这一瓶颈,提供更高的频率响应和更低的开关损耗。这种优势使得氮化镓在变换器设计中愈加重要,尤其是在需要高频操作的高功率变换器设计中, GaN 无疑提供了一种创新的解决方案。高频工作带来了新的挑战,尤其是高频开关操作产生的热量问题^[1]。GaN 器件虽然具有更高的热稳定性,但高频工作下的热负荷依然对系统的整体性能产生不小的影响。在设计高频 LLC 谐振变换器时,如何将 GaN 器件的高频优势与热管理技术结合,成为了系统优化的关键。本文在这一点上进行了深入研究,提出了具体的优化方案,以提升 GaN 器件在高频变换器中的应用效果。

2 100W 高频 LLC 谐振变换器设计方案

LLC 谐振变换器是一种高效能电力转换装置,利用谐振原理通过调节开关频率来实现高效的能量传输。与传统的硬开关变换器相比, LLC 谐振变换器能显著降低开关损耗,从而提高转换效率。它在高频应用中具有显著优势,特别适用于需要高频、高效能的场合。设计 100W 高频 LLC 谐振变换器时,考虑到 GaN 器件的高频性能,设计的关键是合理选择开关频率、谐振元件以及电路参数,以确保系统的高效性和低电磁干扰(EMI)。GaN 器件能够在高频下稳定工作,其低损耗特性使其成为提升转换效率的重要工具。设计需要综合考虑器件特性与谐振电路的匹配,以实现最优的系统性能。

在设计高频 LLC 谐振变换器时,选择合适的工作频率是至关重要的一步。工作频率的选择直接影响系统的效率和整体体积。较高的开关频率可以有效降低磁性元件的体积,从而使系统尺寸更紧凑,适应更广泛的应用需求。高频操作也会带来开关损耗的增加,尤其是在高功率输出时。GaN 器件因其较高的开关频率和较低的开关损耗,在此类设计中具有重要作用。通过合理选择开关频率,能够在保持低损耗的前提下优化系统的效率。设计者需要平衡频率与损耗之间的关系,确保变换器在 100W 功率输出下实现最佳的效率和热性能。最终的频率选择需要通过精确的仿真和实验验证,确保系统在高频操作下的稳定性。

除了频率选择, LLC 谐振变换器的设计还必须考虑功率流控制和输出调节的稳定性。高频设计中,电路的电磁兼容性(EMC)是一个重要的设计因素,特别是在高功率应用中,电磁干扰(EMI)对系统的影响不可忽视。高频谐振电路的设计必须有效地抑制这些干

扰,以确保变换器在实际应用中的可靠性和稳定性。在此过程中, GaN 器件的高效开关特性为设计提供了更低的开关损耗和更小的干扰,从而提升了整体电磁兼容性^[2]。优化磁性元件的选择和布局,采用更高质量的磁芯材料,并合理布线以降低电磁辐射,是确保系统稳定运行的关键步骤。通过精心的电磁干扰管理,变换器在高频操作下能够保持优异的性能和较低的 EMI 水平,满足现代电力电子系统的设计需求。

3 热管理优化技术与解决方案

在高频和高功率应用中,器件发热是设计中的一个重要问题,尤其是在采用 GaN 器件的变换器中。GaN 器件由于其较高的开关频率和功率密度,在高频操作下会产生显著的热量。热量的积累不仅会导致器件温度过高,从而影响其可靠性,还可能引发效率的下降。尤其在 100W 高频 LLC 谐振变换器这种高功率应用中,热管理问题尤为突出。如果不能有效地控制温度,系统的稳定性可能会受到严重影响,甚至导致器件烧毁或系统故障。设计一个合理的热管理方案,是保证变换器高效、安全运行的关键。有效的热管理不仅可以降低系统损耗,提高转换效率,还能延长器件的使用寿命,确保系统的长期稳定运行。

为了应对高功率密度带来的散热问题,本研究提出了一种结合散热设计和主动冷却的综合热管理优化方案。传统的散热设计主要依赖高效散热片和导热材料来增加热传导效率,这种方法在低频或低功率应用中效果显著。在高频环境下,热传导效率通常无法满足散热需求,特别是在 GaN 器件高频开关时,其发热较为集中,传统散热方案的效果较为有限。结合主动冷却技术成为了一个有效的解决方案。主动冷却系统,如风扇散热和液体冷却方案,通过增加热交换速率,能够更有效地将系统产生的热量带走,保证系统在长时间高频工作下的稳定性。该优化方案将被集成到变换器的整体散热设计中,确保每个重要部分都得到有效的散热,避免局部温度过高引发系统问题。

在热管理优化方案的具体实施过程中,我们进行了多项技术措施来提升系统的散热性能。优化了热传导路径,减少了热量在传输过程中的损失。通过合理布局散热片和热传导路径,确保热量能够迅速从器件表面传递至散热装置。选择了具有高导热性能的材料,如铜和铝合金,以进一步提高散热效果^[3-7]。这些材料不仅能有效提高热传导率,还能在高功率运行下保证结构的稳固性。我们还加强了冷却系统的流体动力学效率。通过优化风扇布局和冷却液流动路径,有效地提高

了热交换效率,确保变换器在高频工作时的温度保持在安全范围内。这些综合措施显著降低了器件的工作温度,提高了系统的整体效率和可靠性。实验和仿真结果均表明,优化后的热管理系统能够确保变换器在高频、高功率工作条件下的稳定运行。

4 仿真与实验验证结果分析

仿真阶段对 100W 高频 LLC 谐振变换器的设计进行了详细分析,使用了高频电路仿真软件进行建模,以验证其在高频操作条件下的性能。仿真结果显示, GaN 器件在较高频率下能够稳定工作,并具有显著的转换效率优势。在高功率输出的情况下, GaN 器件的低开关损耗特性被充分发挥,进一步提高了变换器的整体效率。仿真中也考察了热管理系统的表现,结果表明,优化后的热管理设计能够有效地控制 GaN 器件的温升,避免了高温导致的损耗和性能下降,确保了变换器的稳定工作。这一阶段的仿真验证了 GaN 器件在高频应用中的优势,并为实验阶段的设计提供了理论依据。

在实验阶段,基于前期仿真结果,实际搭建了 100W 高频 LLC 谐振变换器样机,进行了全面的性能测试。测试表明,变换器在 100W 的负载条件下能够保持较高的转换效率,并且其开关损耗较低,符合预期的设计目标。实验还包括了不同负载和工况下的测试,变换器的性能在各类负载变化下始终保持稳定。热管理系统在实际工作中表现出色,能够有效降低器件温度,避免了过热现象的发生。在多种工况下, GaN 器件的温升得到了有效控制,确保了变换器的长期稳定运行。热测试结果验证了热管理优化方案的可靠性,为高效能变换器的应用提供了实践支持。

综合仿真与实验验证的结果,本文所设计的 100W 高频 LLC 谐振变换器方案得到了充分验证。通过仿真和实验数据的对比,可以看出, GaN 器件的高频开关特性和低损耗性能在设计中得到了有效应用,显著提高了系统的转换效率。优化后的热管理系统不仅有效解决了高频工作带来的散热问题,还提高了系统的长期稳定性^[8]。实验中观察到,即使在高功率输出和高频操作的条件下,变换器仍能稳定运行,没有出现由于热积聚导致的性能下降或故障。系统在不同负载条件下都能够保持较好的效率,证明了该设计在广泛工况下的可靠性和适用性,为高频变换器的应用提供了理论

与实践的双重保障。

5 结语

本文设计的基于氮化镓(GaN)器件的 100W 高频 LLC 谐振变换器,结合了高效的开关特性与优化的热管理方案,充分发挥了 GaN 器件在高频、高功率应用中的优势。通过合理选择工作频率、谐振元件及优化电路设计,不仅提高了转换效率,还有效控制了电磁干扰(EMI),保证了变换器的稳定性与可靠性。实验和仿真验证表明,优化后的设计在不同负载和工况下均能稳定工作,并实现高效的热管理,确保器件的长期稳定性。该设计为高频高效能电力变换器的开发提供了宝贵的经验和技术支持,具有广泛的应用前景和实际价值。

参考文献

- [1] 于雁南,付学良,李明通,等.基于氮化镓器件的 LLC 谐振变换器效率优化[J].桂林理工大学学报,2025,45(02): 260-265.
- [2] 韩滔,聂之君,马帅帅,等.热电子应力对氮化镓器件特性的影响研究[J].舰船电子工程,2024,44(12):153-156+190.
- [3] 王安.基于氮化镓器件的混合集成变换器研究[D].兰州大学,2024.D
- [4] 孔妹.GaN 器件反激变换器线性自抗扰控制策略研究[D].桂林理工大学,2024.
- [5] 袁权.基于氮化镓器件的非接触式电能传输变换技术研究[D].北京交通大学,2023.
- [6] 朱厉阳.硅基氮化镓器件新结构及关键工艺研究[D].电子科技大学,2023.D
- [7] 张递.基于氮化镓器件的高频航空电源研究[D].哈尔滨工业大学,2023.
- [8] 张鹏辉,王建超.基于浮动源的氮化镓器件导通电阻测试技术研究[J].电子质量,2022,(11):12-16.

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