

基于功率半导体的新型变流器拓扑与热管理研究

张云龙 410221199004040035

摘要

功率半导体器件是电力电子变流系统的核心部件，其性能直接决定变流器的转换效率、功率密度与运行可靠性。随着新能源发电、电动汽车牵引变流等领域对变流器性能要求不断提升，基于宽禁带功率半导体的新型变流器拓扑设计与热管理技术成为当前研究热点。本文梳理了基于碳化硅、氮化镓等新型功率半导体的变流器拓扑演进方向，分析了高频化运行下变流器散热需求变化，总结了当前新型热管理技术的研究进展，指出了功率半导体变流器在拓扑创新与热设计领域仍存在的挑战，为后续相关技术研发提供参考。

关键词：功率半导体；变流器拓扑；热管理；宽禁带半导体

一、引言

近年来，全球新能源产业快速发展，风电、光伏等新能源发电装机容量持续增长，电动汽车保有量逐年提升，这些领域都依赖高性能电力电子变流器实现电能形式转换。传统硅基功率半导体器件受材料物理特性限制，在击穿场强、热导率、工作温度等参数上已经接近理论极限，难以满足变流器高频化、高功率密度、高温运行的发展需求。以碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）为代表的宽禁带功率半导体，具有更高的击穿电场强度、更快的开关速度以及更好的高温稳定性，能够支撑变流器实现更高开关频率、更小无源器件体积，大幅提升功率密度与转换效率。

新型功率半导体器件的应用不仅对变流器拓扑结构提出了新要求，也对热管理系统设计带来全新挑战。高频开关运行下，功率半导体器件的功率密度显著提升，单位体积产热量大幅增加，传统风冷、水冷散热方式已经难以满足散热需求，研发适配新型功率半导体变流器的热管理技术成为推动产业发展的关键。本文围绕基于功率半导体的新型变流器拓扑与热管理展开研究，梳理拓扑创新方向，总结热管理技术进展，分析现存问题与未来发展趋势。

二、基于新型功率半导体的变流器拓扑创新

功率半导体器件的特性是变流器拓扑设计的基础，宽禁带功率半导体的高开关速度、低开关损耗特性，为变流器拓扑创新提供了硬件基础。当前新型变流器拓扑的演进主要围绕三个方向展开：多电平拓扑优化、软开关拓扑推广以及集成化拓扑设计。

多电平变流器拓扑是中高压大功率变流领域的主流方案，传统硅基器件由于耐压能力限制，往往需要较多电平数实现中高压输出，导致拓扑结构复杂、控制难度提升。碳化硅功率半导体的耐压能力是同尺寸硅基器件的 3-10 倍，因此可以在相同电压等级下减少电平数，简化拓扑结构。当前研究较多的是五电平 H 桥拓扑与中点钳位型三电平碳化硅变流器，相比传统硅基多电平拓扑，器件数量减少 30%以上，开关损耗降低约 40%，同时输出谐波含量更低。针对碳化硅器件的高速开关特性，学者们还提出了新型电容分压拓扑，通过优化钳位电路结构抑制中点电位波动，解决了传统多电平拓扑中长期存在的电位偏移问题。

软开关拓扑能够进一步降低功率半导体器件的开关损耗，充分发挥宽禁带半导体高频运行优势。传统硬开关变流器在高频运行下开关损耗会呈线性增长，限制了开关频率提升，而软开关拓扑通过谐振实现开关动作过程中电压或电流过零，将开关损耗降至极低水平。基于氮化镓器件的谐振软开关 DC-DC 变流器，开关频率可以达到 MHz 级别，功率密度相比传统硬开关拓扑提升 2 倍以上。近年来，学界还提出了自适应软开关拓扑，能够根据负载变化自动调整谐振参数，保证宽负载范围内都能实现软开关动作，解决了传统软开关拓扑负载适应范围窄的问题，目前已经在车载充电机、光伏逆变器等领域得到推广应用。

集成化拓扑设计是新型变流器发展的另一重要方向，新型功率半导体芯片尺寸更小，为变流器的一体化集成提供了可能。当前功率集成变流器拓扑主要将功率半导体器件、驱动电路、无源元件集成在同一模块内部，减少了连接导线长度，降低了寄生电感，能够充分发挥宽禁带器件的高速开关特性。

三、新型变流器的热管理需求与技术进展

基于宽禁带功率半导体的新型变流器，功率密度普遍达到传统硅基变流器的 2-3 倍，单位体积产热量大幅提升，同时碳化硅器件允许更高的结温（通常可达 175℃ 以上，部分碳化硅器件最高结温可达 200℃），这对热管理系统提出了新要求：一方面需要更强的散热能力来应对更高的热流密度，另一方面要求热管理系统自身体积尽可能小，避免抵消功率密度提升带来的优势。当前适配新型变流器的热管理技术主要包括：高导热基板技术、微通道液冷技术、相变散热技术以

及直接散热技术。

高导热基板是功率半导体模块散热的基础,传统功率模块多采用氧化铝陶瓷基板,热导率仅为 $20\text{--}30\text{ W/m}\cdot\text{K}$,难以满足高热流密度散热需求。当前应用较多的新型基板是氮化铝(AlN)陶瓷基板与碳化硅陶瓷基板,热导率分别达到 $180\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 与 $270\text{ W/m}\cdot\text{K}$,相比氧化铝基板热阻降低 40%以上。部分研究还采用金刚石薄膜作为基板涂层,金刚石热导率可达 $2000\text{ W/m}\cdot\text{K}$,能够进一步降低芯片到基板的接触热阻,实验数据显示,采用金刚石涂层基板的碳化硅模块,结壳热阻可以降低约 25%。

微通道液冷技术是当前应对高热流密度散热的主流方案,传统水冷散热采用大尺寸流道,换热系数低,而微通道液冷通过在散热基板上加工直径数百微米的微流道,大幅增加换热面积,换热系数可以达到传统水冷的 5-10 倍,能够承受超过 1000 W/cm^2 的热流密度。针对新型变流器的散热需求,学者们还对微通道结构进行了优化,例如采用分叉式微通道、脉动流道以及多孔介质填充微通道,进一步提升换热效率。目前,碳化硅新能源汽车牵引变流器已经普遍采用集成式微通道液冷散热,将微通道直接加工在功率模块基板底部,减少了散热层数量,热阻降低约 30%,功率密度达到 30 kW/L 以上。

四、现存挑战与未来展望

当前基于宽禁带功率半导体的新型变流器拓扑与热管理研究已经取得诸多进展,但仍然存在一些需要解决的问题:拓扑层面,新型软开关拓扑的控制复杂度较高,宽负载范围软开关实现难度大,多模块并联变流器的寄生参数耦合问题尚未完全解决;热管理层面,高导热金刚石基板的制造成本较高,难以大规模推广,微通道液冷存在易堵塞、压力损失大等问题,相变散热在连续高负载工况下散热能力不足。

未来,拓扑研究方向将进一步围绕智能化、轻量化展开,通过智能化控制算法简化新型拓扑的控制复杂度,充分发挥宽禁带器件的性能优势;热管理技术将向一体化、低成本方向发展,开发低成本高导热基板材料,优化微通道结构降低压力损失,推动相变散热技术在连续运行工况下的应用。随着拓扑与热管理技术的不断成熟,基于新型功率半导体的变流器将在新能源、交通、电力等领域得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 机械工业出版社, 2009.

[2] 陈治明, 李晋闽. 宽禁带半导体电力电子器件研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5025-5031.

[3] 张波, 李肇基. 功率半导体器件原理[M]. 电子工业出版社, 2010.

[4] 陶文铨, 何雅玲. 高热流密度散热技术研究进展[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(1): 143-152.