

面向直流充电桩的 Vienna 整流器损耗抑制策略研究

邱志卓 杨阳 谢达城

江西应用技术职业学院 江西赣州 341000

摘要: 随着新能源汽车渗透率激增, 直流充电桩向高功率、高效率方向快速迭代, 其核心功率变换单元的损耗问题成为制约充电效率与设备寿命的关键。Vienna 整流器因高功率因数、低谐波污染等优势, 被广泛应用于直流充电桩前端, 但开关管导通损耗与开关损耗、寄生参数损耗随功率提升显著增加, 不仅降低能量转换效率, 还会导致器件温升过高, 影响系统稳定性。因此, 开展面向直流充电桩的 Vienna 整流器损耗抑制策略研究, 通过分析损耗机理、设计多维度优化方案, 对提升充电桩整体性能、推动新能源充电基础设施发展具有重要意义。

关键词: 直流充电桩; Vienna 整流器; 损耗抑制

引言

随着电动汽车直流充电桩的普及, 其核心 AC/DC 变换单元——Vienna 整流器的损耗问题日益凸显。高频开关损耗与导通损耗不仅降低了系统效率, 也制约了功率密度与可靠性的提升。传统策略往往难以在损耗抑制与其它性能指标间取得理想平衡。本文旨在深入研究 Vienna 整流器的损耗分布特性, 并在此基础上, 探索一种融合调制优化、软开关技术及智能控制算法的综合抑制策略, 以期显著提升整流效率, 为高效能、高功率密度充电桩的设计提供理论依据与实践参考。

1 Vienna 整流器与直流充电桩概述

Vienna 整流器作为一种三电平功率变换拓扑, 其核心工作原理围绕三相输入电压与功率器件的协同控制展开, 通过将直流侧电容中点与电网中性点相连, 在不同开关状态下形成差异化电流流通路径, 既能实现输入电流的正弦化, 又能避免传统两电平整流器中功率器件承受全电压应力的问题, 显著提升拓扑的安全性与稳定性。在直流充电桩领域, Vienna 整流器凭借三大核心应用优势成为前端功率变换单元的优选方案: 一是高功率因数特性, 可将功率因数稳定在 0.99 以上, 大幅减少对电网的谐波污染, 符合国标对充电桩的电网兼容性要求; 二是低谐波失真度, 通过优化调制策略能将输入电流总谐波畸变率 (THD) 控制在 5% 以内, 降低电网侧滤波设备的设计难度与成本; 三是高效能量转换能力, 相比传统二极管整流 +DC/DC 变换的方案, 可减少功率变换环节的损耗, 提升充电桩整体能效。与此同时, 直流

充电桩的实际应用场景也对 Vienna 整流器提出明确性能要求: 在可靠性方面, 需适应户外高温、潮湿等复杂环境, 保证连续充电过程中无器件失效; 在电压适应能力上, 需兼容 10kV/35kV 等不同配网电压等级, 满足不同场景下的充电需求; 在动态响应特性上, 需快速应对电动汽车充电过程中负载的突变 (如充电模式切换、电池 SOC 变化), 避免输出电压波动影响充电安全性与电池寿命, 这些要求共同推动 Vienna 整流器在拓扑优化与控制策略上的持续创新。

2 Vienna 整流器损耗分析

2.1 损耗类型及产生机制

Vienna 整流器的损耗主要源于功率器件与无源元件的能量耗散, 可分为三大核心类型, 其产生机制与拓扑结构、器件特性紧密相关。首先是功率器件导通损耗, 该损耗产生于 IGBT、二极管等器件导通阶段, 由于器件存在固有导通电阻与正向压降, 当电流流经器件时, 会依据焦耳定律产生能量损耗, 具体表现为: IGBT 导通时, 集电极与发射极间的电压 (VCE) 随导通电流 (IC) 线性变化, 损耗功率可通过积分 VCE 与 IC 的瞬时乘积计算; 而续流二极管导通时, 正向压降 (VF) 基本恒定, 损耗主要由 VF 与导通电流的乘积决定, 且在充电桩高功率运行场景下, 导通电流峰值升高会显著放大此类损耗。其次是功率器件开关损耗, 该损耗发生在器件开通与关断的暂态过程中, 由于电压与电流无法瞬间突变, 二者会在暂态阶段出现交叠, 形成能量耗散。以 IGBT 开通过程为例, 从截止到导通的瞬间, 电流逐渐上升而电压缓慢下降, 二者交叠区域产生开通损耗; 关断过程中

电压先上升、电流后下降，同样形成关断损耗，且开关频率越高，暂态过程越频繁，开关损耗占比越高。最后是无源元件损耗，主要包括电感损耗与电容损耗：电感损耗由磁滞损耗与铜损构成，磁滞损耗源于铁芯材料在交变磁场中反复磁化产生的能量耗散，铜损则是电感绕组电阻在电流作用下的焦耳损耗；电容损耗主要来自等效串联电阻（ESR），当电流流经电容时，ESR 会产生热量，尤其在高频工况下，ESR 随频率升高而增大，进一步加剧损耗。

2.2 影响损耗的关键因素

Vienna 整流器的损耗水平受多方面因素调控，其中开关频率、电流特性与器件参数是最为关键的三大影响因素，其作用机制直接决定损耗分布与总量。首先是开关频率，开关频率对损耗的影响呈现差异化特征：对于开关损耗，频率升高会导致器件开关次数增加，暂态交叠过程更频繁，使得开关损耗与频率呈近似线性增长关系，例如当频率从 10kHz 提升至 20kHz 时，开关损耗可能翻倍；而对于导通损耗，频率升高会使电流纹波增大，但导通时间缩短，整体导通损耗变化相对平缓，仅在高频段因纹波过大出现小幅上升。其次是电流大小与波形，电流大小对导通损耗起决定性作用，导通损耗与电流平方近似成正比，当充电桩输出功率提升导致整流器输入电流从 50A 增至 100A 时，导通损耗可能增至原来的 4 倍；电流波形则主要影响谐波损耗，若电流波形畸变严重（如 THD 超过 10%），会产生额外的谐波电流，不仅加剧电感磁滞损耗与铜损，还会使功率器件承受非正弦电流，导致导通损耗进一步增加。最后是器件参数，器件固有参数直接影响损耗基准：对于 IGBT，导通电阻越小，导通压降越低，导通损耗越小；开关时间越短，暂态电压电流交叠时间越短，开关损耗越小，高速 IGBT 的开关损耗可比普通 IGBT 低 30%–40%；对于二极管，正向压降越小，导通损耗越小；对于电感与电容，铁芯磁导率越高，磁滞损耗越小，绕组导线截面积越大，铜损越小，电容 ESR 越低，电容损耗越小。

3 面向直流充电桩的 Vienna 整流器损耗抑制策略

3.1 调制策略优化

空间矢量脉宽调制（SVPWM）技术是 Vienna 整流器常用的调制方式之一，其原理基于电压空间矢量的概念，将期望输出电压映射到空间矢量平面内。通过精准选择合适的基电压矢量，并调整其作用时间比例，合成目标电压矢量。

在一个开关周期内，SVPWM 算法首先依据输入的三相电流与电压信号，计算出目标参考电压向量。接着，判断参考电压位于六边形区域中的具体扇区。随后，依据参考电压位置，精确计算两个基本电压矢量及其零矢量的作用时间占比。最终，按照时间分配结果生成 PWM 控制信号驱动开关管。相较于传统的正弦脉宽调制（SPWM），SVPWM 的直流电压利用率更高，能使输出电流更接近正弦波，有效降低电流纹波。这不仅减少了电感、电容等无源元件因电流纹波产生的额外损耗，也降低了功率器件因电流畸变承受的应力，间接抑制了开关损耗与导通损耗。

非连续脉宽调制（DPWM）同样是一种有效的损耗抑制调制策略，DPWM 通过在特定时段钳位调制波，使某些开关管保持固定状态，减少开关动作次数。在三相 Vienna 整流器中，DPWM 可依据中点电位等参数调整小矢量的作用顺序与时间。例如，在中点电位不平衡时，通过对小矢量的合理配置，使中点电位维持在允许范围内，同时降低开关损耗。具体实现过程中，DPWM 控制器会根据采样得到的三相电网电压、电感电流以及母线电压等信号，经过一系列变换与计算，确定每个大扇区中各个小扇区的钳位模式以及对应的矢量作用序列。与连续调制策略相比，DPWM 在不影响系统性能的前提下，可显著减少开关管的开关次数，尤其在高功率、高开关频率的直流充电桩应用场景中，对降低开关损耗效果显著，能有效提升整流器的效率。

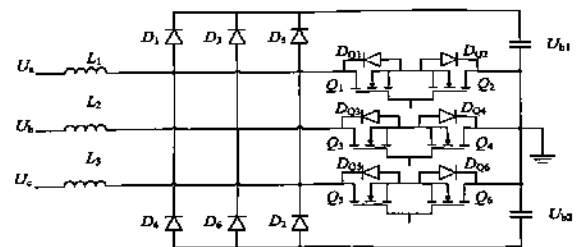


图 1 Vienna 整流器电路设计图

3.2 控制策略改进

控制策略改进是提升 Vienna 整流器在直流充电桩中损耗抑制效果的核心路径，通过优化系统动态响应与开关状态决策，可在保证输出稳定性的同时减少能量耗散。双闭环控制作为基础且高效的控制方式，通过电压外环与电流内环的协同工作实现损耗优化：电压外环以充电桩直流侧目标电压为基准，对比实际输出电压后生成电流参考值，确保充电电压稳定的同时避免因电压波动导致的额外损耗；电流内环则跟踪该参考值，实

时调整输入电流波形,使其逼近正弦波,减少电流谐波带来的电感铜损、磁滞损耗及功率器件导通损耗,尤其在充电桩负载变化(如电动汽车电池SOC上升)时,能快速响应电流需求变化,避免因电流超调或畸变产生的多余损耗。

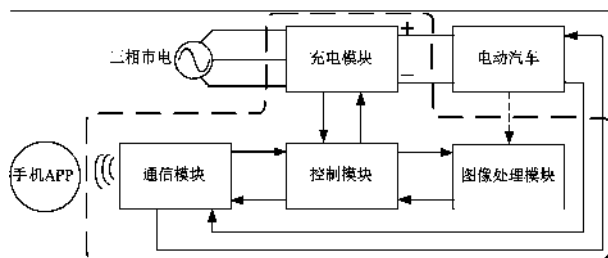


图2 智能直流充电桩示意图

模型预测控制凭借“预测-评估-决策”的闭环逻辑,为损耗抑制提供更精准的控制方案:其基于Vienna整流器的数学模型,预测未来多个时刻的系统状态(如电感电流、母线电压),并以“损耗最小化”为目标函数,遍历所有可能的开关状态组合,筛选出使损耗最优的开关指令,直接驱动功率器件动作,这种方式可跳过传统控制中的调制环节,减少中间过程的能量损失,同时在应对充电桩复杂工况(如电网电压波动、负载突变)时,能快速调整控制策略,避免因暂态过程延长导致的损耗增加。此外,滑模变结构控制等先进策略也在逐步应用,通过设计滑模面使系统状态快速收敛至期望轨迹,减少动态过程中的损耗,而模糊控制则可结合工程师经验与实际工况,动态调整控制参数,在不同充电阶段(如恒流、恒压阶段)适配最优控制逻辑,进一步降低损耗,这些改进后的控制策略共同为Vienna整流器在直流充电桩中的高效运行提供了保障。

器件选型与优化是从硬件层面降低Vienna整流器损耗的关键手段,通过匹配直流充电桩的功率需求与工况特性,选择适配的器件并优化其工作环境,可直接减少能量耗散。在功率器件选型上,需优先考虑低导通损耗与开关损耗的器件:对于IGBT,应选择导通电阻小、开关时间短的型号,较小的导通电阻能降低电流流经器件时的焦耳损耗,而较短的开关时间可减少开通与关断暂态中电压、电流交叠产生的损耗,尤其适配充电桩高功率充电场景下的大电流工况;对于续流二极管,低正向压降的特性至关重要,正向压降越小,导通阶段的能量损耗越少,同时需兼顾二极管的反向恢复特性,避免反向恢复电流过大引发额外损耗。

无源元件的选型同样影响损耗水平,电感应选用高磁导率、低损耗的铁芯材料,减少磁滞损耗与涡流损耗,同时

优化绕组导线的截面积与材质,降低铜损,以适配充电桩运行中电感电流频繁变化的工况;电容则需选择等效串联电阻小的型号,减少充放电过程中因电阻产生的热量损耗,保障直流侧电压稳定的同时降低额外能耗。此外,器件布局与散热设计的优化也不可或缺:合理规划PCB板上功率器件、电感、电容的布局,缩短电流回路长度,减少寄生电感与寄生电阻,避免因寄生参数引发的附加损耗;采用高效的散热方案,如加装散热片、风扇或使用液冷系统,及时带走功率器件工作中产生的热量,防止器件因温度升高导致导通电阻增大、损耗加剧,尤其在充电桩长时间连续充电的高负荷场景下,良好的散热能维持器件稳定工作状态,进一步抑制损耗增长,为Vienna整流器高效运行提供硬件支撑。

4 结束语

综述,本文围绕直流充电桩中Vienna整流器的损耗抑制展开研究,通过剖析损耗类型与影响因素,从调制优化、控制改进、器件选型三大维度提出针对性策略:SVPWM与DPWM的灵活应用降低开关损耗,双闭环与模型预测控制优化动态损耗,低损耗器件选型与散热设计从硬件端抑制能耗。多策略协同可有效提升整流器效率,适配充电桩复杂工况,为新能源充电基础设施的高效化发展提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 刘志峰,蒋浩,刘贺,等.基于VMD、PTSMFE与GWO-SVM的直流充电桩电源模块故障诊断方法研究[J].中国测试,2025,51(08):87-97.
- [2] 黄杰,杨文才,胡雨轩,等.直流充电桩直流接触器故障原因和处理措施[J].农村电工,2025,33(07):33-34.
- [3] 严庆增,刘晔,孙百强,等.基于DSOGI-PLL的无滤波器参数Vienna整流器电流过零点畸变抑制策略[J].实验技术与管理,2025,42(07):134-142.
- [4] 金凯.适用于电动汽车充电桩的直流变换器系统设计[D].杭州电子科技大学,2025.
- [5] 周金博,刘超.基于自抗扰的多VIENNA整流器谐振现象抑制策略[J].电气自动化,2024,46(06):89-92.

作者简介:邱志卓(1992.4—),男,汉族,江西赣州人,华东交通大学硕士研究生,江西应用技术职业学院讲师,主要研究方向:电力电子技术。

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目《基于APFC的直流充电桩整流技术研究》(项目编号:GJJ204915)。