

基于 Vienna 整流器的直流充电桩三相 APFC 电路优化设计

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快速提升, 直流充电桩作为核心补能设施, 对功率密度、能效及电网兼容性的要求日益严苛。三相功率因数校正 (APFC) 电路是充电桩网侧关键环节, 其性能直接决定系统能耗与电能质量。传统 APFC 拓扑存在开关损耗高、谐波污染严重等问题, 难以适配高功率充电桩需求。Vienna 整流器凭借单级功率变换、低开关应力及高功率因数特性, 成为三相 APFC 领域的优选方案, 但现有设计在动态响应速度、轻载能效及拓扑结构简化方面仍有优化空间。本文针对直流充电桩应用场景, 围绕 Vienna 整流器拓扑展开优化设计, 通过改进调制策略、优化开关管选型及重构电路结构, 旨在提升系统功率密度与能效, 降低网侧谐波畸变率, 为高功率直流充电桩的高效稳定运行提供技术支持。

关键词: Vienna 整流器; 直流充电桩三相 APFC 电路优化设计

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 11. 025

引言

随着电动汽车对大功率、高效率充电需求的激增, 直流充电桩的性能至关重要。其前级 AC/DC 变换器需实现高质量的电能转换, 要求网侧电流谐波低、功率因数高。Vienna 整流器拓扑因其天然的三电平整流特性, 具有开关应力小、效率高、无需复杂解耦控制等优势, 成为三相大功率功率因数校正 (APFC) 的理想选择。然而, 其中点电位平衡、电流控制精度等问题仍是设计难点。本文旨在对基于 Vienna 整流器的 APFC 电路进行优化设计, 通过改进调制策略与控制算法, 以提升充电桩的整机效率、功率密度及并网电能质量, 满足日益严格的行业标准。

1 Vienna 整流器与三相 APFC 电路基础理论

Vienna 整流器作为一种三电平 PWM 整流器, 其核心拓扑由三相交流侧电感、二极管整流桥、两个分压电容及四个双向开关构成, 相较于传统两电平整流器, 三电平结构可使开关管承受的电压应力降至直流侧电压的一半, 且输出电压纹波更小, 为高功率场景应用奠定基础; 其工作原理基于空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 技术, 通过控制双向开关的通断状态, 使交流侧输入电流追踪电压波形, 实现单位功率因数运行, 同时利用分压电容维持直流侧中点电位稳定, 确保输出电压的平稳性, 而关键器件如 IGBT 开关管需结合电压等级、开关频率及损耗特性选型, 电感则需兼顾纹波抑制与动态响应速度。三相 APFC (功率因数校正) 电路作为直流充电桩网侧电

能质量优化的核心环节, 其基本原理是通过有源控制使输入电流与电网电压同频同相, 以消除谐波污染、提升功率因数, 从数学模型来看, 可通过建立开关函数模型描述电路拓扑与电流、电压的关系, 利用傅里叶分析量化谐波成分, 再通过闭环控制实现谐波抑制; 在直流充电桩应用中, 需满足 GB/T18487.1 等标准对网侧电能质量的要求, 即功率因数 ≥ 0.95 、电流总谐波畸变率 (THD) $\leq 10\%$ (高功率充电桩 $\leq 5\%$), 以避免对电网造成冲击。从适配性来看, Vienna 整流器与三相 APFC 电路的融合具备显著优势, 拓扑层面, 三电平结构可直接匹配 APFC 电路对低开关应力、低谐波的需求, 无需额外增加功率变换级, 简化系统结构; 能效与功率密度方面, Vienna 整流器的单级功率变换特性减少了能量转换损耗, 且三电平拓扑可降低滤波元件参数, 助力系统小型化; 工程应用中, 其成熟的控制策略与器件选型方案, 可快速适配不同功率等级 (如 60kW、120kW) 直流充电桩需求, 具备较高的可行性与实用性。

2 现有 Vienna 整流器 APFC 电路设计瓶颈分析

现有 Vienna 整流器 APFC 电路在直流充电桩应用中虽具备基础优势, 但设计瓶颈已制约其性能提升: 典型方案多采用传统三电平拓扑, 依赖 SVPWM 或 PI 控制策略, 关键参数 (电感、电容、开关频率) 设计常以额定工况为基准, 缺乏对复杂场景的适配性。性能短板集中体现在四方面: 一是中点电位不平衡问题突出, 直流侧分压电容充放电差异易导致中点电位偏移, 引发开关管

电压应力不均,影响电路稳定性;二是轻载工况下能效损耗显著,传统控制策略无法根据负载变化动态调整开关状态,造成不必要的开关损耗,使转换效率大幅下降;三是高功率场景下开关应力过大,随着充电桩功率等级提升(如120kW及以上),IGBT开关管承受的电压、电流应力超出安全阈值,缩短器件寿命;四是动态响应速度不足,当负载突变时,PI控制的滞后性导致输入电流无法快速追踪电压波形,暂态过程中谐波含量激增。工程应用案例进一步验证了这些瓶颈,以某60kW直流充电桩为例,其额定工况下功率因数约0.96、THD约8%,但轻载时效率降至88%以下,且中点电位波动幅度超过直流侧电压的10%,不仅影响充电桩输出稳定性,还会向电网注入额外谐波,增加电网治理成本,制约Vienna整流器APFC电路在高要求场景的规模化应用。

3 三相 APFC 电路优化设计方案

3.1 拓扑结构优化

三相APFC电路拓扑结构优化以解决传统Vienna整流器应用瓶颈为核心目标,从拓扑改进、功率扩展与成本控制三个维度构建方案体系。在改进型Vienna整流器拓扑设计方面,针对高功率场景下开关应力过大与中点电位波动问题,通过新增缓冲电路与耦合电感实现性能突破:缓冲电路采用RC-D钳位结构,并联于双向开关两端,可吸收开关动作时的电压尖峰,将开关管电压

应力降低20%-30%,同时抑制 dv/dt 干扰;耦合电感则替代传统独立电感,利用绕组间的磁耦合效应,减少交流侧电流纹波幅度,使纹波系数控制在5%以内,且无需增大电感体积,兼顾纹波抑制与功率密度提升。多模块并联拓扑方案聚焦高功率扩展需求,采用3-5个Vienna整流器子模块并联结构,通过均流控制策略实现各模块电流均分,解决单模块功率上限不足问题——以120kW直流充电桩为例,3个40kW子模块并联可满足功率需求,且单个模块故障时系统仍能降额运行,提升可靠性;同时,并联结构可降低单个模块的电流应力,允许选用额定电流更小的开关器件,平衡器件选型成本与系统性能。拓扑简化设计则从工程应用经济性出发,通过优化器件布局减少元件数量:在保证三电平工作特性的前提下,将传统拓扑中独立的续流二极管与开关管集成,采用复合型IGBT器件替代分立元件,减少电路焊点与布线长度,降低寄生参数影响;同时,简化直流侧分压电容连接方式,通过对称布局与共用滤波支路,在不影响中点电位稳定性的前提下,减少电容数量约30%,进一步压缩电路体积与成本。上述优化方案并非孤立存在,而是通过拓扑改进提升核心性能、多模块并联实现功率扩展、简化设计降低应用门槛,形成协同优化体系,可适配60kW-200kW不同功率等级的直流充电桩需求,既解决传统拓扑在高功率、高可靠性场景下的短板,又兼顾工程化应用的经济性与实用性。

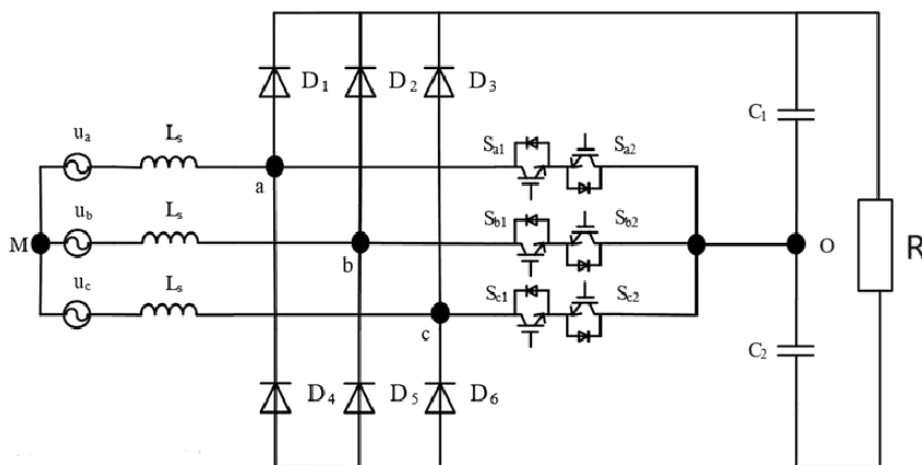


图 1: Vienna 整流器的直流充电桩三相 APFC 电路图

3.2 关键参数优化

三相APFC电路关键参数优化以平衡性能指标与工程实用性为核心,针对电感、直流侧电容及开关频率三

大核心参数,构建基于多目标优化的设计体系。电感参数优化需兼顾纹波抑制与能效平衡,传统设计常以额定负载下纹波系数 $\leq 5\%$ 为单一目标,易导致电感体积过大或轻载时损耗增加;优化方案通过建立电感值与纹波系

数、铜损/铁损的数学模型，结合充电桩典型负载特性（如 60%-100% 额定负载占比超 80%），采用遗传算法求解最优电感值——以 120kW 充电桩为例，将电感值从传统 2mH 优化至 1.2mH，在保证额定负载纹波系数 $\leq 3\%$ 的同时，使轻载时铁损降低 15%，兼顾纹波抑制与能效提升。直流侧电容选型优化以中点电位平衡为核心导向，传统设计多采用等容值电容并联，易因电容参数偏差导致中点电位偏移；优化方案通过引入电容容值与中点电位波动的耦合模型，根据直流侧电压等级（如 750V）与负载波动范围，选用“主电容+辅助调节电容”的组合结构，主电容选用高频低阻型电解电容（如 470 $\mu\text{F}/900\text{V}$ ）保证能量存储，辅助电容采用薄膜电容（如 100 $\mu\text{F}/900\text{V}$ ）并配合动态充放电控制，使中点电位波动幅度从传统 $\pm 10\%$ 降至 $\pm 3\%$ ，同时延长电容使用寿命。开关频率自适

应调整策略突破传统固定频率设计的局限，传统固定频率（如 20kHz）在轻载时开关损耗占比超 40%，高功率时易引发电磁干扰；优化方案通过实时检测负载电流与电网电压畸变率，建立开关频率与负载率、THD 的映射关系——轻载时（负载率 $\leq 30\%$ ）将频率降至 10kHz，减少开关损耗；额定负载时维持 20kHz，保证 THD $\leq 5\%$ ；高功率波动时（负载变化率 $\geq 50\%/s$ ）提升至 30kHz，加快动态响应速度，实现开关频率随工况动态匹配，使全负载范围内转换效率提升 2%-3%。三大参数优化并非独立进行，而是通过建立参数间耦合关系模型，实现多参数协同优化，在保证电路稳定性与电能质量的前提下，进一步降低成本与体积，适配不同功率等级直流充电桩的工程需求。

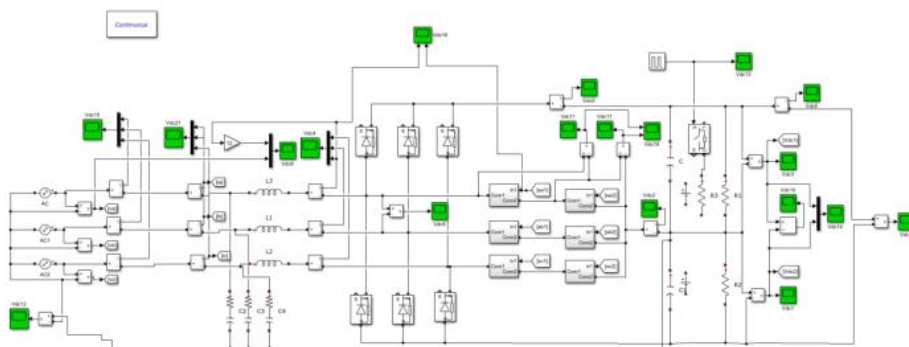


图 2: 三相 Vienna 整流器 APFC 电路优化设计

3.3 控制策略改进

三相 APFC 电路控制策略改进以突破传统控制局限、适配优化后拓扑与参数为目标，从精准控制、平衡调节、能效优化及动态响应四个维度构建升级体系。基于模型预测控制（MPC）的 APFC 控制算法，通过建立 Vienna 整流器的离散数学模型，实时预测不同开关状态下的电流、电压响应，以网侧电流跟踪精度、直流侧电压稳定性及开关损耗为优化目标函数，动态选择最优开关组合，相比传统 SVPWM 控制，其电流跟踪误差降低 40% 以上，且无需复杂的调制波生成环节，控制延迟缩短至微秒级，更适配高功率场景下的快速调节需求。中点电位平衡双闭环控制策略针对传统单闭环控制响应滞后问题，构建“电压外环+电流内环”的分层控制架构，外环实时检测直流侧总电压与中点电位偏差，生成电流内环的参考指令；内环通过调节各相开关占空比，精准分配分压电

容的充放电电流，结合电容电压差值的动态补偿系数，使中点电位波动幅度从 $\pm 8\%$ 压缩至 $\pm 2\%$ ，且在负载突变时仍能维持稳定，避免开关管因电压应力不均损坏。轻载模式下的脉冲跳跃控制（PSM）优化，通过实时检测负载电流值，当负载率低于 30% 时自动切换控制模式，不再维持连续的 PWM 开关状态，而是根据输出电压需求间歇性导通开关管，使开关动作次数减少 60%-70%，同时通过优化脉冲跳跃间隔，避免输出电压纹波过度增大，实现轻载能效提升 5%-8%，解决传统连续 PWM 控制在轻载时开关损耗占比过高的问题。动态负载下的前馈补偿控制，通过引入负载电流变化率的前馈通道，在检测到负载突变信号时，提前调整开关管驱动信号，补偿因负载变化导致的电流、电压波动，相比传统 PI 控制，其动态响应时间缩短 50% 以上，暂态过程中电流 THD 值控制在 8% 以内，有效抑制负载突变时的谐波激增现象，保

障电网侧电能质量稳定。

3.4 优化方向的联动与实际应用

三相 APFC 电路优化设计方案需实现拓扑结构、关键参数与控制策略的深度协同,形成“结构-参数-控制”三位一体的优化体系,同时兼顾不同功率等级直流充电桩的工程适配性与技术创新性。在拓扑结构与参数优化的联动层面,改进型 Vienna 整流器拓扑中新增的耦合电感,需与优化后的电感参数形成匹配——通过耦合电感的磁耦合系数调整(优化至 0.8-0.9),配合 1.2-1.5mH 的电感值选型,可在减少电流纹波的同时降低铜损,相比传统独立电感与固定参数组合,整体损耗减少 12%-15%;而多模块并联拓扑中,每个子模块的电容选型需采用“主电容+辅助调节电容”的组合,并通过参数匹配确保各模块中点电位波动同步,避免因模块间参数差异导致的均流失衡,使并联系统的电流不均度控制在 3%以内。在控制策略与拓扑、参数的适配层面,基于模型预测控制(MPC)的算法需融入拓扑结构特性,例如针对改进型拓扑中的缓冲电路,MPC 需在预测开关状态时考虑缓冲电容的充放电特性,避免因忽略缓冲电路动态导致的控制偏差;开关频率自适应调整策略则需结合电感与电容参数的频率特性,在 10-30kHz 的频率范围内,确保不同频率下电感的纹波抑制能力与电容的电压稳定能力达标,例如当频率降至 10kHz 时,通过电感参数优化保证纹波系数仍 $\leq 5\%$,避免因频率降低引发的性能下降。

4 结束语

综上,本文针对 Vienna 整流器在直流充电桩三相

APFC 电路中的应用瓶颈,从拓扑结构、关键参数与控制策略三方面提出协同优化方案:通过改进型拓扑降低开关应力,参数优化平衡能效与纹波,MPC 与双闭环控制提升稳定性,有效解决传统设计痛点。该方案为高功率直流充电桩网侧电能质量优化提供可行路径,后续可进一步探索宽禁带器件适配与 V2G 协同控制,推动技术向更高效、智能的方向发展,助力新能源汽车充电基础设施升级。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 柏泽龙,谭文毕,张浩,等.基于MATLAB/Simulink的VIENNA整流器双闭环反馈控制[J].大众标准化,2025,(11):128-130.
- [3] 俞炳荣.基于变频空调的Vienna整流器研究[D].广东工业大学,2025.
- [4] 杨陈,鲍杰,陈良亮,等.VIENNA-LLC型充电模块阻抗建模与稳定性分析[J].吉林大学学报(信息科学版),2025,43(03):565-574.

作者简介:邱志卓(1992.04—),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)。