

充电桩功率模块的效率优化与设计

赵乾坤

深圳市安和威电力科技股份有限公司 广东 深圳 518116

摘要: 本文通过分析影响其效率的因素,如功率变换拓扑、功率器件特性、磁性元件设计及散热设计等,提出了一系列针对性的优化方法。涵盖软开关技术应用、数字控制技术引入以及功率因数校正技术实施等策略。以120kW直流充电桩功率模块为实例,从硬件、软件及散热设计全方位阐述优化方案。

关键词: 充电桩功率; 功率器件特性; 散热设计

引言: 随着电动汽车的蓬勃发展,充电桩作为关键配套设施,其性能备受关注。充电桩功率模块作为核心部件,承担着将交流电转换为适合电动汽车电池充电的直流电的重任。然而,当前功率模块在效率方面存在诸多问题,如能量转换损耗大、功率因数低等,严重制约了充电桩的性能和电动汽车的推广。

1 充电桩功率模块概述

1.1 功率模块的功能与作用

充电桩功率模块主要负责将电网的交流电转换为适合电动汽车电池充电的直流电。它需要具备高效率的电能转换能力,以减少能量在转换过程中的损耗;同时要能够稳定地输出不同电压和电流等级,以满足不同类型电动汽车电池的充电需求。此外,还需具备良好的电气隔离性能,确保充电过程中的安全性。

1.2 常见的功率模块类型

目前市场上常见的充电桩功率模块类型包括基于硅基功率器件的模块和采用碳化硅等新型功率器件的模块。硅基功率器件如绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)等,具有成熟的技术和较低的成本,在传统充电桩中应用广泛。而碳化硅(SiC)功率器件由于具有宽禁带、高击穿场强、高饱和电子漂移速率等优异特性,能有效提高功率模块的效率和功率密度,逐渐在高压快充等高端充电桩领域得到应用。

2 影响充电桩功率模块效率的因素

2.1 功率变换拓扑

常用拓扑结构介绍

常见的充电桩功率模块功率变换拓扑有反激式、正激式、半桥、全桥等。反激式拓扑结构简单、成本低,但功率等级较低,适用于小功率充电桩;正激式拓扑在一定程度上克服了反激式的缺点,可应用于中等功率场合;半桥和全桥拓扑则常用于大功率充电桩,能够实现

更高的功率转换效率和更好的电气性能。

不同拓扑对效率的影响分析

不同的功率变换拓扑在效率方面存在显著差异。以全桥和半桥拓扑为例,全桥拓扑在相同功率等级下,由于其开关管的电流应力相对较小,且能更好地利用电源电压,所以在转换效率上通常优于半桥拓扑^[1]。但是,全桥拓扑的控制复杂度和成本相对比较高。此外,拓扑结构中的寄生参数如电感的内阻、电容的等效串联电阻等,也会对效率产生影响,这些寄生参数会在功率转换过程中产生额外的能量损耗,降低模块的整体效率。

2.2 功率器件特性

硅基与碳化硅器件对比

硅基功率器件在充电桩领域应用历史比较长,技术成熟,成本相对较低。比如IGBT在中大功率充电桩中应用广泛,但是导通电阻和开关损耗相对较大,在高频应用时,能量损耗比较明显。碳化硅功率器件会有明显的优势,如碳化硅MOSFET的导通电阻比同规格硅基MOSFET低很多,开关速度快,开关损耗小。这使得在相同功率和频率条件下,采用碳化硅器件的功率模块能够显著降低能量损耗,提高效率。碳化硅器件还能承受更高的温度和电压,有利于提高充电桩的功率密度和可靠性。

2.3 器件参数对效率的影响

功率器件的参数如导通电阻、开关时间、反向恢复电荷等对充电桩功率模块效率有着直接影响。导通电阻决定了器件在导通状态下的功率损耗,导通电阻越低,通态损耗越小。开关时间包括开通时间和关断时间,开关时间越短,开关过程中的能量损耗就越小。反向恢复电荷是指二极管在反向恢复过程中释放的电荷量,反向恢复电荷越大,反向恢复过程中的能量损耗就越大,会降低功率模块的效率,并且可能产生较大的电磁干扰。

2.4 磁性元件设计

磁芯材料的选择

磁性元件如变压器、电感等是充电桩功率模块中的重要组成部分。磁芯材料的选择对磁性元件的性能和效率有着关键影响^[2]。常见的磁芯材料有铁氧体、非晶合金、纳米晶合金等。铁氧体磁芯具有较高的磁导率和电阻率，价格相对较低，在中低频段应用广泛；非晶合金和纳米晶合金磁芯则具有更低的磁滞损耗和高饱和磁感应强度，更适合在高频、大功率场合使用。比如在高频开关电源中，采用纳米晶合金磁芯的电感能够有效降低磁滞损耗和涡流损耗，提高电感的效率和功率密度。

绕组设计与优化

绕组的设计包括匝数、线径、绕制方式等方面。合理的匝数设计能够确保磁性元件的电感量满足电路要求，同时避免因匝数过多或过少导致的能量损耗增加。线径的选择要考虑电流承载能力，过细的线径会导致导线电阻增大，产生较大的铜损；而线径过大则会增加成本和体积。绕制方式也会影响绕组的性能，如采用多层绕制时，层间电容会增加，可能导致高频下的能量损耗增大。所以，通过优化绕制方式，如采用交错绕制、分段绕制等方法，可以降低层间电容，减少高频损耗。

2.5 散热设计

功率模块发热原理

在充电桩功率模块工作时，功率器件的导通电阻、开关损耗以及磁性元件的磁滞、涡流损耗，都会产生大量热量。若热量无法及时散发，功率模块温度升高，会使功率器件性能下降、寿命缩短。比如功率器件导通电阻随温度升高而增大，进一步增加通态损耗，形成恶性循环，温度过高还可能损坏器件，导致充电桩无法工作。

散热方式与措施

常见散热方式有自然散热、风冷和液冷。自然散热适用于小功率、发热量小的模块，它结构简单、成本低，但散热效果有限。风冷依靠风扇强制空气流动带走热量，散热效率较高，应用广泛。液冷则利用液体作为冷却介质，散热能力强，能满足大功率模块的散热需求。在实际设计中还可通过安装散热片增大散热面积，采用导热硅脂、铜基板等导热材料提高传导效率，以此增强散热效果。

3 充电桩功率模块效率优化方法

3.1 软开关技术应用

软开关原理

软开关技术是一种通过在开关过程中创造零电压开通（ZVS）或零电流关断（ZCS）条件，来减少开关损耗的技术。以零电压开通为例，在开关管开通前，通过辅助电路使开关管两端的电压降为零，这样在开关管开通时，

就不会产生因电压和电流的重叠而导致的开通损耗^[3]。零电流关断则是在开关管关断前，使流过开关管的电流降为零，从而避免关断损耗。

常见软开关电路拓扑

常见的软开关电路拓扑有谐振式软开关电路、准谐振式软开关电路和移相全桥软开关电路等。谐振式软开关电路通过在主电路中引入谐振电感和电容，使开关管在谐振状态下实现软开关；准谐振式软开关电路则是在部分时间段内使电路工作在谐振状态，以实现软开关；移相全桥软开关电路通过控制全桥电路中开关管的导通相位差，实现开关管的零电压开通和零电流关断，在大功率充电桩功率模块中应用较为广泛。

3.2 数字控制技术

数字控制优势

与传统的模拟控制相比，数字控制技术具有更高的精度和灵活性。数字控制系统可以通过软件编程实现复杂的控制算法，能够根据不同的工作条件和充电需求，精确地控制功率模块的输出电压和电流。数字控制还有更好的抗干扰能力，能够提高系统的稳定性和可靠性。比如，在充电桩功率模块中，数字控制系统可以实时监测电池的充电状态，根据电池的荷电状态（SOC）动态调整充电电流和电压，实现最佳的充电效果。

基于数字信号处理器（DSP）的控制策略

数字信号处理器（DSP）是一种专门用于数字信号处理的微处理器，能高速运算能力和丰富的外设资源。在充电桩功率模块中，基于DSP的控制策略可以实现对功率变换拓扑的精确控制。比如通过DSP可以实现对全桥拓扑中开关管的PWM（脉冲宽度调制）控制，精确调节开关管的导通时间和关断时间，以实现高效率的功率转换。DSP也可以对功率模块的运行状态进行实时监测和保护，如过流保护、过压保护、过热保护等。

3.3 功率因数校正（PFC）技术

1PFC的作用

功率因数校正（PFC）技术的主要作用是提高充电桩功率模块输入电流的功率因数，使其接近1，同时降低输入电流的谐波含量。低功率因数会导致电网侧的无功功率增加，降低电网的传输效率，增加线路损耗。而高谐波含量的电流会对电网中的其他设备产生干扰，影响电网的正常运行。通过PFC技术，可以有效改善充电桩功率模块的输入特性，提高电能质量。

常用PFC拓扑与控制方法

常用的PFC拓扑有升压式（Boost）、降压式（Buck）、升降压式（Buck-Boost）等。其中，升压式PFC拓扑由于

其结构简单、功率因数高、易于控制等优点,在充电桩功率模块中应用最为广泛。控制方法主要有峰值电流控制、平均电流控制和滞环电流控制等。峰值电流控制通过检测电感电流的峰值来控制开关管的导通和关断,具有响应速度快的优点;平均电流控制则是通过控制电感电流的平均值,使输入电流跟踪输入电压,实现功率因数校正,其控制精度较高;滞环电流控制通过设置电流滞环比较器,使电感电流在一定范围内波动,实现对开关管的控制,具有简单可靠的特点。

4 充电桩功率模块设计实例

4.1 硬件设计

主电路设计

以一款额定功率为120kW的直流充电桩功率模块为例,主电路采用三相交错式LLC谐振变换电路结构^[4]。这种结构能够有效减小开关管的电压应力,提高整机的开关频率和功率密度。输入侧通过三相全波整流电路将三相交流电转换为高压直流电,然后经过LLC谐振变换器进行DC/DC变换,输出适合电动汽车电池充电的直流电。在主电路中,选用合适的功率器件,如采用SiC MOSFET作为开关管,以降低导通损耗和开关损耗。还要合理设计电感、电容等元件的参数,确保谐振电路的性能最优。

检测与保护电路设计

为了确保功率模块的安全稳定运行,设计了完善的检测与保护电路。检测电路包括输入电流、输入电压、输出电流、输出电压等检测环节,通过高精度的传感器采集信号,并将其传输给控制电路进行处理。保护电路则包括过流保护、过压保护、欠压保护、过热保护等功能。在过流保护方面,当检测到输入或输出电流超过设定阈值时,立即触发保护电路,关断开关管,避免功率器件因过流而损坏。

驱动电路设计

驱动电路负责为功率器件提供合适的驱动信号,确保其正常工作。在本设计中,采用专门的驱动芯片,并结合光耦隔离技术,实现控制电路与主电路的电气隔离。通过优化驱动电路的参数,如驱动电压、驱动电流、驱动电阻等,提高功率器件的开关速度,减小开关损耗。

4.2 软件设计

系统主控制程序设计

系统主控制程序采用数字信号处理器(DSP)进行控制。在DSP上电后,首先完成系统初始化,包括I/O口初始化、A/D转换模块初始化、EPWM模块初始化、A/D

中断初始化等。初始化完成后,系统进入待机状态,等待充电命令。当接收到充电命令后,系统开始执行充电流程,通过A/D中断服务程序实时采集输入输出信号,并根据预设的控制算法计算出PWM信号的占空比,通过EPWM模块输出PWM信号,控制开关管的导通和关断,实现对充电过程的精确控制。

控制算法实现

在软件设计中,采用了改进的数字PI调节算法,以实现输出电压和电流的稳定控制。同时,结合自适应控制策略,根据输入电压和负载的变化,实时调整PI参数,提高系统的动态响应性能和控制精度。此外,还实现了最大功率点跟踪(MPPT)算法,使功率模块在不同的输入条件下,始终能够以最大功率向电动汽车电池充电,提高能源利用效率。

4.3 散热设计

为了保证功率模块在高功率运行时的散热效果,采用液冷散热方式。设计了专门的液冷散热器,通过冷却液在散热器内部的循环流动,带走功率器件产生的热量。在散热器的结构设计上,优化了散热鳍片的形状和布局,增加散热面积,提高散热效率^[5]。在功率模块内部安装温度传感器,实时监测功率器件的温度,当温度超过设定阈值时,自动调整冷却液的流量和流速,确保功率器件的工作温度在安全范围内。

结束语:本文通过对各影响因素的分析和优化方法的应用,成功提升了功率模块的效率和性能。在硬件设计上,合理选择功率器件和电路拓扑,优化磁性元件和散热设计;软件设计中,采用先进控制算法,实现精准控制。但未来仍有提升空间,随着新型功率器件和控制技术的不断涌现,需持续探索创新,进一步提高功率模块效率,降低成本,以满足电动汽车快速发展的需求,助力构建绿色出行生态。

参考文献

- [1]张昌运.新能源充电桩控制电路板设计及性能优化[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(12):158-161.
- [2]张德新.新能源汽车充电桩充电效率优化技术研究[J].张江科技评论,2024(4):120-122.
- [3]张庙会.基于充电桩的储能系统设计与优化[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(7):0166-0169.
- [4]雷永峰,孙莉莉,王振玉.电动汽车直流充电桩电源模块研究与设计[J].现代电子技术,2022,45(9):170-174.
- [5]李雪城,赵成,仝霞,靳阳,潘全成.直流充电桩电能计量关键技术设计[J].自动化仪表,2024,45(1):53-58.