

基于电力电子的充电桩功率模块控制策略

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：本文探讨了电力电子技术在充电桩功率模块中的基础原理，分析了现有控制策略，并探索了新型控制策略。在基础原理部分，介绍了功率变换电路和开关器件的作用。现有控制策略包括经典控制策略和现代控制策略。新型控制策略则主要探讨了智能控制策略和复合控制策略。这些策略在充电桩功率模块控制中具有各自的优势和局限性，适用于不同的应用场景。

关键词：电力电子；充电桩；功率模块；控制策略

引言

随着电动汽车的普及，充电桩作为电动汽车的重要配套设施，其性能和控制策略的研究具有重要意义。电力电子技术在充电桩功率模块中发挥着关键作用，其控制策略直接影响充电效率、稳定性和安全性。因此，本文旨在深入探讨电力电子技术在充电桩功率模块中的基础原理和控制策略，为充电桩的优化设计和控制提供理论依据和技术支持。

1 电力电子技术在充电桩功率模块中的基础原理

1.1 功率变换电路

充电桩功率模块通常包含AC-DC变换电路，如采用二极管不控整流或PWM（脉冲宽度调制）整流技术。二极管不控整流结构简单，但输入电流谐波大，功率因数低。PWM整流则能实现输入电流正弦化，且可灵活调节功率因数。在DC-DC变换环节，常用的有Buck、Boost、Buck-Boost等基本拓扑，通过对开关器件的高频通断控制，实现电压的升降与稳定输出。不同拓扑结构适用于不同的应用场景，如Buck变换器适用于降压需求，Boost变换器适用于升压需求。

1.2 开关器件的作用

功率模块中的开关器件，如绝缘栅双极型晶体管（IGBT），是实现电能高效转换的关键。IGBT具有高电压、大电流承受能力以及快速的开关速度。在控制信号作用下，IGBT的导通与关断决定了功率变换电路中电流的流向与电压的变化。精确控制IGBT的开关时刻和导通时间，能够有效调节功率模块的输出功率与电压。

2 现有控制策略分析

2.1 经典控制策略

2.1.1 PI控制

比例积分（PI）控制是一种基于反馈控制原理的经典控制策略，在充电桩功率模块控制中应用广泛。其基本

原理是通过对输出电压或电流的实际值与给定参考值之间的误差进行比例和积分运算，生成相应的控制信号，进而调节开关器件的占空比，实现对输出电压或电流的稳定控制。比例环节的作用是根据误差的大小快速调整控制量，使输出能够尽快接近参考值；积分环节则用于消除系统的稳态误差，通过对误差的积分运算，不断积累控制量，直至稳态误差为零。

PI控制结构简单，易于理解和实现，在一定程度上能够满足充电桩功率模块的稳态性能要求。在系统处于稳定运行状态时，PI控制器能够通过不断调整控制量，使输出电压或电流稳定在给定参考值附近，具有较高的控制精度。然而，PI控制也存在一些明显的局限性。首先，它对系统参数的变化较为敏感，当系统参数发生变化时，如功率模块中的电感、电容值发生漂移，PI控制器的性能可能会受到较大影响，导致控制精度下降。其次，在动态响应方面，PI控制存在一定的滞后性，难以快速跟踪负载的突变。当电动汽车充电过程中负载突然变化时，PI控制器需要一定的时间来调整控制量，这可能会导致输出电压或电流出现较大的波动，影响充电的稳定性和安全性。

2.1.2 滞环控制

滞环控制是一种基于比较器的控制方法，在充电桩功率模块的电流或电压控制中具有独特的应用。其工作原理是将输出电流或电压与给定的滞环宽度内的参考值进行实时比较。当输出值超出滞环范围时，立即改变开关器件的状态，从而使输出值重新回到滞环范围内。例如，在电流滞环控制中，将输出电流与参考电流进行比较，当输出电流大于参考电流加上滞环宽度时，开关器件关断，使电流下降；当输出电流小于参考电流减去滞环宽度时，开关器件导通，使电流上升^[1]。通过这种方式，将输出电流限制在一个较小的滞环范围内波动。

滞环控制的显著优点是响应速度快，能够对输出电

流或电压的变化做出快速反应。在负载发生突变时,滞环控制器能够迅速调整开关器件的状态,使输出值尽快恢复到正常范围内,有效限制电流或电压的波动。然而,滞环控制也存在一些不可忽视的问题。由于其开关频率不固定,在不同的工况下,开关器件的开关频率会随着输出值与参考值的比较结果而变化,这会给系统带来较大的电磁干扰。较大的电磁干扰不仅会影响充电桩自身的性能和可靠性,还可能对周围的电子设备产生不良影响。此外,滞环控制在不同工况下的性能差异较大,当系统参数或负载特性发生变化时,滞环控制的效果可能会受到较大影响,难以保证系统的稳定运行。

2.2 现代控制策略

2.2.1 滑模变结构控制

滑模变结构控制是一种非线性控制策略,其核心思想是通过设计一个合适的滑模面,使系统的状态在滑模面上滑动,从而实现对系统的有效控制。在充电桩功率模块控制中,滑模面通常根据系统的输出变量及其导数来设计。当系统状态在滑模面上滑动时,系统具有对参数变化和外部干扰的强鲁棒性,能够保持稳定的运行状态。滑模变结构控制通过控制律的设计,使系统状态在有限时间内到达滑模面,并在滑模面上持续滑动。控制律的设计通常基于系统的数学模型和滑模面的特性,通过切换函数来改变控制量,使系统状态不断趋近滑模面。

滑模变结构控制对系统参数变化和外部干扰具有较强的鲁棒性,这是其显著的优势之一。在充电桩实际运行过程中,系统参数可能会由于温度变化、元件老化等原因发生变化,同时还可能受到电网电压波动、负载突变等外部干扰的影响。滑模变结构控制能够在这些不利因素存在的情况下,保持系统的稳定运行,确保输出电压和电流的稳定性。然而,滑模控制存在一个严重的问题,即抖振现象。抖振是由于控制律的不连续切换导致系统状态在滑模面附近高频振荡,抖振不仅会影响系统的稳定性和寿命,还可能产生额外的能量损耗和电磁干扰。为了抑制抖振,通常需要采取一些额外的措施,如采用边界层法、滑膜观测器等,但这些方法往往会增加系统的复杂性和成本。

2.2.2 模型预测控制

模型预测控制作为一种前沿的控制策略,其核心在于利用精确的系统数学模型预测未来状态,并通过优化目标函数来确定最优控制输入。在充电桩功率模块控制领域,这一策略展现出了巨大的潜力。为了实施模型预测控制,首先需要构建详尽的系统数学模型,涵盖功率变换电路、开关器件及负载特性等关键因素。这一模

型将作为预测和控制的基础,确保系统在不同工况下都能稳定运行。模型预测控制的优势在于其多目标优化能力,能够同时考虑输出电压和电流的精度、系统效率及电网谐波影响等多个性能指标。这种综合性的控制策略,使得充电桩在各种条件下都能保持良好的运行状态,提升了充电效率和用户体验。然而,模型预测控制也面临诸多挑战。一方面,充电桩功率模块的非线性、时变等复杂特性增加了建立准确数学模型的难度。另一方面,大量的计算需求对控制器的硬件性能提出了严格要求。如果控制器计算能力不足,可能导致控制延迟,进而影响系统性能。

3 新型控制策略探索

3.1 智能控制策略

3.1.1 模糊控制

模糊控制是一种基于模糊逻辑的智能控制策略,它将操作人员的经验和知识转化为模糊规则,用于控制系统的运行。在充电桩功率模块控制中,模糊控制通常以输入的电压、电流误差及其变化率等作为模糊输入量,通过模糊化将这些精确量转化为模糊量,然后根据预先制定的模糊规则进行模糊推理,得到模糊输出量,最后通过解模糊将模糊输出量转化为精确的控制信号,用于调节开关器件的占空比。模糊规则的制定是模糊控制的关键,它通常基于对充电桩工作过程的深入理解和实际操作经验。

模糊控制的优点在于不需要精确的数学模型,对系统参数变化和非线性因素具有较好的适应性。在充电桩功率模块中,由于存在各种不确定性因素,如元件参数的分散性、负载特性的变化等,模糊控制能够凭借其模糊推理机制,在这些复杂情况下保持较好的控制性能。然而,模糊控制也存在一些局限性。首先,模糊控制规则的制定依赖于操作人员的经验,缺乏自学习和自适应能力^[2]。当系统运行工况发生较大变化时,原有的模糊规则可能不再适用,需要人工重新调整规则,这增加了系统的维护成本和复杂性。其次,模糊控制在控制精度方面相对较低,难以满足对输出电压和电流精度要求极高的应用场景。

3.1.2 神经网络控制

神经网络具有强大的非线性映射能力和自学习能力,能够通过对大量数据的学习,建立输入与输出之间的复杂关系模型。在充电桩功率模块控制中,神经网络可以将输入的电压、电流、温度等多种信号作为输入层,通过隐藏层的非线性变换,输出用于控制开关器件的控制信号。神经网络的自学习能力使其能够根据系统

的实际运行数据不断调整自身的权重和阈值,以适应系统参数的变化和复杂的工况。

尽管神经网络控制具有诸多优势,但在实际应用中 also 面临一些挑战。首先,神经网络的训练过程较为复杂,需要大量的样本数据来训练网络,以确保其具有良好的泛化能力。获取和处理这些样本数据需要耗费大量的时间和精力,并且数据的质量和数量直接影响神经网络的性能。其次,神经网络结构的选择和训练参数的调整较为困难。不同的网络结构和训练参数对神经网络的性能有很大影响,需要通过大量的实验和优化来确定最优的网络结构和参数设置,这增加了系统设计的难度和成本。

3.2 复合控制策略

3.2.1 模糊PI控制

模糊PI控制是将模糊控制与PI控制相结合的一种复合控制策略,充分发挥了两者的优势。在系统运行初期,当系统状态与给定参考值之间的误差较大时,以模糊控制为主。模糊控制能够根据误差及其变化率的模糊信息,快速给出较大的控制量调整,使系统状态迅速接近参考值,具有较好的动态响应性能。当系统状态接近稳态时,切换到PI控制。PI控制能够利用其积分作用,消除系统的稳态误差,提高控制精度。通过这种切换机制,模糊PI控制既能够在动态过程中快速响应系统变化,又能够在稳态时保证较高的控制精度,实现了优势互补。

模糊PI控制在充电桩功率模块控制中具有广泛的应用场景。例如,在电动汽车快速充电过程中,充电初期电池电压较低,需要较大的充电电流,此时模糊控制能够快速调整充电电流,使电池迅速进入充电状态。随着充电过程的进行,电池电压逐渐升高,接近设定的充电终止电压时,切换到PI控制,能够精确控制充电电压,避免过充现象的发生,保证充电的安全性和稳定性。与单独使用PI控制或模糊控制相比,模糊PI控制能够显著提升系统的整体性能,在不同工况下都能实现较好的控制效果。

3.2.2 滑模变结构与神经网络复合控制

滑模变结构与神经网络复合控制是将滑模变结构控制的鲁棒性与神经网络的自学习能力相结合的一种新型控制策略。滑模变结构控制能够使系统对参数变化和外部干扰具有较强的鲁棒性,但存在抖振问题。神经网络通过学习系统的运行数据,能够实时估计系统的不确定性因素,并对滑模控制律进行调整,从而有效抑制抖振现象。同时,神经网络的自学习能力还能够使系统在运行过程中不断适应参数变化和工况变化,进一步增强系统的鲁棒性。

在充电桩功率模块面临复杂工况时,如电网电压波动较大、负载特性变化频繁等,滑模变结构与神经网络复合控制能够发挥其优势^[3]。例如,当电网电压突然下降时,滑模变结构控制能够迅速调整输出电压,保持稳定的充电电压,同时神经网络通过学习电网电压的变化规律,对滑模控制律进行优化,抑制抖振的产生,确保系统的稳定运行。与单一的滑模变结构控制或神经网络控制相比,这种复合控制策略在复杂工况下能够实现更好的性能表现,提高充电桩的可靠性和稳定性。

结束语

综上所述,充电桩功率模块的控制策略是确保充电效率、稳定性和安全性的关键。通过对现有控制策略的分析和新型控制策略的探索,可以为充电桩的设计和控制提供多种选择和优化方案。未来,随着技术的不断发展,充电桩的控制策略将更加智能化和自适应,为电动汽车的普及和发展提供更加可靠和高效的充电服务。

参考文献

- [1]丁晓伟,李志君.碳化硅器件在直流充电桩中的应用研究[J].电力电子技术,2020,54(3):121-122,126.
- [2]朱一昕,汪涛,熊连松.电动汽车充电模块并联控制策略研究[J].电力电子技术,2019,53(6):53-57.
- [3]阚志忠,潘毅,牛棚卿,等.单级三相谐波电流注入可升降压AC/DC变换器[J].电工电能新技术,2024,43(4):1-11.