

轨道交通客车供电系统中三相逆变器与充电器的协同优化

张 帝

青岛中车四方轨道车辆有限公司 山东青岛 266000

摘要：随着城市轨道交通的快速发展，客车的能源效率和供电系统的可靠性成为行业关注的焦点。本文旨在探讨轨道交通客车供电系统中三相逆变器与充电器的协同优化问题，以提高能源转换效率和系统稳定性。首先，分析了轨道交通客车的供电需求和现有供电系统的特点，指出了三相逆变器与充电器在系统中的作用及其面临的挑战。接着，通过对比不同逆变器和充电器的配置方案，提出了一种基于能量管理和控制策略的协同优化方法。该方法通过实时监测和调整充放电过程，实现了能量的高效利用和系统性能的最优化。最后，通过仿真实验验证了所提方法的有效性，结果表明，协同优化后的系统在保证客车正常运行的同时，显著提高了能源利用率和系统的整体性能。

关键词：轨道交通客车；三相逆变器；充电器；协同优化

引言

随着城市化进程的加快，轨道交通作为城市公共交通的重要组成部分，其安全性、可靠性和经济性受到了广泛关注。在轨道交通客车供电系统中，三相逆变器和充电器作为核心部件，对整个系统的稳定性和效率起着决定性作用。本研究旨在探讨三相逆变器与充电器的协同优化问题，以提升轨道交通客车的供电性能，确保其在各种工况下的高效运行。

一、轨道交通客车供电系统的关键技术

（一）供电系统的基本组成

轨道交通客车的供电系统是确保列车正常运行的关键基础设施，其基本组成包括牵引供电系统、辅助供电系统以及紧急备用电源系统。牵引供电系统负责为列车提供动力，辅助供电系统则为列车上的照明、空调、信息传输等非牵引负荷提供电能，而紧急备用电源系统则在主供电系统失效时提供临时电源，确保乘客安全和列车关键设备的正常运行。这些系统的有效协同工作，是实现轨道交通客车高效、安全运行的基础。

供电系统的核心是牵引供电系统，它通常由变电站、接触网、馈线和受电弓等组成。变电站将高压交流电转换为适合接触网的电压等级，并通过馈线输送至接触网。列车通过受电弓与接触网接触，获取电能以驱动牵引电机。辅助供电系统则通常采用车载变压器和电池组，为列车内部提供稳定的直流或交流电源。紧急备用电源系统则包括超级电容器、蓄电池等，能够在主供电系统失效时迅速切换，保证关键设备如紧急制动系统的电力供应。

（二）三相逆变器的技术原理与应用

三相逆变器在轨道交通客车供电系统中扮演着至关重要的角色，其主要功能是将直流电源转换为列车牵引电机所需的三相交流电。逆变器的技术原理基于开关器件的高速开关操作，通过调整开关器件的导通和关断时间，控制输出电压的幅值、频率和相位，从而实现直流电源到交流电源的转换。

三相逆变器通常采用全桥或半桥拓扑结构，通过脉宽调制技术实现对输出电压的精确控制。在全桥逆变器中，每个相位由两个开关器件组成，而在半桥逆变器中，每个相位只有一个开关器件。逆变器的控制策略需要精确计算开关器件的导通时间，以产生所需频率和幅值的三相交流电。

（三）充电器的功能与技术要求

充电器的功能不仅包括能量转换，还包括电池状态监测、充电策略优化以及与供电系统的协调工作。充电器的技术要求主要包括高效率的能量转换、对电池状态的准确监测以及智能充电策略的实施。高效率的能量转换可以减少能量损耗，延长电池寿命。电池状态监测则有助于预防过充和过放，确保电池安全。智能充电策略可以根据电池状态和列车运行需求动态调整充电参数，优化充电过程。此外，充电器还需要与逆变器协同工作，以实现能量的最优分配和利用。

二、三相逆变器的优化与应用

（一）三相逆变器原理及工作方式

三相逆变器作为轨道交通客车供电系统的核心组件，其基本原理是将直流电转换为三相交流电。这一过程涉

及复杂的电力电子控制技术，以确保输出电压的稳定性和可控性。逆变器通过内部的功率半导体开关器件的高速开关动作，实现直流电源到交流电源的转换。这些开关器件按照特定的脉宽调制策略进行控制，以模拟出所需的三相交流电波形。在三相逆变器中，每个相位由一对互补的开关器件组成，它们交替导通和关断以产生交流波形。通过精确控制这些开关器件的导通时间和关断时间，逆变器能够输出具有特定频率和幅值的三相交流电。此外，逆变器还需要与电网同步，以确保输出电压与电网电压相匹配，从而实现能量的有效传输。

（二）三相逆变器的性能参数及影响因素

三相逆变器的性能参数主要包括输出电压的稳定性、谐波含量、转换效率以及动态响应速度。这些参数直接影响到轨道交通客车的供电质量和运行效率。影响这些性能参数的因素众多，包括开关器件的特性、PWM控制策略、散热设计以及电磁兼容性等。开关器件的特性决定了逆变器的开关速度和导通损耗，进而影响整体的转换效率和热管理。PWM控制策略则直接影响输出电压的质量，包括谐波含量和电压波动。散热设计对于保持逆变器的稳定运行至关重要，不良的散热会导致器件过热，降低性能甚至损坏设备。电磁兼容性设计则确保逆变器在复杂的电磁环境中稳定工作，减少对其他系统的干扰。

（三）三相逆变器在供电系统中的优化策略

一种有效的优化策略是采用先进的PWM调制技术，如空间矢量调制（SVM），以改善输出电压的质量并减少谐波。此外，采用新型高效率的功率半导体器件，如宽禁带半导体材料，可以降低开关损耗，提高逆变器的整体效率。动态响应优化则通过改进控制算法，如采用自适应控制或模糊逻辑控制，以快速响应负载变化和电网波动。最后，通过集成EMC设计，可以减少逆变器对其他系统的电磁干扰，提高系统的可靠性和稳定性。

三、充电器的优化与应用

（一）充电器原理及分类

充电器作为轨道交通客车供电系统中的关键设备，其主要作用是车载电池组提供所需的充电能量。充电器的工作原理基于电能的转换与控制，通过将交流电转换为直流电，并根据电池的特性调节充电电流和电压，以实现安全高效的充电过程。根据转换技术和控制策略的不同，充电器可以分为传统的恒流恒压充电器、脉冲充电器以及智能充电器等。传统的恒流恒压充电器提供稳定的充电电流和电压，适用于大多数电池类型。脉冲充电器则通过发送脉冲电流来充电，可以有效减少电池

的热损耗和延长电池寿命。智能充电器则采用微处理器控制，能够根据电池的状态和外部条件动态调整充电参数，实现更加精确和优化的充电过程。

（二）充电器的性能指标

充电器的性能指标直接关系到充电效率和电池寿命。主要性能指标包括充电效率、充电速率、温度控制、充电兼容性以及电磁兼容性等。充电效率是指充电器将交流电转换为直流电并用于电池充电的效率，高效率意味着更低的能量损耗。充电速率决定了电池充电的速度，过快的充电速率可能会导致电池过热和寿命缩短。温度控制对于防止电池过热和确保安全充电至关重要。充电兼容性指的是充电器能够适应不同类型和品牌的电池。电磁兼容性则确保充电器在工作时不会对其他电子设备产生干扰。

（三）充电器在供电系统中的优化方法

一种有效的优化方法是采用先进的充电算法，如基于模型的预测控制，可以根据电池状态实时调整充电策略。此外，采用高效率的功率转换器件，如开关电源模块，可以显著提高充电效率并减少热量产生。对于温度控制，可以采用液冷或风冷系统，以及热管技术，有效管理充电器和电池的温度。为了提高充电兼容性，充电器设计中应考虑到不同电池类型的特性，并采用可调节的充电参数设置。最后，通过优化电磁设计，如使用屏蔽和滤波器，可以减少充电器的电磁干扰，提高整个供电系统的稳定性和可靠性。

四、三相逆变器与充电器的协同工作机制

（一）逆变器与充电器的独立作用分析

逆变器主要负责将直流电源转换为交流电，以驱动列车的牵引电机，而充电器则负责为车载电池组充电，以供非牵引负荷使用。逆变器的独立作用在于提供稳定的三相交流电源，确保列车牵引系统的高效运行。充电器的独立作用则在于根据电池状态智能调节充电策略，以实现快速、安全且高效的电池充电。

逆变器通过精确控制内部的功率半导体开关器件，实现直流电源到交流电源的转换。其关键在于输出电压的稳定性和可控性，这对于列车牵引电机的性能至关重要。逆变器的设计和控制策略需要考虑到电网的波动和列车运行的动态需求。充电器则需要根据电池的充电特性和状态，动态调整充电电流和电压。其核心在于实现对电池的保护，防止过充和过放，同时优化充电过程以延长电池寿命。充电器的设计还需考虑到与逆变器的协调，以确保整个供电系统的高效运行。

（二）逆变器与充电器协同工作的理论基础

逆变器与充电器的协同工作机制建立在系统级的能量管理和优化控制理论上。这种协同工作要求两者在能量转换和供应过程中相互配合，以实现整个供电系统的最佳性能。协同工作的理论基础包括能量平衡原理、系统动态响应理论和优化控制策略。能量平衡原理确保系统在任何时刻的能量输入和输出保持平衡。系统动态响应理论关注于逆变器和充电器对负载变化的快速响应能力。优化控制策略则通过算法实现对逆变器和充电器工作状态的智能调整，以达到系统性能的最优化。

（三）协同优化对系统性能的影响

逆变器与充电器的协同优化对轨道交通客车供电系统的性能有着显著影响。这种优化可以提高系统的能量转换效率，减少能量损耗，提升系统的稳定性和可靠性，从而增强整个供电系统的综合性能。协同优化通过精确的能量管理，减少了能量在转换过程中的损耗，提高了系统的能源利用效率。同时，通过动态调整逆变器和充电器的工作参数，系统能够更好地适应不同的运行条件和负载需求，从而提高了供电的稳定性和可靠性。此外，协同优化还有助于延长电池寿命，降低维护成本，对轨道交通客车的长期运行和维护具有重要意义。

五、协同优化策略的设计与实施

（一）优化目标的确定与性能指标分析

首先需要明确优化目标，即在保证系统安全稳定运行的前提下，提高能量转换效率、降低能耗、优化设备寿命及提升系统响应速度。性能指标分析是实现这些优化目标的基础，涉及对逆变器和充电器的效率、谐波失真、热管理、动态调节能力等关键参数的评估。优化目标的确定需综合考虑系统的整体性能和各组成部分的特性。例如，提高逆变器的转换效率可以直接降低能耗，而优化充电器的充电策略则有助于延长电池寿命。性能指标分析则需要对这些目标进行量化，如设定逆变器效率提升的具体百分比，或充电器充电时间的缩短目标。

（二）协同优化算法的设计与选择

协同优化算法的设计是实现优化目标的关键。这些算法需要能够根据实时数据和系统状态，智能调整逆变器和充电器的工作参数，以实现系统级的优化。算法的选择和设计应基于先进的控制理论和计算技术，如模糊逻辑控制、神经网络优化或遗传算法等。设计协同优化算法时，需考虑到算法的实时性、鲁棒性和适应性。算

法能够快速响应系统状态的变化，并在各种工况下保持高效运行。此外，算法还应具备一定的容错能力，以应对系统中可能出现的异常情况。

（三）优化策略的实施流程与控制逻辑

优化策略的实施流程涉及从数据采集、状态监测到控制指令生成和执行的一系列步骤。控制逻辑的设计则需要确保这些步骤的协调一致，以实现系统的高效运行。实施流程开始于对逆变器和充电器工作状态的实时监测，包括电压、电流、温度等关键参数的采集。监测数据被送入协同优化算法中，算法根据这些数据和预设的优化目标生成控制指令。这些指令随后被传递给逆变器和充电器，指导它们的实际工作。控制逻辑的设计应确保指令的准确执行，并能够根据反馈数据进行动态调整，以维持系统的最优运行状态。

结论

本文提出的协同优化策略和技术，不仅提高了轨道交通客车供电系统的能源利用效率，还增强了系统的稳定性和可靠性，对于轨道交通行业的可持续发展具有重要意义。未来的研究将进一步探索这些策略和技术在实际应用中的性能，以及如何进一步优化以适应不断变化的运营需求和技术进步。

参考文献

- [1] 李静. 三相逆变器故障诊断及定位方法研究[D]. 吉林大学, 2023.
- [2] 王军舰. 三相负载不平衡时微网逆变器控制策略研究[D]. 河北科技大学, 2023.
- [3] 徐小健, 于飞. 基于输出电压轨迹的三相逆变器开关管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(03): 1106-1117.
- [4] 董志强, 王琛琛, 周明磊等. 基于SHEPWM的三电平三相逆变器中点电位主动平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(04): 1147-1158.
- [5] 靳舵, 张厚升, 李家琪等. 三相逆变器控制策略的研究与仿真[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(11): 114-118+217.
- [6] 杨彬. 基于最小投影法的三相逆变器控制方法研究[D]. 华南理工大学, 2022.
- [7] 陈峪. 基于数据驱动的逆变器开路故障诊断方法研究[D]. 西安工业大学, 2022.