

超级电容有轨电车供电系统的设计与优化

郭洪斌

中铁第五勘察设计院集团有限公司 北京 102600

摘要: 在当今快速城市化和交通需求不断增长的背景下, 城市交通问题愈发突出, 如交通拥堵、空气污染和能源消耗等。有轨电车作为一种环保、高效的公共交通解决方案备受关注。然而, 传统的有轨电车供电系统存在一些限制, 如能量回收不充分、充电效率低下等。本论文旨在设计和优化超级电容有轨电车供电系统, 以推动城市交通的可持续发展。

关键词: 超级电容有轨电车; 供电系统; 设计

Design and optimization of supercapacitor tram power supply system

Hongbin Guo

China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., LTD., Beijing 102600

Abstract: In the context of rapid urbanization and ever-increasing transportation demands today, urban traffic issues have become increasingly prominent, such as traffic congestion, air pollution, and energy consumption. Trams, as an environmentally friendly and efficient urban transportation solution, have garnered significant attention. However, traditional tram power supply systems have certain limitations, such as inadequate energy recovery and low charging efficiency. This paper aims to design and optimize a supercapacitor tram power supply system to promote the sustainable development of urban transportation.

Keywords: Supercapacitor Tram; Power Supply System; Design

引言:

为了克服这些限制并进一步提升有轨电车的性能, 超级电容有轨电车供电系统被提出并引起了广泛关注。超级电容器作为一种高功率密度、快速充放电和长寿命的能量存储设备, 被视为改善有轨电车供电系统的理想选择。

通过设计和优化超级电容有轨电车供电系统, 我们有望实现更高的能源利用效率、减少碳排放, 并提升乘客的出行体验。未来的研究和应用将进一步完善该技术, 并为城市交通领域的可持续发展做出贡献。

一、超级电容有轨电车供电系统的设计原理

1. 超级电容器的基本原理

超级电容器是一种能够高效存储和释放能量的电化学设备, 见图1。它采用电化学原理实现能量的存储和释放。超级电容器由两个电极、电解质和隔膜组成。当施加电压时, 正负极之间形成电场, 电解质中的离子在电

场作用下迁移, 从而实现能量的存储。

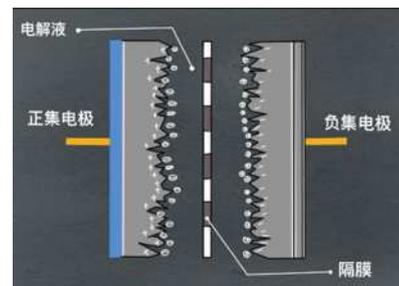


图1 超级电容器的基本结构

两个电极之间的电解质通过隔膜分隔, 形成电容结构。电极材料通常采用高比面积的活性炭, 具有丰富的孔隙结构, 以增加电极与电解质的接触面积, 提高电容器的电容量。电解质常使用有机溶液、聚合物凝胶或离子液体。

超级电容器具有快速充放电能力、高功率密度和长循环寿命。从图2可见其充电和放电过程的快速性能。

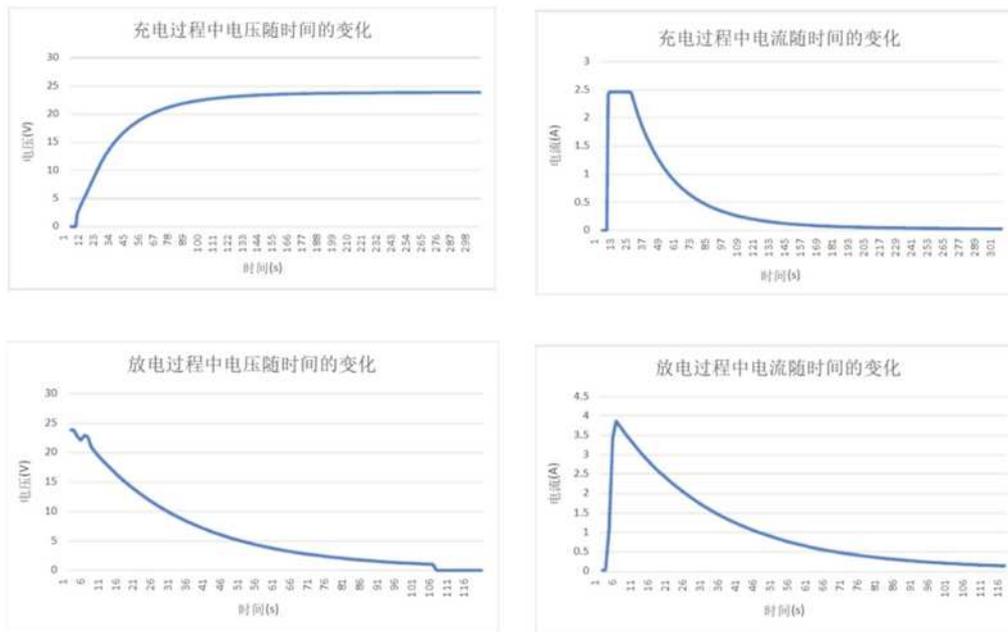


图2 典型的超级电容器充放电曲线

2. 有轨电车供电系统的基本原理

传统有轨电车供电系统由接触网、牵引变流器和电动机等组成。接触网提供交流电，牵引变流器将接触网提供的电流转换为电动机所需的直流电。传统有轨电车通过接触网与车顶的集电装置建立电连接，通过接触网提供的电流来驱动电动机。

然而，传统有轨电车供电系统存在能量回收不充分、能源浪费等问题。

3. 超级电容有轨电车供电系统的基本原理

超级电容有轨电车供电系统将超级电容器与传统有轨电车供电系统相结合，以实现能量的高效存储和利用。超级电容器在该系统中充当能量存储器的角色，能够高速充放电，实现能量的快速存储和释放。

超级电容有轨电车供电系统的关键技术包括能量存储、能量回馈和供电过程的控制策略。图4展示了超级电容有轨电车供电系统的基本原理。

在制动过程中，超级电容器能够回收制动能量并将其存储起来，以便在加速过程中释放能量。这种能量回馈的机制有效提高了能源利用效率。

此外，为了保证系统稳定性，需要采取合适的能量管理和控制策略，以确保超级电容器的充放电过程稳定可靠，并防止过度充放电造成的损害。

二、超级电容有轨电车供电系统的设计流程

1. 系统需求分析

在超级电容有轨电车供电系统的设计过程中，系统需求分析是至关重要的一步。

首先，进行车辆功率需求分析，包括确定不同运行情况下的最大功率需求、平均功率需求和峰值功率需求。这可以通过实际城市交通数据和调研结果来支持，例如采集不同时间段的实际载荷数据和车辆运行状况。

其次，考虑路线特征对系统设计的影响。路线特征包括路段坡度、曲线半径和站点分布等因素。通过分析这些因素，可以确定系统在不同路段和站点的功率需求变化情况，从而影响电容器的容量和充电策略的设计。

此外，还需要考虑充电需求。充电需求分析包括确定充电站点的布置和充电时间的规划。通过分析乘客上下车的流量、站点停留时间和充电时间窗口，可以确定充电需求，并为充电站点的布置和充电策略提供依据。

综合以上分析，可以得出系统需求的详细描述，包括车辆功率需求曲线、路线特征影响因素和充电需求规划。

2. 系统设计方案制定

变电所的位置选择：确定变电所的最佳位置，以便最大程度地满足电容器充电需求。考虑到电容器的布置和电车线路的情况，选择离电容器最近且最有利于能量传输的变电所位置。

变电所容量设计：根据电车线路长度、电容器充电速度等因素，确定变电所的容量设计。确保变电所能够满足电容器的快速充电需求，以及系统的稳定运行。

变电所设备选择：选择合适的变电所设备，如变压器、断路器、隔离开关等，以满足系统的电能转换和传输要求。确保设备能够适应电容器充放电的需求。

变电所的连接方式: 确定变电所与电容器之间的连接方式, 可能涉及电缆、导线等。考虑连接的电阻、电压降等因素, 以最大限度减少能量损耗。

能量传输效率: 在设计变电所和供电系统时, 考虑如何优化能量传输效率。这可能包括选择适当的电缆规格、电压等级, 以减小能量损耗。

变电所的控制系統: 设计变电所的控制系統, 包括充电控制、电压稳定控制等。确保变电所能够根据系统需求进行自动调节和控制。

安全和保护: 考虑变电所的安全措施, 如过流保护、过压保护等, 以应对异常情况。确保变电所的运行安全稳定。

与电网的连接: 确定变电所与电网的连接方式, 以确保从电网获取所需电能, 并将电容器释放的电能注入电网。

变电所的扩展性: 考虑将来系统的扩展性, 确保变电所的设计可以满足未来新增电车线路或电容器的需求。

环境影响和审批: 针对变电所的建设, 可能需要考虑环境影响评估和相关审批事宜, 确保项目符合环保和法规要求。

系统设计方案制定阶段涉及超级电容有轨电车供电系统的整体设计方案, 包括电容器布置、充放电控制策略和能量管理策略。可以比较不同设计方案的性能, 选择最佳的系统设计方案。

三、超级电容有轨电车供电系统的设计优化方法

1. 性能评估指标的确定

在设计优化过程中, 需要明确定义性能评估指标, 用于评价不同设计方案的效果。

能量传输效率: 评估能量从变电所传输到电容器的效率, 考虑电缆、导线等传输损耗, 确保高效能量传输。

充电速率和效率: 分析不同变电所设计对电容器充电速率和效率的影响, 优化充电策略以提高能量储存效率。

稳定性与响应性: 考虑变电所的响应速度和稳定性, 确保在电容器充放电过程中, 变电所能够快速而稳定地响应, 保持系统的稳定运行。

成本指标: 成本是评估系统经济性的重要指标。除了考虑硬件设备的成本, 还需要考虑系统的维护成本、能源成本和运营成本等因素。通过成本效益分析, 可以确定系统设计和优化的经济可行性。

2. 优化方法选择与应用

在超级电容有轨电车供电系统的设计优化中, 选择适当的优化方法是关键, 这将直接影响到系统性能的提升。

(1) 多目标优化算法的应用

多目标优化是一种考虑多个目标和约束的设计优化方法。超级电容有轨电车供电系统涉及多个性能指标, 如能量效率、系统稳定性和成本。通过应用多目标优化算法, 如遗传算法、粒子群优化算法和模糊逻辑算法, 可以找到系统性能的最优平衡点。

多目标遗传算法: 例如以储能成本和用电成本为适应度函数, 可以优化车载储能系统容量和地面充电站容量。

粒子群优化算法: 可以在搜索空间中寻找多个优秀的解决方案, 通过粒子的协作和自我调整来优化多个目标。通过获取车载储能系统关键配置参数, 同时考虑了地面充电站容量的优化配置, 基于车辆运行工况和充电站能量效率, 建立包含储能系统全寿命周期成本、运营成本、环境影响等多个目标函数的优化模型, 可以寻找到降低运行成本和减少碳排放的最优模型。

模糊逻辑算法: 可以通过研究超级电容有轨电车供电系统控制策略, 以最大化能量回收和最小化充放电次数为目标函数, 实现超级电容荷电状态的动态调节, 提高系统性能和稳定性。

(2) 模拟与仿真的应用

模拟与仿真工具是评估不同变电所设计方案性能的重要手段。通过对不同设计方案的仿真, 可以获得量化的性能数据, 支持优化决策。

建模与仿真软件: 使用电气仿真软件进行电能转换和传输的仿真, 以模拟不同变电所设计在不同负载下的性能。

能量流分析: 通过模拟变电所的能量流动, 分析电容器充放电过程中的效率、稳定性等, 为优化设计提供依据。

(3) 参数敏感性分析的应用

参数敏感性分析是了解不同参数对系统性能影响的重要手段, 不同参数可能会对能量传输效率和稳定性产生影响。

参数扫描: 对不同关键参数进行扫描, 观察其对能量传输效率和稳定性的影响程度, 找出影响性能的关键参数。

响应曲面建模: 基于参数敏感性分析的结果, 可以构建响应曲面模型, 预测不同参数组合下的性能, 以指导设计优化。

综合运用多目标优化算法、模拟与仿真以及参数敏感性分析, 可以深入了解不同变电所设计方案的性能, 找到优化方向, 从而为超级电容有轨电车供电系统的设

计提供更加精确和高效的优化方法。确保设计方案在各种条件下都能实现高效的能量传输和稳定的运行。

3. 变电所稳定性控制方法研究

在超级电容有轨电车供电系统中, 变电所的稳定性对系统的正常运行至关重要。

(1) 充放电过程控制方法研究

充放电过程控制方法旨在确保电容器的充电和放电过程稳定、高效。

充电速率控制: 设计充电速率控制算法, 基于电容器的状态和系统负荷需求, 控制电容器的充电速度, 避免过快或过慢的充电。

放电控制策略: 研究放电控制策略, 根据电车运行状态和需求, 合理控制电容器的放电速率, 确保电能需要在需要时可用。

电容器电压控制: 设计电容器电压控制算法, 监测电容器电压变化, 根据稳定性要求调整充放电策略, 避免过高或过低的电压。

(2) 电能分配策略优化

电能分配策略的优化是为了合理分配电容器储存的能量, 以满足不同系统的能量需求。

智能分配算法: 研究开发智能电能分配算法, 基于电车系统状态和需求, 确定不同系统的优先级, 确保能量优先满足关键系统的需求。

能量优化分配: 结合预测分析, 根据电车运行计划和路线, 优化电能分配策略, 使能量在电车运营的不同阶段得到最优分配。

(3) 应急响应能力

应急响应能力是确保变电所在突发情况下稳定运行的关键。

快速切断机制: 确保变电所设备具备快速切断电源的能力, 以防止电容器过压等突发情况对系统造成损害。

电容器保护措施: 设计保护措施, 如过流保护、过温保护等, 保护电容器免受损害, 确保供电系统的稳定性。

应急能量释放: 考虑应急能量释放装置, 将电容器中的余能有效释放, 以避免在紧急情况下出现过压问题。

通过充放电过程控制方法、电能分配策略优化以及应急响应能力的研究, 可以确保变电所在电容器充放电过程中保持稳定, 根据不同系统的能量需求合理分配电能, 并在突发情况下保障系统的安全和稳定运行。这些

控制方法的合理应用将有助于提高超级电容有轨电车供电系统的性能和可靠性。

4. 环境和可持续性因素

(1) 环境因素

噪音分析: 对变电所运行时产生的噪音进行测量和分析, 以确保其在规定范围内, 减少噪音对周边环境和居民的影响。

电磁辐射评估: 分析变电所产生的电磁辐射水平, 确保辐射水平不超过环境和健康标准, 保护公众健康。

环境友好材料: 在设计和建设中使用环境友好的材料, 降低资源消耗和环境污染, 同时减少废弃物产生。

(2) 可持续性考虑

能源效率提升: 优化变电所设计, 提高能源转换效率, 减少能源浪费, 以降低系统运行成本和能源消耗。

再生能源整合: 考虑整合可再生能源, 如太阳能、风能等, 为变电所供能, 减少对传统能源的依赖, 降低碳排放。

废弃物管理: 在变电所运营过程中, 合理管理废弃物产生, 推动废弃物的回收和处理, 减少对环境的不良影响。

四、结语

本论文深入研究了超级电容有轨电车供电系统的设计与优化, 重点关注了与变电所相关的内容。通过对超级电容器的基本原理、有轨电车供电系统的基本原理以及超级电容有轨电车供电系统的基本原理进行探讨, 为后续的设计优化奠定了基础。提出许多潜在的研究方向值得探索: 如智能控制策略、能量回收技术、系统可靠性分析等。综合以上内容, 本论文的研究成果为超级电容有轨电车供电系统的设计与优化提供了有力支持, 也为相关领域的研究者提供了有价值的参考。

参考文献:

- [1]周京华, 李秋霏, 章小卫, 等. 储能有轨电车新型充电系统研究[J]. 电力电子技术. 2015, (6). DOI: 10.3969/j.issn.1000-100X.2015.06.030.
- [2]蔡波, 李鲲鹏. 现代有轨电车无接触网牵引供电方式研究[J]. 城市轨道交通研究. 2015, (1). DOI: 10.16037/j.1007-869x.2015.01.017.
- [3]朱波, 朴学松, 杨建宇. 超级电容储能系统在轨道车辆的应用[J]. 铁道机车车辆. 2014, (2). DOI: 10.3969/j.issn.1008-7842.2014.02.19.