

# 城市轨道交通供电系统双向变流与能量回馈技术

陈阳, 吴炼, 李瑞梅

绍兴市轨道交通集团有限公司运营分公司, 浙江绍兴

**摘要:** 本文聚焦于城市轨道交通供电系统中的双向变流与能量回馈技术。首先阐述了城市轨道交通供电系统的基本组成及其在该领域的重要作用。接着深入剖析双向变流技术的定义、原理, 以及双向变流器的结构与工作模式, 使读者对该技术有全面的认识。随后详细介绍能量回馈技术的定义、重要性, 以及能量回馈过程中的关键技术。进一步探讨双向变流与能量回馈技术在轨道交通中的实际应用情况。还研究双向变流与能量回馈系统的控制策略, 包括设计原则以及先进控制策略的实施与优化。最后分析当前技术面临的挑战, 并对技术未来的发展方向与前景进行展望。

**关键词:** 城市轨道交通; 供电系统; 双向变流技术; 能量回馈技术; 控制策略

---

## Bidirectional Converter and Energy Feedback Technology of Urban Rail Transit Power Supply System

Yang Chen, Lian Wu, Ruimei Li

Shaoxing Rail Transit Group Co., Ltd. Operation Branch, Shaoxing, Zhejiang

**Abstract:** This paper focuses on bidirectional converter and energy feedback technologies in urban rail transit power supply systems. It first elucidates the fundamental components of urban rail transit power supply systems and their critical role in this field. Subsequently, it provides an in-depth analysis of the definition and principles of bidirectional converter technology, along with the structure and operational modes of bidirectional converters, enabling readers to gain a comprehensive understanding of the technology. The paper then details the definition and significance of energy feedback technology, as well as key technologies involved in the energy feedback process. It further explores practical applications of bidirectional converter and energy feedback technologies in rail transit systems. Additionally, the paper examines control strategies for bidirectional converter and energy feedback systems, including design principles and the implementation and optimization of advanced control strategies. Finally, it analyzes current technological challenges and outlines future development directions and prospects for these technologies.

**Keywords:** urban rail transit; power supply system; bidirectional converter technology; energy feedback technology; control strategy

## 1 城市轨道交通供电系统概述

### 1.1 供电系统的基本组成

供电系统主要由外部电源、主变电所、牵引供电系统、动力照明供电系统以及电力监控系统等关键部分构成。外部电源为整个供电系统提供原始电力；主变电所则负责将外部电源引入并进行电压变换；牵引供电系统专门为列车运行提供所需电能；动力照明供电系统则满足车站及区间内各类动力设备和照明设施的用电需求；电力监控系统则对整个供电系统进行实时监控和调度管理，确保供电系统的安全稳定运行。

### 1.2 供电系统在城市轨道交通中的作用

供电系统是城市轨道交通正常运营的核心支撑，其作用体现在多个关键层面。首先，它为列车运行提供持续、稳定的动力支持，确保列车能够按照既定的时刻表安全、准时地运行，满足城市居民日常出行的需求。其次，供电系统保障了车站及区间内各类动力设备和照明设施的正常运转，从自动扶梯、通风设备到站台照明，无一不依赖稳定可靠的电力供应，为乘客营造了安全、舒适的乘车环境。此外，供电系统还通过电力监控系统实现对整个供电网络的实时监控和智能调度，有效预防和应对各类电力故障，确保城市轨道交通系统的整体安全性和可靠性，为城市交通的顺畅运行提供了坚实保障。

## 2 双向变流技术基础

### 2.1 双向变流技术的定义与原理

在城市轨道交通供电系统中，双向变流技术是一项极为关键的技术，它对于提升整个供电系统的性能和效率起着至关重要的作用。双向变流技术，简单来说，是一种能够实现电能双向流动转换的技术，它可以在不同的工作模式下，将直流电转换为交流电，或者将交流电转换为直流电[1]。

这种技术的核心原理基于电力电子器件的高速开关特性，通过精确控制开关器件的导通与关断，实现对电能方向和电压、电流波形的灵活调控。在

城市轨道交通供电系统中，双向变流技术能够根据实际需求，在牵引供电和再生制动能量回馈等不同场景下，高效地完成电能的双向转换，从而优化能源利用，提高系统的整体运行效率。

### 2.2 双向变流器的结构与工作模式

在城市轨道交通供电系统中，双向变流技术是关键组成部分，而深入了解双向变流器的结构与工作模式对于充分发挥双向变流与能量回馈技术的效能至关重要。双向变流器作为实现电能双向流动转换的核心设备，其结构通常包含功率模块、控制模块、滤波模块等。功率模块是双向变流器的核心能量转换单元，一般由多个电力电子器件如绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等组成，通过这些器件的高速开关动作实现直流与交流之间的转换。控制模块则如同双向变流器的“大脑”，它接收来自系统各部分的信号，依据预设的程序和算法，精确地控制功率模块中开关器件的导通与关断时机，从而实现对电能转换过程的精准调控。滤波模块主要用于对转换后的电能进行滤波处理，去除其中的谐波等杂质，使输出的电能质量更加稳定、纯净，满足城市轨道交通供电系统对电能质量的高要求[2]。

在工作模式方面，双向变流器主要有牵引供电模式和再生制动能量回馈模式。在牵引供电模式下，双向变流器将外部输入的交流电转换为直流电，为轨道交通车辆提供牵引动力所需的电能，确保车辆能够正常运行。而在再生制动能量回馈模式下，当车辆进行制动时，车辆的电机转变为发电机状态，产生再生制动能量，此时双向变流器将这部分直流电转换为交流电，反馈回城市轨道交通供电系统，实现能量的回馈和再利用，有效提高了能源的利用效率，降低了能源消耗和运营成本。

## 3 能量回馈技术原理

### 3.1 能量回馈技术的定义与重要性

在城市轨道交通供电系统中，能量回馈技术是一项至关重要且具有显著价值的技术。能量回馈技术，简单来说，就是将城市轨道交通列车在

制动过程中产生的多余电能，通过特定的装置和技术手段，回馈到供电系统中，实现电能的再利用。这种技术打破了传统供电系统中能量单向流动的模式，构建起一个更为高效、环保的能量循环体系。

从重要性方面来看，能量回馈技术对于城市轨道交通供电系统的优化起到了关键作用。在能源利用效率上，它有着显著的提升效果。通过能量回馈，原本会被浪费掉的制动能量得以重新利用，减少了从外部电网获取的电量，从而降低了能源消耗，提高了整个供电系统的能源利用效率。在环保方面，由于减少了外部电能的获取，也就相应地降低了因发电而产生的污染物排放，对环境保护具有积极意义。同时，能量回馈技术还能有效减轻供电设备的负担，延长设备的使用寿命，降低设备的维护成本，进一步提升城市轨道交通供电系统的经济性和可靠性[3]。

### 3.2 能量回馈过程中的关键技术

首先是高效的电能变换技术，这是能量回馈的核心环节。它需要快速且精准地将制动产生的直流电能转换为与供电系统频率、相位相匹配的交流电能，以确保电能能够顺利回馈到电网中，减少能量损耗。其次是可靠的同步控制技术，要保证回馈的电能与供电系统的电压、频率等参数严格同步，避免出现不同步导致的功率冲击、电压波动等问题，保障供电系统的稳定运行。再者是完善的保护技术，在能量回馈过程中，可能会出现过流、过压、过热等各种异常情况，完善的保护技术能够及时检测到这些故障并采取相应的措施，如切断电路、发出警报等，防止设备损坏和事故的发生。另外，精确的能量检测与管理技术也必不可少，它能够实时监测制动能量的大小、回馈电能的质量等参数，为能量回馈系统的优化运行提供数据支持，实现能量的高效管理和合理分配。

还有先进的滤波技术，在能量回馈时，会产生一定的谐波，先进的滤波技术能够有效滤除这些谐波，降低对供电系统和其他用电设备的干扰，提高电能质量[4]。同时，智能的故障诊断与容错技术也

发挥着重要作用，它可以在系统出现故障时，快速准确地判断故障位置和类型，并通过一定的容错机制，使系统在部分故障情况下仍能维持一定的运行能力，减少因故障导致的停机时间，提升系统的可靠性和可用性。

## 4 双向变流与能量回馈技术在轨道交通中的应用

在城市轨道交通中，双向变流与能量回馈技术有着极为广泛且关键的应用。在列车制动时，双向变流器能够迅速将列车制动产生的直流电能进行高效转换，变为与供电系统相匹配的交流电能，并通过能量回馈装置精准地回馈到电网中，实现能量的再利用，大大降低了能源的浪费，提升了整个轨道交通系统的能源利用效率。

在车站的照明、通风、空调等设备供电方面，该技术也发挥着重要作用。它可以根据车站设备的实际用电需求，灵活调节电能的供应，确保设备稳定运行的同时，避免电能的过度供给，进一步节约能源。

而且，双向变流与能量回馈技术还能有效改善轨道交通供电系统的电能质量。通过对回馈电能的精确控制，减少电网中的谐波污染，降低电压波动和闪变，为轨道交通系统的各类设备提供更加稳定、优质的电力环境，保障列车运行的安全性和可靠性，提升乘客的出行体验。

## 5 双向变流与能量回馈系统的控制策略

### 5.1 控制策略的设计原则

在城市轨道交通供电系统中，双向变流与能量回馈技术的控制策略设计原则至关重要，它直接关系到整个系统的高效运行与节能效果。从安全性原则来看，必须确保双向变流器和能量回馈系统在各种复杂工况下都能稳定可靠地工作。在稳定性原则方面，要保证系统在不同负载变化和电网波动情况下，电能转换和回馈过程平稳，避免出现电压或电流的剧烈波动，以维持轨道交通供电系统的稳定运行。经济性原则也不容忽视，控制策略应尽可能降低系统的运行成本，提高能量回馈的效率，减少不

必要的能量损耗，实现经济效益的最大化。此外，还需遵循可扩展性原则，随着城市轨道交通规模的不断扩大和技术的持续发展，控制策略要具备良好的扩展性，能够方便地适应新的设备和工况要求，为系统的升级和拓展提供有力支持[5]。

## 5.2 先进控制策略的实施与优化

在实施先进控制策略时，首先需引入智能算法，如模糊控制、神经网络控制等，这些算法能够根据系统的实时运行状态，自动调整控制参数，提高系统的自适应能力。同时，结合先进的传感器技术，实时监测系统的各项运行指标，如电压、电流、温度等，为控制策略的调整提供准确的数据支持。在优化方面，需对控制策略进行持续改进，通过仿真实验和现场测试，分析不同工况下系统的运行性能，找出存在的问题和不足，针对性地调整控制策略，以提高系统的整体运行效率和稳定性。此外，还应注重控制策略的可靠性和安全性，确保在各种异常情况下，系统能够迅速做出反应，保障轨道交通供电系统的安全运行。

# 6 双向变流与能量回馈技术的挑战与发展趋势

## 6.1 当前技术面临的挑战

一是技术成熟度方面，尽管双向变流与能量回馈技术已取得一定进展，但在大规模实际应用中，部分关键技术仍不够成熟，例如双向变流器在复杂工况下的稳定运行能力有待提升，能量回馈过程中对电能质量的精确控制还存在困难，这可能导致系统在实际运行中出现故障或性能不稳定的情况。

二是成本问题，双向变流与能量回馈技术的设备研发、制造和维护成本较高。一方面，先进的功率半导体器件、高性能的传感器等核心部件价格昂贵；另一方面，系统的复杂结构使得安装、调试和维护需要专业的技术人员，进一步增加了人力成本，这在一定程度上限制了该技术的推广应用。

三是标准与规范缺失，目前针对城市轨道交通供电系统双向变流与能量回馈技术，尚未形成统

一、完善的行业标准和规范。这使得不同厂家生产的设备在接口标准、性能指标等方面存在差异，给系统的集成和互联互通带来困难，也不利于技术的健康发展。

四是电磁兼容性问题，双向变流与能量回馈装置在运行过程中会产生电磁干扰，可能对城市轨道交通供电系统中的其他设备造成影响，如信号系统、通信系统等。同时，这些装置自身也可能受到外界电磁环境的干扰，如何有效解决电磁兼容性问题，确保系统的可靠运行，是当前技术面临的一大挑战。

## 6.2 技术未来的发展方向与展望

随着新材料、新工艺以及智能控制技术的不断发展，双向变流与能量回馈技术将朝着高效化、智能化、集成化的方向迈进。高效化方面，通过研发新型功率半导体器件和优化电路拓扑结构，进一步提高能量转换效率，降低能量损耗；智能化方面，借助先进的人工智能算法和大数据分析技术，实现对系统的实时监测、故障诊断和自适应控制，提升系统的运行稳定性和可靠性；集成化方面，将双向变流与能量回馈装置与其他供电设备进行深度集成，减少设备占地面积，提高系统的整体性能和协同工作能力。此外，随着城市轨道交通网络的不断扩展和智能化水平的提升，双向变流与能量回馈技术还将与新能源技术、储能技术等深度融合，为城市轨道交通的绿色、可持续发展提供有力支撑。

## 7 结语

双向变流与能量回馈技术作为城市轨道交通供电系统中的关键技术，其发展与应用对于提升轨道交通的能效、稳定性及可持续性具有重要意义。随着技术的不断进步与创新，该技术将在高效化、智能化、集成化方面取得更多突破，为城市轨道交通的绿色发展注入新的活力。同时，面对未来城市轨道交通网络的进一步扩展与智能化升级，双向变流与能量回馈技术也将不断适应新需求，实现与新能源、储能等技术的深度融合，共同推动城市轨道交通

通向更加环保、高效、智能的方向发展。

## 参考文献

- [1] 陈昕,杨立新,王财华,等.双向变流技术在轨道交通牵引供电系统中的应用[J].城市轨道交通研究,2022(08):145-148+152.
- [2] 王毛,郑月宾,宋雷,等.双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用[J].城市轨道交通研究,2024(02):58-62+68.
- [3] 戴丽君,杨立新,张宇,等.城市轨道交通牵引供电系统双向变流装置设置方案研究.城市轨道交通研究,2024(11):146-151.
- [4] 刘炜,曾佳欣,马庆安,等.含双向变流装置的城轨牵引供电系统协同供电潮流计算[J].西南交通大学学报,2023(05):1145-1153.
- [5] 安秋颖.城市轨道交通供电系统再生制动能量回收装置节能影响因素分析[J].铁道车辆.2021,59(01):31-34+116.

