

铁路工程

地铁牵引供电系统节能优化技术探究

张蒙 李念宏 李阳

青岛地铁运营有限公司 山东青岛 266000

【摘要】随着城市轨道交通的快速发展,地铁系统的能耗问题日益突出。牵引供电系统作为地铁能源消耗的主要部分,其节能优化具有重要意义。在现代低碳节能理念导向下,地铁牵引供电系统的节能优化设计面临更高要求,亟须采取更加系统完善的设计方法,强化对供电系统节能状态的评估,有效减低供电系统能耗。本文介绍了地铁牵引供电系统节能现状,以及面向节能的地铁列车高频辅助系统及应用。在探讨地铁列车牵引传动节能优化技术路径的基础上,分别从地铁列车节能运行控制计算、地铁列车节能运行控制仿真等方面,深入研究了地铁列车节能运行控制技术,希望对相关工作实践有所裨益。

【关键词】地铁工程;牵引供电;节能优化;设计方法

Exploration of energy-saving optimization technology for subway traction power supply system

Zhang Meng Li Nianhong Li Yang

Qingdao Metro Operation Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

【Abstract】With the rapid development of urban rail transit, the energy consumption problem of the subway system is becoming increasingly prominent. As the main part of subway energy consumption, the energy-saving optimization of traction power supply system is of great significance. Under the guidance of modern low-carbon and energy-saving concepts, the energy-saving optimization design of subway traction power supply systems faces higher requirements, and it is urgent to adopt more systematic and comprehensive design methods, strengthen the evaluation of the energy-saving status of the power supply system, and effectively reduce the energy consumption of the power supply system. This article introduces the energy-saving status of subway traction power supply system, as well as the high-frequency auxiliary system and its application for energy-saving subway trains. On the basis of exploring the energy-saving optimization technology path of subway train traction transmission, this paper deeply studies the energy-saving operation control technology of subway trains from the aspects of energy-saving operation control calculation and simulation of subway train energy-saving operation control, hoping to benefit related work practices.

【Key words】subway engineering; Traction power supply; Energy saving optimization; Design method

引言

随着城市化进程的加快和环保意识的提高,地铁作为绿色公共交通的重要组成部分,其能源消耗问题日益受到关注。地铁牵引供电系统是地铁运营中的主要能耗环节,约占地铁总能耗的40%~50%。因此,研究地铁牵引供电系统的节能优化技术具有重要的现实意义和经济价值。

电机可转变为发电机状态,将动能转换为电能。该系统具有负荷波动大、启停频繁的特点。能耗主要受列车运行密度、线路条件、车辆性能和运行工况等因素影响。在加速阶段能耗最高,约占整个运行过程的50%;匀速阶段能耗相对稳定;制动阶段则可能产生可观的再生能量。系统效率通常在70%~85%之间,存在较大的节能空间。

2 面向节能的地铁列车高频辅助系统

2.1 地铁列车辅助系统的拓扑结构

2.1.1 工频隔离式辅助变流器

工频隔离式辅助变流器在地铁列车辅助系统中发挥着关键优势作用,其变流器更多情况下采用三相四线制,其拓扑结构相对优化,可在两侧滤波作用下,提高牵引供电系统整体运行效能,并构造形成输出滤波电路,实现对地铁列车

1 地铁牵引供电系统概述

地铁牵引供电系统是为地铁列车提供牵引动力的关键系统,主要由牵引变电所、接触网(或第三轨)、回流系统和电力监控系统等组成。牵引变电所将城市电网的高压电转换为适合列车使用的直流电,通过接触网或第三轨供给列车。列车运行时,牵引电机将电能转换为机械能;制动时,

的辅助供电。工频隔离式辅助变流器拓扑结构的整体构件种类相对较少,其结构构造的稳定性与可靠性相对较强,技术条件相对成熟,在多种牵引供电系统环境下均具有良好适用性。在该辅助变流器支持下,地铁牵引供电系统可有序实现轻量化,确保逆变器整体性能指标的恒定状态。

2.1.2 单向直流变换型高频逆变器

单向直流变换型高频逆变器以两侧直流电为主要面向对象,通过全桥逆变元器件作用发挥,使直流电和交流电之间能够有效实现衔接转换,在滤除高频成分的基础上,完成对地铁列车电力能源的输送供应。在现代技术规范支持下,单向直流变换高频逆变器的综合构造方式更趋清晰优化,运行效率更高,运行状态更稳定,符合稳定性的基本技术要求,可在更短时间内完成更多数量的电力能源输送,价值突出。在实践中,高频逆变器应始终保持稳定运行状态,以保证变流器的能量密度,发挥系统最大效能。

2.2 地铁列车高频辅助系统的控制技术

2.2.1 LLC 谐振变频器控制方法

在当前技术条件下,如何有效运用 LLC 谐振变频器这一硬件载体,强化对地铁列车高频辅助系统的动态优化控制,开始成为牵引供电系统节能优化设计实践中的焦点问题。在 LLC 谐振变频器控制方法的优化运用需要配置性能稳定的控制器元件,拓展优化增益变化范围,避免不必要的电力能源资源消耗与浪费。根据地铁牵引供电系统构造、功能与布局等,配置最为符合实际的谐振变频器,使所选择的设备元件符合节能设计基本要求,控制牵引供电系统电压波动范围。

2.2.2 LLC 闭环控制器设计

LLC 闭环控制器设计的过程同时也是对相关构造元件进行优化布局的过程,需要按照地铁牵引供电系统的基本运行环境,对系统能耗数据进行纵向分析,对不同类型参数进行纵向对比分析,及时做好纠偏设计与处理,实现能耗水平最低化。将输出滤波电容参数等纳入 LLC 闭环控制器设计的考量内容,控制电路线性化状态,将地铁牵引供电系统的能耗指数控制在技术允许范围内,确保其在充分发挥基本效能的同时,消除外部不稳定因素对地铁牵引供电系统的扰动,做到能耗最低。

3 地铁列车牵引传动节能优化技术研究

3.1 地铁列车牵引系统结构

现代地铁列车牵引系统结构构造趋于模块化,不同模块之间具有不同功能衔接需求,且具备相应的可拓展性,有助于在有限范围内实现牵引系统结构综合效能的优化。从以往实践来看,通过优化完善地铁列车牵引系统结构,可有效屏蔽外来因素的潜在影响,在更大程度上满足地铁列车牵引系统功能实现的需求。其中,动力电池组在地铁列车牵引传动拓扑结构中始终处于基础位置,可为整个系统运行提供基础

动力支撑,保持系统运行稳定性与连续性;牵引逆变器则与双向直流逆变器衔接互动,在接触网作用下,实现协同响应。地铁列车牵引系统结构还与车辆自身参数与运行模式有关。

3.2 车载动力电池配置设计

为优化提升地铁牵引供电系统储能系统应用成效,应在形成优化可行能量管理策略的基础上,对储能系统应用需求进行细化分析,并配置符合系统应用实际的各类构件。综合分析地铁列车不同运行模式下的能耗曲线变化状态,对制动能量进行回收与转化利用,形成清晰明确的最大功率需求,实现不同工况下的能耗耦合。作为地铁列车故障运行的两种主要工况模式,自牵引工况和应急辅助供电工况对能量的需求存在明显差异,这需要对储能系统配置功率、功率配置裕度系数、动力电池组老化程度等作出研判,满足地铁列车整车对储能系统的最大能量需求。

3.3 地铁列车储能系统能量管理策略研究

3.3.1 考虑区间运行耗能的优化能量管理策略

在地铁列车不同工况下,动力能源的供应同样存在明显不同,需要采取具有针对性的能量管理策略予以应对处置,在多个技术路径范围内保证车载储能系统的可靠性与稳定性,优化动力能源分配。在上述过程中,应做好对电池负载特性的监测分析,确保电池状态最优化,对能量流动进行实时管理。在实践领域,更多的列车能量管理采用逻辑分析法,即通过列车车速、牵引转矩、电池组变量等实际参数,设定合理的逻辑参数限度,形成具有高度吻合性的能量管理规则。以此为基础,按照既定的能量管理规则对储能系统进行优化控制。在考虑区间运行能耗需求的基础上,缩小能耗需求差异。

3.3.2 能量管理策略仿真验证

选择具有代表性的仿真验证参数,构建形成具有层次性的仿真验证模型,清晰直观地体现地铁牵引供电系统的综合状态,对各运行区间内牵引能耗进行计算分析。通过上述操作,可得出基于自牵引能耗最大为约束条件的模型,分别描述地铁列车不同运行模式的能耗状态。以地铁列车正常运行为例,应把握耦合区间系数,使储能系统在不同类型状态下仍然可发挥能量供应作用。选择具有节能属性的模块装置,弥补负荷分布等级之间的差异,满足地铁牵引供电系统节能设计构造运转要求。通过仿真验证,对地铁列车能量管理策略进行动态优化调整。

4 地铁列车节能运行控制技术

4.1 地铁列车节能运行控制计算

4.1.1 地铁列车运行计算原理

根据地铁列车编组数量差异与长度差异等,将其作为单质点动力学模型,并运用具有参数化的计算方法,对其节能运行控制进行计算分析。在计算过程中,需要考虑地铁列车牵引力、阻力和制动力等彼此间的相互影响关系。其中,牵

引力主要来自于地铁列车传统装置,主要将接触网方面的电能转换为供列车运行的机械能,具有正向属性,且可分为恒力矩区、恒功区和特性区等三个部分;阻力则可细划分为基本阻力、附件阻力和制动力,所形成的牵引力系数和制动力系数等均具有逻辑关系。

4.1.2 固定时分下的列车节能优化

当前技术条件下的地铁列车运行策略主要包括最小时分和固定时分两种类型,二者在适用条件、技术状态与优化效果等方面存在显著差异,需要结合列车运行最短时间等参数,进行节能优化。现代软件技术的快速发展与实践运用,为固定时分下的列车节能优化提供了更为灵活便捷的技术载体,使传统技术条件下难以实现的列车节能优化目标更具可达性。对此,技术人员可采用软件平台,将列车最大牵引力等参数导入其中,得到列车在不同区间范围内的运行策略。

4.2 地铁列车节能运行控制仿真

4.2.1 仿真条件

地铁列车节能运行控制方阵条件主要分为实际线路条件和车辆条件等两种类型,在仿真实践中应予以综合考虑。通过对地铁列车相对里程和终止里程进行对比,在考虑该运行区间限速的同时,得到限速曲线,反映本区间内的节能数据状态。同时,运用地铁列车总质量、拖车总质量和车辆数等参数,计算地铁列车运行阻力,并针对牵引特性曲线牵引力条件等,对牵引供电系统节能状态作出评价分析。上述环节的操作过程需要及时纠正与处理仿真条件中的各类技术参数偏差,将其变化偏离幅度控制在技术允许范围内。

4.2.2 最小时分算法

最小时分算法是地铁列车节能运行控制中的主要算法之一,其需要根据当前列车速度、位置和限速条件等,判断列车是否进入制动区域,形成制动工况;采用牵引工况,对比车辆实际速度与限速的偏差,形成匀速工况。可事先设定最小时分算法流程,首先对地铁车辆的线路信息等进行初始化操作,根据线路条件划分区间,判断列车工况,计算列车速度等参数。在该基础上,判断列车是否到达终点,循环执行上述操作。按照最小时分算法的运行效果分析,可得出列车牵引过程中需要消耗的电能数量,为改进节能优化设计方法提供依据。

4.2.3 固定时分算法

固定时分算法是相对于最小时分算法而言的。与最小时

分算法不同,固定时分算法的灵活性更强,可针对地铁列车的不同运行强度要求等,插入惰行点等,以控制优化列车运行时间的方式,判断运行耗能。基于固定时分算法的地铁牵引供电系统节能优化设计应充分做好空间规划、空调规划、电力规划和安全规划,将高密度模块化装置等作为基本载体,实施牵引供电系统节能分区,配置特定性能、需求与应用条件的设备,实现工作负载状态的分区化管理,对牵引供电系统能耗进行动态化调控。配置能耗监测模块,及时识别来自于牵引供电系统的异常能耗信息,以辅助技术人员及时采取有效技术措施予以控制,实现牵引供电系统节能的智能化控制。

4.3 基于遗传算法的惰行控制策略

4.3.1 遗传算法

遗传算法属于随机搜索算法范畴,通过对事先选定的各类参数进行交叉、变异与替代等操作,对算法模型进行求解,在地铁牵引供电系统节能优化中发挥着关键作用。基于遗传算法的惰行控制策略运用,应首先对铁路、列车和仿真等内容进行定义,得到初始后的惰行点位置数据,对惰行方案下的列车运行时分和能耗值进行模拟计算,校核适应度值,使节能优化设计效果符合预期方案。在完成惰行控制方案后,可进一步优化相应运行指标。

4.3.2 基于列车节能的优化方法

针对不同工况进行列车模拟运行仿真,首先增大电制动力的比例,使地铁牵引供电系统能量能够被车载储能系统全部吸收。由于列车牵引电机的电制动力输出有限,可通过降低列车制动力的方法减小空气制动力,从而等效提高列车电制动力比例。增大电制动比例后,列车回馈的能量明显增加,而列车牵引能量无明显增加,电制动比例越大,列车节能效果越明显。

5 结语

总之,地铁牵引供电系统节能优化是一个系统工程,需要从能量回收、系统设计、运行控制等多方面采取措施。本文分析表明,通过综合应用现有技术可实现20%以上的节能效果。未来随着新技术的发展,节能潜力还将进一步提升。建议在地铁规划设计和运营管理中重视节能优化,加大技术创新和应用力度,为城市轨道交通可持续发展做出贡献。

参考文献

[1]胡银全,张浩然,刘杰.城市轨道交通牵引供电及电力技术[J].南方农机,2020,51(8):203-204.

[2]陈哲.地铁牵引供电系统的可靠性[J].工程建设与设计,2020(6):88-89.

[3]李海翔.浅探地铁直流牵引供电系统馈线的保护技术[J].科技创新,2021(18):166-167.

作者简介:张蒙(1994年8月——),男,汉族,本科,研究方向:城市轨道交通工程;

李念宏(2000年7月——),男,汉族,本科,研究方向:城市轨道交通工程;

李阳(1992年11月——)男,汉族,本科,研究方向:城市轨道交通工程。