

城市轨道交通既有有线换装双向变流器研究

储航道, 于喜林

神铁二号线(天津)轨道交通运营有限公司, 天津 300000

摘要: 本文介绍了既有城市轨道交通线路供电系统的常规设计方案, 并阐述了双向变流器的特性及在轨道交通中的应用。在此基础上, 本文研究、讨论了既有线路换装双向变流器的优势及适配性, 并选择一条既有线作为算例, 进行调研和换装双向变流器的方案设计, 经计算、对比与分析, 该线换装双向变流器可以提升供电质量、同时减少约2.3%的牵引能耗。本文认为换装双向变流器对既有有线供电系统的供电质量及节能减排具有积极的影响。

关键词: 城市轨道交通; 既有线; 换装; 双向变流器

Research on Bidirectional Converters Replaced on Existing Urban Rail Transit Lines

Chu HangDao, Yu Xilin

Shentie Line 2 (Tianjin) Rail Transit Operation Co., LTD. Tianjin 300000

Abstract: This paper introduces the conventional design scheme of the existing urban rail line power supply system, and expounds the characteristics of the bidirectional converter and its application in rail transit. On this basis, this paper studies and discusses the advantages and adaptability of the existing line to replace the bidirectional converter, and chooses an existing line as an example to investigate and design the bidirectional converter. Through calculation, comparison and analysis, it is found that the line can improve the power supply quality and reduce the traction energy consumption by about 2.3%. This paper considers that the replacement of bidirectional converters has a positive impact on the power supply quality, energy saving and emission reduction of the existing power supply system.

Keywords: urban rail transit; existing line; replacement; two-way converter

引言

截至2021年12月31日, 全国共有51个城市开通运营城市轨道交通线路269条, 运营里程8708公里。如此庞大的城市轨道交通运营里程, 使城轨交通“碳达峰、碳中和”成为实现交通运输行业绿色发展的重要挑战和历史性任务。牵引系统是轨道交通车辆的“心脏”, 是列车动力的关键来源。其能耗约占城市轨道交通总能耗的50%。因此, 降低列车牵引能耗, 能够有效降低城市轨道交通总能耗, 降低碳排放量。

一、城市轨道交通牵引系统及仿真方法

(一) 牵引能量流向

城市轨道交通牵引系统电力来源于城市220/110 kV 外电源, 经中压环网, 传向城市轨道交通牵引网系统。中压环网与牵引网之间一般有4种类型的能量传递装置: 1) 整流机组: 能量单向流动, 中压环网→整流机组→牵引网(轨); 2) 双向变流器: 能量双向流动, 中压环网↔双向变流器↔牵引网(轨); 3) 中压逆变: 能量单向流动, 中压环网←中压逆变←牵引网(轨); 4) 储能装置: 能量双向流动: 储能装置↔牵引网(轨), 但不接入中压环网。一般的, 整流机组是默认设置的, 双向变流器、中压逆变和储能装置选择其一设置或不设置。

(二) 常规供电系统的劣势

常规供电系统一般采用两套整流机组并联的方式。整流机组是采用基于二极管的24脉波整流, 应用较为成熟, 却存在以下劣势:

- (1) 再生能量回收比例低。整流机组只能为列车提供能量, 需要额外增加设备以提高回收车辆再生能量的比例, 增加了投资与用地。
- (2) 直流输出电压波动范围大。变电所输出电压会随着列车运行工况的变化出现较大波动, 对列车的安全稳定运行不利, 同时也限制了供电距离。

(三) 再生能量利用

目前轨道交通普遍采用的VVVF动车组列车, 一般制动能量可达到牵引能量的20%~50%甚至更高。轨道交通公交化的运输模式决定了城市轨道交通具有列车运行密度大、站间距小、起停

作者简介: 储航道(1982-), 男, 汉族, 江苏海安, 工程师, 工学学士, 研究方向: 轨道交通供电及机电系统。

频繁的特点，列车制动蕴含的能量十分巨大。当列车制动时产生的再生能量被其它列车或设备再利用时，再生能量才是有效和有益的。一般情况下，相邻车的吸收并不能保证再生能量的全部或大部分利用，尤其是非高峰时，发车对数较低的时段。

在供电系统中增加双向变流器、中压逆变或储能装置提升再生能量的利用率，已成为共识。

(四) 牵引、供电仿真方法

列车牵引仿真模拟是根据设计线路纵断面、列车牵引特性、供电特性、列车阻力特性、牵引网电压以及运营组织要求等各种资料仿真各个运营阶段列车全线运行状态，其产生的数据作为运行图模拟和供电节点网络模拟的数据基础。列车是供电系统的最主要服务对象，其取流特点具有动态波动性强、在牵引网上的取流位置不固定等特点，而直流系统全线贯通一体，任何位置的负荷波动均会影响到整个供电网络的电气特性。这样的负荷和系统特点，常规的公式计算法很难准确表述列车的动态运行过程及牵引供电系统的实时负荷特性。供电仿真是对构建好的供电系统网络进行有限断面切割，对任意切割断面建立数学模型，利用计算机进行全网络全周期时段的动态分析，获得给定线路下，任意运行条件、任意时刻、任意断面的电气特性参数^[1]。

二、双向变流器特性及应用

(一) 双向变流器的特性

双向变流器作为电压源型 PWM 整流器，具备稳压的输出外特性。双向变流器应用到城轨牵引供电系统中，工作在逆变状态时，能够将列车再生制动能量反馈回中压环网，避免在电阻上的消耗，节约能源；工作在整流状态时，可为列车提供牵引功率，在一定程度上维持直流网压的稳定。此外，还可以工作在无功补偿状态，提高交流系统功率因数^[2]。

基于 IGBT 的双向变流器，具备取代整流机组加能馈装置的能力，而双向变流器与整流机组的下垂特性不一致，使得双向变流器采用何种控制策略与整流机组协同运行，需要进行选择。

(二) 双向变流器应用

目前全国已经有 10 多个城市在轨道交通中应用了双向变流器。应用方式主要分为两类：1) 全线牵引所按照 2 套整流机组 + 1 套双向变流器或 1 套整流机组 + 2 套双向变流器布置，提升供电质量，降低牵引能耗，例如宁波 4 号线；2) 针对供电能力薄弱的区域，加装 1 套双向变流器提升供电质量，例如济南 2 号线。

目前，双向变流器主要应用在较新的线路，即近年来开通运营或正在设计、施工的线路。尚未有针对较早建成的线路使用双向变流器的案例。

三、换装双向变流器方案

(一) 既有工程概况及供电方案

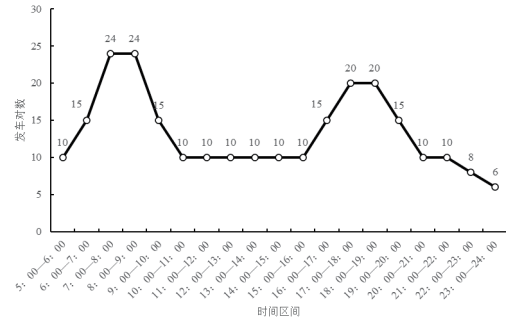
(1) 线路、行车、车辆参数

线路全长 27 千米，设站 20 座，与 2012 年建成通车，建成超

过 10 年。线路纵断面及车站如图 1 所示，全日行车计划如图 2 所示，车辆采用 6 节编组 B 型车。



> 图 1 线路纵断面及车站示意图



> 图 2 全日行车计划示意图

(2) 既有供电系统方案

该线供电制式为直流 750V。全线共设置 13 座牵引变电所，牵引所平均间距为 2.17 km。牵引所设置位置如图 3 所示。既有整流机组容量为 2×1.2 MW 或 2×1.8 MW。该线供电系统采用二极管整流器作为供电装置，且未安装其它再生或储能装置。当列车减速制动时，电机从电动状态转换为发电状态运行，会产生大量再生制动能量，被输送到接触网上。由于二极管供电装置为单向能量变换（无法再将直流电转换为交流电反送回中压环网），因此当附近没有列车恰好处于牵引状态时，这部分能量只能被设置在车上的制动电阻装置消耗掉，以防止直流电压飙升，保证列车供电安全。然而，这种解决方式将列车再生制动能量白白消耗掉，造成能量的巨大浪费，同时导致隧道温升和环控系统二次耗能等诸多问题。



> 图 3 供电设施分布示意图

牵引供电系统采用的二极管整流机组输出电压不可控，导致直流接触网电压存在较大波动，尤其是在车流密度大和变电所解裂等极端情况下，供电电压过低，不利于列车牵引性能发挥，影响列车通过能力^[3]。

该线在主变电所内配置专用无功补偿设备 SVG，以提高系统功率因数，但 SVG 工作时会因为功率损耗而引起器件升温，导致设备发热严重且故障率高，严重时可能导致设备失效。

(二) 换装双向变流器方案

既有线相对新建线路，设备房间的限制更为明显。新设备如需安装需要考虑房间的容纳情况，以及与既有设备的兼容性。为有效利用该线的再生能量，同时提升供电质量，选择有条件牵引所进行双向变流装置替换整流机组改造，牵引设备配置模式改为 1 套整流机组（保留）+ 1 套双向变流器（替换既有的 1 套整流机组），以实现变流器能量的任意双向流动。

换装方案不仅可解决传统供电系统列车制动能量浪费，网压波动大等问题，还可以为主所专用无功补偿装置 SVG 分担一部分

功率损耗,降低 SVG 发热温度,实现“一机多能”,为构建一个节能高效、结构简化、性能提升、功能先进的新型城轨交通牵引供电系统奠定基础。

四、换装双向变流器对供电系统的影响

该节将对换装前后的供电系统进行的仿真、分析,给出了该既有有线换装双向变流器对供电系统的影响。

(一)对牵引能耗的影响

经过牵引供电仿真、计算,既有供电系统牵引能耗计算(分行车对数,单小时)结果如表1所示,换装后供电系统牵引能耗(分行车对数,单小时)计算结果如表2所示,全日牵引能耗和线路损耗对比表格如表3所示。经对比,3个牵引所改装双向变流器后,牵引能耗每日可减少3417 kW.h,约占原牵引能耗的2.3%,节能效果明显。

表1 既有供电系统牵引能耗计算结果

行车对数	整流机组输出 (kW.h)	牵引能耗 (kW.h)
24	14377	14377
20	11922	11922
15	9171	9171
10	6171	6171
8	4952	4952
6	3832	3832

注:既有供电系统全线只有整流机组系统,牵引能耗即整流机组输出。

表2 换装后供电系统牵引能耗计算结果

行车对数	整流机组输出 (kW.h)	双向变流器输出 (kW.h)	双向变流器吸收 (kW.h)	牵引能耗 (kW.h)
24	13346	807	301	13852
20	11441	341	160	11622
15	9081	247	527	8801
10	6338	56	458	5936
8	5167	68	507	4728
6	4119	17	524	3611

注:换装后供电系统全线既有整流机组系统又有双向变流器的线路,牵引能耗 = 整流机组输出 + 双向变流器输出 - 双向变流器吸收。

表3 改装前后牵引能耗、线路损耗对比

	既有供电系统 (kW.h)	换装双向变流器 (kW.h)	差值 (kW.h)	差值比例
全天牵引能耗	151332	147916	-3417	-2.3%

注:差值 = 换装双向变流器 - 既有供电系统;差值比例 = 差值 / 既有供电系统,下同。

(二)其他影响

(1)运营的影响

项目正式实施过程中,需在满足新设备最小安装间距及条件要求的条件下,减少工程量及改造时间,节省投资,且不影响该线的正常运营。

(2)保护系统的改造与调试

本次改造利用既有交直流开关柜设备,保护装置需做相应调整。各保护设备应选择适用于双向变流装置的保护装置及功能,并对保护定值进行整定,更换完成且定值修改后对保护装置进行调试^[4]。

(3)关联系统的影响

城市轨道交通是一个整体,用双向变流器替换整流机组时,需对变电所综合自动化软件、设备房间通风空调、土建和综合监控系统进行校核、调整。

(三)影响分析

通过计算、分析可知,该线换装双向变流器可以减少约2.3%的牵引能耗,同时提升供电质量,对既有有线供电系统有积极影响。改造中,需在过程中避免影响正常运营,同时对保护定值及相关系统进行校核、调整。

五、结论

本文介绍了既有城市轨道交通线路供电系统的常规设计方案,并阐述了双向变流器的特性及在轨道交通中的应用。在此基础上,本文研究、讨论了既有线路换装双向变流器的优势及适配性,并选择一条既有有线作为算例,进行调研和换装双向变流器的方案设计:选择其中3个牵引所,将1套整流机组换装成1套双向变流器;通过牵引、供电仿真计算、对比与分析,该线换装双向变流器可以提升供电质量、同时减少约2.3%的牵引能耗。本文认为换装双向变流器对既有有线供电系统的供电质量及节能减排具有积极的影响。

参考文献

[1] 施仲衡,丁树奎.城市轨道交通绿色低碳发展策略[J].都市轨道交通,2022,35(01):1-4+11.
 [2] 于晓杰.城市轨道交通列车节能运行优化研究[J].电气铁道,2020,31(S1):128-132.
 [3] 郑旺.城市轨道交通牵引供电双向变流器应用研究[D].中国矿业大学,2019.DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2019.000352.
 [4] 张钢,刘志刚,牟富强.双向变流器在城轨牵引供电系统中的应用[J].都市轨道交通,2014,27(04):109-112.