

# 含双向变流装置的城市轨道交通 牵引供电系统研究进展\*

常雨欣<sup>1</sup> 陈佳琪<sup>2,3</sup> 祁生花<sup>4</sup> 沈世全<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学交通工程学院, 650106, 昆明; 2. 丽江雪山轨道交通有限公司, 674199, 丽江;  
3. 中铁建云南投资有限公司, 650220, 昆明; 4. 中铁十六局集团第四工程有限公司, 101400, 怀柔)

**摘要** [目的]我国城市轨道交通线路传统的牵引供电系统大多采用二极管整流机组,该方式存在电能只能单向流动、再生制动能量无法回馈到供电系统等问题。可有效解决此问题的基于 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)的双向变流装置已研制成功,并有应用案例。为了促进双向变流技术的进一步发展,需了解双向变流装置的研究进展。[方法]阐述了双向变流装置特点,整流/逆变双向变流技术概要及双向变流能量综合管理系统构架。分析了双向变流装置在国内外的应用现状,阐述了 2 个电压控制策略(恒压控制策略、下垂控制策略)的直流电压、电流输出外特性。介绍了既有的潮流计算算法,探讨了含双向变流装置的城市轨道牵引供电系统的算法要求。[结果及结论]双向变流装置在城市轨道交通供电系统中的成功应用,实现了列车的再生制动能量回馈,提高了整个供电系统的运行效率。

**关键词** 城市轨道交通;牵引供电系统;双向变流装置;潮流计算

中图分类号 U224.2<sup>+</sup>2:U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.033

## Research Progress of Urban Rail Transit Traction Power Supply System with Bidirectional Converters

CHANG Yuxin<sup>1</sup>, CHEN Jiaqi<sup>2,3</sup>, QI Shenghua<sup>4</sup>, SHEN Shiquan<sup>1</sup>

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, 650106, Kunming, China; 2. Lijiang Xueshan Rail Transit Co., Ltd., 674199, Lijiang, China; 3. China Railway Construction Yunnan Investment Co., Ltd., 650220, Kunming, China; 4. China Railway 16th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., 101400, Huairou, China)

**Abstract** [Objective] Most of the traditional traction power supply systems of urban rail transit lines in China use diode rectifier units, which have the deficiencies that electric energy

can only flow in one direction and the regenerative braking energy can not be fed back to the power supply system. The bidirectional converter based on IGBT (insulated gate bipolar transistor) is successfully developed and applied in actual cases. In order to promote the further development of bidirectional converter technology, the relevant research progress needs to be studied. [Method] The characteristics of bidirectional converters, rectifier/inverter bidirectional conversion technology, and the integrated management system architecture of bidirectional conversion power are described. The status quo of bidirectional converter application in China and abroad is analyzed, and the DC voltage and current output characteristics under two voltage control strategies i. e. constant voltage control strategy and droop control strategy, are expounded. The existing current calculation algorithms are introduced, and the algorithm requirement of the urban rail traction power supply system with bidirectional converters is discussed. [Result & Conclusion] The successful application of bidirectional converters in urban rail transit power supply system realizes the train regenerative braking energy feedback, improving the operation efficiency of the whole power supply system.

**Key words** urban rail transit; traction power supply system; bidirectional converter; current calculation

城市轨道交通列车在运行过程中需要频繁启动、制动,列车制动时会产生大量的再生制动能量。我国城市轨道交通线路传统的牵引供电系统大多采用二极管整流机组,该方式下,电能只能单向流动,再生制动能量无法回馈到供电系统中,这不仅导致能量浪费,还可能致使牵引网电压升高。为解决二极管整流机组存在的问题,基于 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)的双向变流装置已经研制成功。含双向变流装置的牵引供电系统具有许多优点,如能

\* 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交教科便[2021]85 号)

量双向流动、提高电能质量、可调节直流电压、减少变电站数量等。由于双向变流装置的电压具有可控性,含双向变流装置的牵引供电系统可以智能化控制牵引网潮流,实现再生能量回馈并减少电能损耗。

本文旨在深入探讨含双向变流装置的城市轨道牵引供电系统的研究进展。本文系统性地回顾了现有文献,分析了双向变流装置的关键技术及该装置在城市轨道交通供电系统中的应用,梳理潮流计算的基础理论和方法,着重探讨了含双向变流装置的潮流计算方法,以期为城市轨道交通供电系统的可持续发展和高效运行提供参考。

## 1 双向变流装置主要技术

丽江轨道交通1号线是我国首个全线应用双向变流技术的项目,也是全国首个在高原地区应用全功率双向变流装置挂网的项目。该工程采用了列车牵引/制动工况智能识别、PWM(脉冲宽度调制)双向变流控制策略、全线双向变流装置协调控制等多项关键技术,提出了多个技术创新点。该项目可为其他类似的有轨电车建设项目提供参考,为双向变流器在直流牵引供电系统的大规模应用提供理论及实践支持。

### 1.1 双向变流装置特点

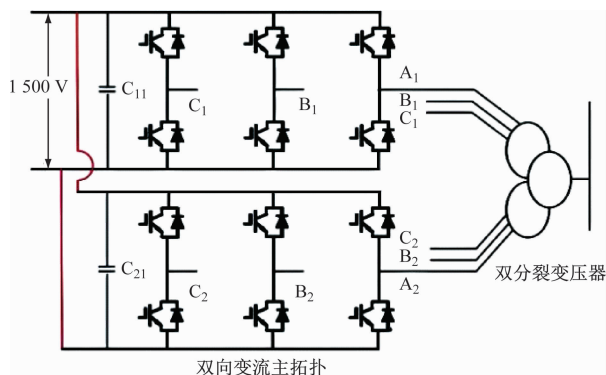
双向变流装置采用全控型 IGBT 器件和四象限 PWM 控制技术。双向变流装置代表了城市轨道交通牵引供电系统未来的发展趋势,其特点包括:①允许能量双向流动,节能效果显著;②具有更好的直流输出特性,列车牵引/制动过程中直流电压的波动较小;③可独立控制有功/无功运行状态,具备无功补偿和再生制动能量回收功能,可完全取代“整流机组+回馈装置+主所 SVG(动态无功补偿)”装置,极大地简化了牵引供电系统的结构。

### 1.2 整流/逆变双向变流技术

双向变流技术将传统的整流器和再生制动能量吸收逆变装置合二为一,大大降低了设备的总体积,减少了设备的占地面积。此外,双向变流技术还可以稳定直流电压,减少能馈装置(直流控制柜、高压交流柜、能馈变压器等)的数量。

双向变流装置主要由直流控制柜、双向变流功率柜等组成,其功率模块及控制系统分别采用风电变流器、SVG 等技术成熟方案。双向变流装置的本地/远程控制采用 RS-485 以太网口,人机界面为触

摸屏,其主要参数包括:①直流额定电压为 1 500 V;②单模块的额定功率为 1.2 MVA;③单模块的最大扩容功率为 9.6 MVA;④再生制动能量回馈效率大于 96%;⑤交流侧功率因数大于 0.99;⑥系统谐波电流小于 5%。双向变流装置主拓扑图如图 1 所示。



注: A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>—三个相位对应的接口编号; C<sub>11</sub>、C<sub>21</sub>—支撑电容编号。

图1 双向变流装置主拓扑图

Fig. 1 Main topology of bidirectional converter

### 1.3 双向变流能量综合管理系统

传统的直流牵引供电系统采用二极管整流机组供电,二极管整流机组只能实现能量从牵引网到列车的单向流动,无法将列车制动产生的再生制动能量回馈到供电系统中。双向变流能量综合管理系统针对多台变流器的牵引及回馈工况,优化系统内部的能量流向,提高系统的节能水平。此外,双向变流能量综合管理系统能有效控制双向变流末端电压,优化系统内无功管理,提高系统电压的稳定性;针对双向变流器并网性能,双向变流能量综合管理系统还可实现电能量在线监测、电网适应性监测等功能。

双向变流能量综合管理系统构架如图2所示。双向变流能量综合管理系统由数字型多CPU(中央处理器)的微机综合保护控制单元、人机交互单元、I/O(输入/输出)处理单元等组成:

1) 数字型多CPU的微机综合保护控制单元:采用高性能处理器及多个高性能逻辑芯片组成,实现对双向变流装置的控制及保护。

2) 人机交互单元:采用高性能电脑,实现对双向变流装置的监视、参数管理、故障存储及时间记录等功能;与上层管理系统建立通信,实现对设备的集中控制。

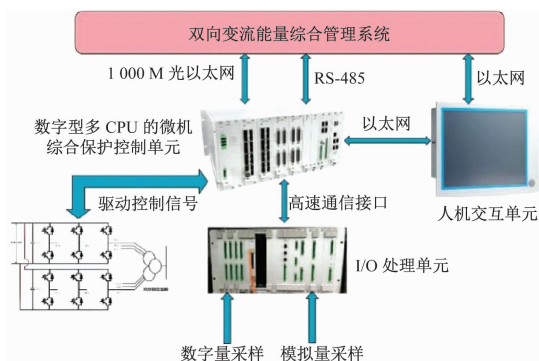


图2 双向变流能量综合管理系统架构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the integrated bidirectional conversion power management system architecture

3) I/O 处理单元:负责采集和发送外部信号,并和主处理单元进行交互,实现信号处理。

## 2 双向变流装置的应用现状及电压控制策略

### 2.1 双向变流装置的应用现状

#### 2.1.1 双向变流装置在国外的应用现状

日本东京地铁筑波快线使用的是1 500 V 双向

变流器(额定功率为4.5 MW)。由于该线途经筑波磁性天文台,因此对该线产生的磁性干扰有严格的限制要求。如果采用二极管整流器,会导致电流泄漏并形成磁场。为了减少电流泄漏,在筑波磁性天文台附近区域引入了电压馈电型双向变流器。使用该电压馈电型双向变流器后,不仅减少了泄漏电流,还能将列车的再生制动能量馈送回供电系统,实现了电能的双向流动,提高了能源的利用率。

法国阿尔斯通公司研发了 HESOP(智能可逆直流牵引变电所)系统,旨在实现再生制动能量的回收利用。HESOP 系统采用基于 IGBT 核心技术的双向变流装置,用以替代传统的二极管整流机组。采用 HESOP 系统后,列车制动产生的再生制动能量回馈效率较高,列车不再需要安装电阻来消耗再生制动产生的能量,因此,HESOP 系统不仅减轻了列车自身质量,还减少了电阻耗能产生的热量。在牵引或逆变模式下,该系统均可调节输出电压,减少能量损失,增加牵引变电所之间的距离<sup>[1]</sup>,减少谐波对供电系统的影响,提高电网的整体稳定性。HESOP 设备的应用案例如表1所示。

表1 HESOP 设备的应用实例

Tab.1 Application examples of HESOP devices

国家、城市	线路名称	电压额定值/ V	功率额定值/ MW	设备数量/ 个	设备安装 年份
意大利米兰	米兰地铁郊区线	1 500	4.0	16	2022
德国汉堡	汉堡地铁2号线	750	2.0	1	2020
阿拉伯联合酋长国迪拜	迪拜地铁红线延长段	750	2.0	15	2020
沙特阿拉伯利雅得	利雅得地铁4号线、5号线、6号线	750	1.2	72	2020
巴拿马的巴拿马城	巴拿马城地铁2号线	1 500	4.0	8	2019
澳大利亚悉尼	悉尼 CBD 轻轨线	750	1.2	9	2017
澳大利亚悉尼	悉尼东南轻轨线	750	2.0	4	2017
英国伦敦	伦敦地铁维多利亚线	600	1.0	1	2015

注: CBD—中央商务区。

#### 2.1.2 双向变流装置在我国的应用现状

目前,双向变流装置已成功应用到我国多条城市轨道交通线路中。这些线路投运至今,双向变流能量综合管理系统运行稳定,节能效果显著。

丽江轨道交通1号线自2022年11月28日试运行以来,双向变流能量综合管理系统运行稳定,取得了预期的运营效果。该线基于10 km 线路位于55‰长大坡道上的特点,采用双向变流技术实现了能量的回收利用。当列车运行至长大坡道下坡线

路开始制动时,列车将动能转换为电能,然后通过双向变流装置将该部分电能回收至供电系统中,以供其他列车使用。通过此项技术创新,实现了预期节能20%的目标。通过系统调试及试运行,该线取得了以下3个重要成就:

1) 双向变流装置首次在我国高原地区挂网应用,具备了牵引供电和制动回馈功能。

2) 首次在我国高原地区验证了全功率双向变流供电系统的可行性和可靠性,为双向变流供电系



统在全线的正式应用奠定了基础,积累了运营经验。

3) 验证了双向变流装置替代二极管整流机组的可能性。双向变流装置占地面积小,符合未来城市轨道交通牵引供电系统的发展趋势。

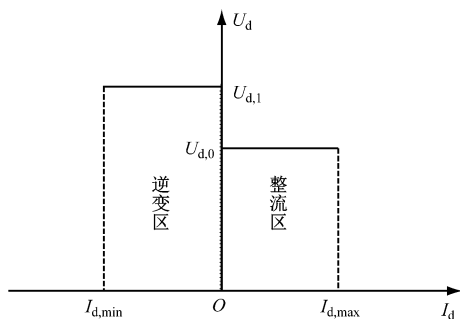
除丽江轨道交通1号线外,双向变流装置在我国城市轨道交通线路上的应用案例还包括:①北京地铁10号线采用了大功率双向变流装置,成功实现了列车再生制动能量回馈,且牵引网的网压非常稳定。②宁波地铁2号线于2017年采用双向变流装置进行挂网试验,成功应用双向变流装置进行了牵引供电和再生制动能量回馈;2018年,该装置在宁波地铁2号线宁波大学站正式挂网运行,随后宁波地铁3号线、4号线、5号线均采用了双向变流装置<sup>[2]</sup>。

## 2.2 双向变流装置的电压控制策略

双向变流装置的电压具有可控性,且具有恒压特性和下垂特性。含双向变流装置的牵引变电站电压也可控,牵引变电站的电压变化决定着整个牵引供电系统的潮流分配,因此,研究双向变流装置的电压控制特性并选择合适的电压控制策略,具有重要的意义。

### 2.2.1 恒压控制策略

双向变流装置恒压控制策略下的直流电压、电流输出外特性如图3所示。根据列车运行工况,将输出外特性曲线分为逆变区、过渡区和整流区,可以设置逆变区与整流区的电压差(即图3中 $U_{d,1}$ 与 $U_{d,0}$ 的差值),以减少环流,保持牵引供电系统稳定。



注: $U_d$ —直流侧牵引网网压; $I_d$ —输出直流电流; $U_{d,1}$ —逆变电压; $U_{d,0}$ —空载电压; $I_{d,min}$ —双向变流装置逆变(整流)工况下最小输出电流; $I_{d,max}$ —双向变流装置逆变(整流)工况下最大输出电流。

图3 双向变流装置恒压控制策略下的直流电压、电流输出外特性

Fig. 3 DC voltage and current output characteristics of the bidirectional converter under constant voltage control strategy

对徐州地铁2号线的牵引变电所功率数据进行测试分析后发现,双向变流装置的负载功率分配受列车起动电压的影响,当列车起动电压升高时,双向变流装置的整流输出功率有所增加。综上所述,采用恒压控制时,变电站之间无法实现协同配合,其控制性能并不高。

### 2.2.2 下垂控制策略

下垂控制策略应用较广泛,其电压随着直流电流的增加,呈现出线性下降的趋势。双向变流装置下垂控制策略下的直流电压、电流输出外特性如图4所示。若牵引供电系统大规模采用双向变流装置进行交直流转换,应选择下垂控制策略并允许能量跨区间传输,以减小双向变流装置容量,进而减少线路的建设成本。由于下垂控制参数决定下垂控制效果,还需通过试验得出下垂系数的选取范围。

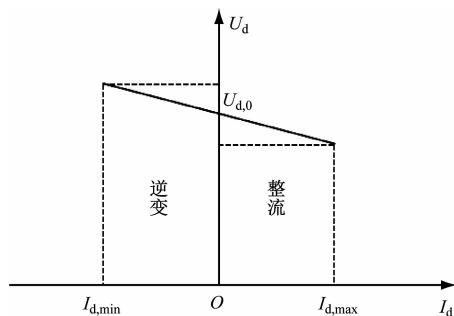


图4 双向变流装置下垂控制策略下的直流电压、电流输出外特性

Fig. 4 DC voltage and current output characteristics of the bi-directional converter under droop control strategy

牵引供电系统采用双向变流装置且双向变流装置采用下垂控制策略时,供电系统中多个变流器可协同整流并实现功率均分,以协调变电站间的能量分配。但是,下垂控制策略存在参数调整困难的问题:下垂系数设置过大,可能会导致直流电压下降过多;下垂系数设置过小,可能会影响双向变流装置能量的回馈效率。

## 3 潮流计算

潮流计算是供电系统分析的重要环节,通过计算供电系统中各节点的电压和支路的电流,确保电能能在系统中均衡分布。随着城市轨道交通应用技术的不断发展,牵引供电系统对潮流计算提出了更高的要求。双向变流技术使得能量可以双向流动,极大地提高了系统的灵活性,因此,供电系统分析时需要考虑更多因素,潮流计算模型需要进行优

化。目前,潮流计算主要有交替求解法和联立求解法 2 种算法。

### 3.1 交替求解法

交替求解法将交流系统和直流系统分开求解。交流系统进行潮流计算时,将直流系统转换为接在交流系统节点上的等效负荷,得出交流系统各节点的电压,进一步计算交流节点电压幅值和相角。直流系统进行潮流计算时,将交流系统模拟为恒定电压节点,再计算直流系统的状态变量和功率,得到直流系统的潮流计算结果。最后将交流系统、直流系统的潮流计算结果交替迭代,直至结果收敛。

交替求解法降低了计算机的内存要求及算法的难度,提高了仿真速度,但该算法忽略了交流与直流系统参数耦合的问题,可能会导致潮流计算过程中收敛性不佳。

### 3.2 联立求解法

联立求解法将直流系统中的变量等值为交流节点的电压幅值函数,从而将交流-直流供电系统的潮流问题简化为纯交流供电系统的潮流问题。与交替求解法相比,该算法考虑了直流系统和交流系统参数之间的耦合关系,计算过程收敛效果更佳,但该算法下整体潮流计算的雅可比矩阵结构更复杂,导致编程难度加大,计算时间增加。

### 3.3 含双向变流装置的潮流计算算法

也有学者结合了上文 2 种算法的优点,提出基于连接交流、直流系统整流装置的联合潮流计算方法:

1) 针对整流机组模型,联立交流、直流节点偏差方程,加入整流机组控制方程,再用已有的潮流计算方法得出潮流分析结果。

2) 针对整流机组转换方程,将整流机组两端的交流和直流参数进行转化,避免交流、直流系统数据直接联系。采用常用的潮流分析法分别对交流、直流系统进行潮流计算,再用经过转换的数据进行交替迭代,直至计算结果收敛。

随着双向变流技术的引入与发展,需要深入研究含双向变流装置的潮流计算方法。研究发现,双向变流装置的引入、牵引变电所的状态变化、双向变流装置的供电方案等因素均会影响潮流计算结果<sup>[3]</sup>。针对双向变流装置引入的影响,文献[4]考虑了双向变流装置容量、双向变流装置采用不同输出特性时对潮流计算的影响,并采用交直流一体迭代的潮流计算算法对牵引供电系统进行了潮流分

析;针对牵引变电所状态变化影响潮流计算收敛性的问题,文献[5]采用滞环比较策略来确定牵引变电所状态,并将该策略应用到潮流计算中;部分文献针对双向变流装置与二极管整流机组协同供电方案,建立了城市轨道牵引供电系统协同供电稳态模型,提出了考虑协同控制的联合潮流计算方法。

综上所述,目前城市轨道交通牵引供电系统潮流计算方法已经取得一些成果,但交流、直流耦合的潮流计算及含双向变流装置的潮流计算方法仍有待完善。随着双向变流装置在城市轨道交通的广泛应用,为了更准确地分析城市轨道交通牵引供电系统潮流,必须进一步研究含双向变流装置的潮流计算算法,使得交流、直流潮流计算的精度更高、收敛性更好、迭代次数更少。

## 4 结语

双向变流装置在城市轨道交通供电系统中的成功应用,实现了列车的再生制动能量回馈,提高了整个供电系统的运行效率。牵引供电系统潮流分析是城市轨道牵引供电系统设计和优化的重要环节,可以为系统的稳定运行提供理论依据,以更好地优化列车的运行方案、减少系统能耗,进而为城市轨道交通线路的安全、高效运行提供有力支持。

## 参考文献

- [1] 王怀东,刘涛. HESOP 智能可逆直流牵引变电所研究[J]. 电气铁道, 2021, 32(5): 47.  
WANG Huaidong, LIU Tao. Study on HESOP intelligent reversible DC traction substation [J]. Electric Railway, 2021, 32(5): 47.
- [2] 成吉安. 城市轨道交通双向变流器牵引供电技术的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12): 110.  
CHENG Ji'an. Application of traction power supply technology with bidirectional converter for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(12): 110.
- [3] 周瑞兵. 城市轨道双向变流装置的供电方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
ZHOU Ruibing. Study on power supply scheme of bidirectional converter device for urban rail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [4] 张戢,刘炜,周瑞兵,等. 基于双向变流装置的城市轨道牵引供电系统潮流计算[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 92.  
ZHANG Jian, LIU Wei, ZHOU Ruibing, et al. Power flow of traction power supply system for urban rail transit based on bidirectional converter device[J]. China Railway Science, 2020, 41(1): 92.

(下转第 197 页)

## 4 结语

城市轨道交通供电系统运营初期或夜间停运期间,系统的容性无功较大,如果仅依赖主变电所SVG进行无功补偿,会造成SVG的无功补偿压力大,且无法实现无功就地平衡,因而无功补偿不够经济。本文提出了一种城市轨道交通能馈装置无功协调控制方案,协调能馈装置共同参与供电系统的无功补偿,并提出基于经济压差理论的能馈无功出力计算方法。现场试验结果表明,本文所提方案能够实现缓解SVG无功补偿压力、降低供电系统中压环网的有功损耗,及无功达到就地平衡等目的,具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] 何洋阳, 黄康, 王涛, 等. 轨道交通牵引供电系统综述[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 352.  
HE Yangyang, HUANG Kang, WANG Tao, et al. Overview of traction power supply system for rail transportation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(2): 352.
- [2] 王沛沛, 刘炜, 廖钧, 等. 城市轨道主变电所无功补偿装置容量评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 1063.  
WANG Peipei, LIU Wei, LIAO Jun, et al. Capacity evaluation of reactive power compensation device in the main substation of urban rail transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5): 1063.
- [3] 程晋然, 马天文, 杨振宇, 等. 地铁再生能馈装置辅助无功补偿的可行性研究[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 118.  
CHENG Jinran, MA Tianwen, YANG Zhenyu, et al. Feasibility study on reactive power compensation by metro regeneration energy feeding device [J]. Electrical Engineering, 2019, 20(3): 118.
- [4] 桑福环, 张海龙, 王林, 等. 地铁能量回馈装置的无功补偿控制策略[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 117.  
SANG Fuhuan, ZHANG Hailong, WANG Lin, et al. Control strategy of reactive power compensation applied in metro energy-feedback device[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(5): 117.
- [5] 朱士友, 阮白水, 全恒立, 等. 基于能馈式牵引供电装置的城市轨道交通无功补偿策略[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 16.  
ZHU Shiyu, RUAN Baishui, QUAN Hengli, et al. Study of urban rail reactive power compensation strategy based on energy-fed traction power supply equipment[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 16.
- [6] 张戡, 刘炜, 谢文君, 等. 基于逆变回馈装置的城市轨道交通分布式无功补偿方案研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(8): 75.  
ZHANG Jian, LIU Wei, XIE Wenjun, et al. Research on distributed reactive power compensation scheme of urban rail based on inverter feedback device[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(8): 75.
- [7] 解凯, 邹大云, 赵佳微, 等. 城市轨道交通供电系统的 CIM 拓展及应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 63.  
XIE Kai, ZOU Dayun, ZHAO Jiawei, et al. Extension and application of CIM for the urban railway traction power supply system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 63.
- [8] 付胜华, 李文. 城市轨道交通供电系统无功平衡分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 187.  
FU Shenghua, LI Wen. Reactive power balance analysis of urban rail transit power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 187.
- [9] 孟庆天, 李莉美. 光伏电站无功补偿容量分析与计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(6): 53.  
MENG Qingtian, LI Limei. Analysis and calculation on the reactive power compensation capacity for photovoltaic power station [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(6): 53.
- [10] 唐晓骏, 陈会员, 姚淑玲, 等. 基于改进经济压差的特高压电网无功电压控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 673.  
TANG Xiaojun, CHEN Huiyuan, YAO Shuling, et al. Reactive power and voltage control strategy for UHVAC power grid based on improved economic voltage difference[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 673.

· 收稿日期:2022-06-02 修回日期:2022-11-09 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-06-02 Revised:2022-11-09 Published:2024-09-10  
· 通信作者:赵佳微,助理工程师,zhaojw@nrec.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 192 页)

- [5] 刘炜, 曾佳欣, 马庆安, 等. 含双向变流装置的城轨交通牵引供电系统协同供电潮流计算[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(5): 1145.  
LIU Wei, ZENG Jiaxin, MA Qing'an, et al. Calculation of collaborative power flow for urban rail traction power supply system with bidirectional converter device [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(5): 1145.

· 收稿日期:2024-01-17 修回日期:2024-04-25 出版日期:2024-09-10  
Received:2024-01-17 Revised:2024-04-25 Published:2024-09-10  
· 第一作者:常雨欣,1975027567@qq.com  
通信作者:沈世全,副教授,shiquan@kust.edu.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license