

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.04.006

# 基于轨道交通供电系统双向变流装置分散补偿无功的技术与应用研究

戴丽君<sup>1</sup>, 杨立新<sup>2</sup>, 张喜海<sup>2</sup>, 成明华<sup>3</sup>

(1. 南京铁道职业技术学院, 南京 210031; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251;  
3. 中国铁路上海局集团有限公司徐州供电段, 江苏 徐州 221003)

**摘要:**在城市轨道交通建设中,一般采用在新建主变电所内设置无功补偿装置等方式进行无功补偿,受安装场地、环控通风及供电线路无功特点等影响,补偿装置前期安装容量不宜过大。本文结合大功率可控双向变流装置的系统特征和应用情况,对双向变流装置分散补偿无功的原理及控制策略进行了论述及研究。依据实际工程案例对轨道交通供电系统无功情况进行分析,同时对采用双向变流装置分散补偿无功的可行性以及其系统接入、容量选择等方面进行分析,现场测试数据表明双向变流装置能够分散补偿地铁供电系统中压网络产生的容性无功,可供同类线路设计参考。  
**关键词:**无功补偿;双向变流装置;分散补偿;容性无功

## Research on Distributed Reactive Power Compensation Technology and Application of Bidirectional Converter in Rail Transit Power Supply System

DAI Lijun, YANG Lixin, ZHANG Xihai, CHENG Minghua

(1. Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing 210031, China; 3. China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin 300251, China; 3. Xuzhou Electric Supply Company of China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Jiangsu Xuzhou 221003, China)

**Abstract:**In the construction of urban rail transit, such modes as setting reactive power compensation devices in the new main substation is generally adopted for reactive power compensation. The installation capacity of the compensation device at early stage shall not be too large due to such influence as installation site, environmental control ventilation and reactive power characteristics of power supply lines. In this paper, the principle and control strategy of decentralized reactive power compensation in bidirectional converter based on the system characteristics and application of high power controllable bidirectional converter are described and studied in combination with the system characteristics and application of high power bidirectional converter. The reactive power situation of rail transit power supply system is analyzed in combination with practical engineering cases and, at the same time, such aspects as feasibility and its system access as well as capacity selection of using bidirectional converter to disperse reactive power compensation are analyzed. The field test data shows that the bidirectional converter can compensate capacitive reactive power generated in the medium voltage network of subway power supply system and can be used as reference for the design of similar line.

**Keywords:**reactive power compensation; bidirectional converter device; decentralized compensation; capacitive reactive power

## 0 引言

城市轨道交通工程供电系统的感性无功主要

由牵引负荷、变压器及动力照明负荷组成产生,各类电缆产生容性无功<sup>[1]</sup>。根据电网管理部门的规定,一般情况下,110 kV 及以上的电力用户中,

收稿日期:2023-05-22

基金项目:南京铁道职业技术学院优秀科技创新团队项目(CXTD2022001);轨道交通基础设施智能检测研究中心项目(KYPT2023003)。

整体功率因数应不低于 0.9。同时系统应考虑采取措施防止产生无功反送,对电网造成影响<sup>[1]</sup>。

轨道交通系统功率因数的大小主要受牵引负载和电力照明负载的性质所影响。对于牵引负载而言,采用了 24 脉冲整流技术,理论上基本频率系数应大于 0.989,并且不能调变流器的位移系数大于 0.95,以使总功率系数接近 0.96。根据对国内多条地铁线路的最近调研结果显示,低压侧负荷的功率因数一般可达到 0.85~0.9。

鉴于轨道交通在调试、试运营、运行初期和夜间停运时段的负荷较低,并且系统内存在大量电缆,可能会出现夜间返送无功功率的现象,导致功率因数无法达到管理部门的规定并可能引发罚款。因此应采取相应措施消除无功返送现象以提高功率因数<sup>[2]</sup>。

目前有两种解决方案:

方案 1:在主变电所安装静止式动态无功补偿(static var generation,SVG)设备,可根据系统负荷及功率变化在系统出现无功返送的情况下对系统进行实时补偿。

方案 2:在主变电所设置电抗器,通过计算确定电抗器容量,在系统发生无功返送的情况下投入电抗器,使其对系统进行补偿。

以上方案均需考虑设备房间,一般设置在主变电所内,但由于 SVG 或电抗器等设备随着容量增加,导致发热量跟随增加,需要设置大功率环控通风装置,且存在噪音等影响,现在一般新建主变电所考虑设置水冷散热的补偿装置,但费用较常规设备增加较多。随着科技的不断发展及国内和国际碳中和、碳达峰等要求,新建线路考虑采取节能措施,在牵引变电所内设置列车制动能量吸收装置。该装置由用电力电子器件 IGBT 组成,可实现四象限全控变流的要求,将列车制动时产生的能量返回供电系统<sup>[3-4]</sup>。双向变流器作为 PWM 整流器,除能够实现能量双向流动外,还具有无功补偿的功能,本文介绍了采用双向变流装置对供电系统中环网部分进行无功补偿的研究,以减少补偿装置对供电系统的无功补偿量。

## 1 双向变流装置进行无功补偿机理

### 1.1 主回路拓扑结构

双向变流装置系统图见图 1,其主要由直流进线柜(直流断路器柜)、负极柜、双向变流器、隔离变压器和交流进线柜(交流断路器柜)组成,系统所需的控制电源取自牵引变电所内的操作电源屏,整套

系统与变电所内的 SCADA 系统间通过通信电缆送入变电所内的自动化屏中<sup>[5]</sup>。

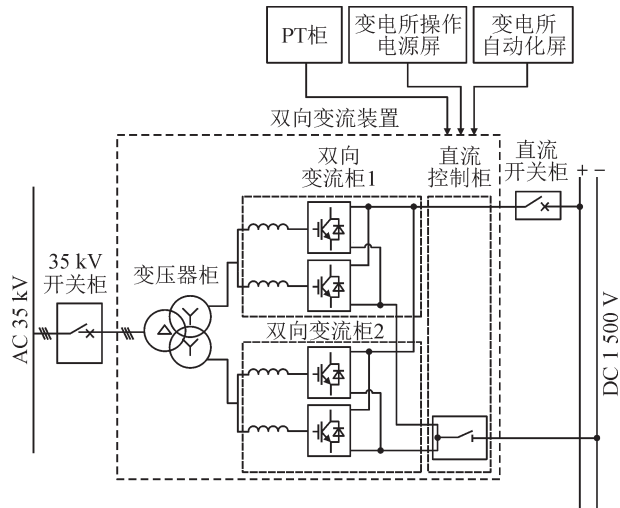


图1 双向变流装置系统关联图  
Fig. 1 Association diagram of bidirectional converter system

### 1.2 系统接入方案

在供电系统设计方案中,双向变流装置与牵引变压整流机组并联使用,见图 2。

双向变流装置通过 AC 35 kV 母线提供交流电源,并经过高压开关柜、双向变压器、双向变流器和直流开关柜等设备,最终连接到所内的直流母线上,等同于与供电系统接触网相连<sup>[6]</sup>。

### 1.3 无功自动补偿控制策略

#### 1.3.1 控制策略

在双向换流器的系统建模中,使用了电压源换流器 VSC 模型,并具有全控型电力电子器件、电压源换流器以及脉宽调制<sup>[7]</sup> 3 个主要的技术特征。

双向整流装置中的换流电抗远远大于换流单元所产生的等效电阻。有功功率的传输主要与相角差密切相关,而无功功率的传输则取决于换流桥输入节点的电压幅值。因此,通过控制相角差  $i$  和电压幅值  $U_{ci}$ ,可以实现对供电系统内部所需有功功率和无功功率的调节,以满足功率因数的要求<sup>[8-9]</sup>。

VSC 换流装置在正常稳定状态下,除了换流桥的额定线路电流  $I_{dN}$  之外,换流桥输入端的电压振幅  $U_c$  也决定了 VSC 换流装置与 AC 系统之间的有功无功的传递。而  $U_c$  则是由直流侧电压  $U_{di}$  决定的,双向换流器的系统方程:

$$\begin{cases} U_{ci} = 2\mu_i M_i U_{di} / \sqrt{2} \\ P_{si} = -(\mu_i M_i U_{di} / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \\ Q_{si} = -(\mu_i M_i U_{di} / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \end{cases} \quad (1)$$

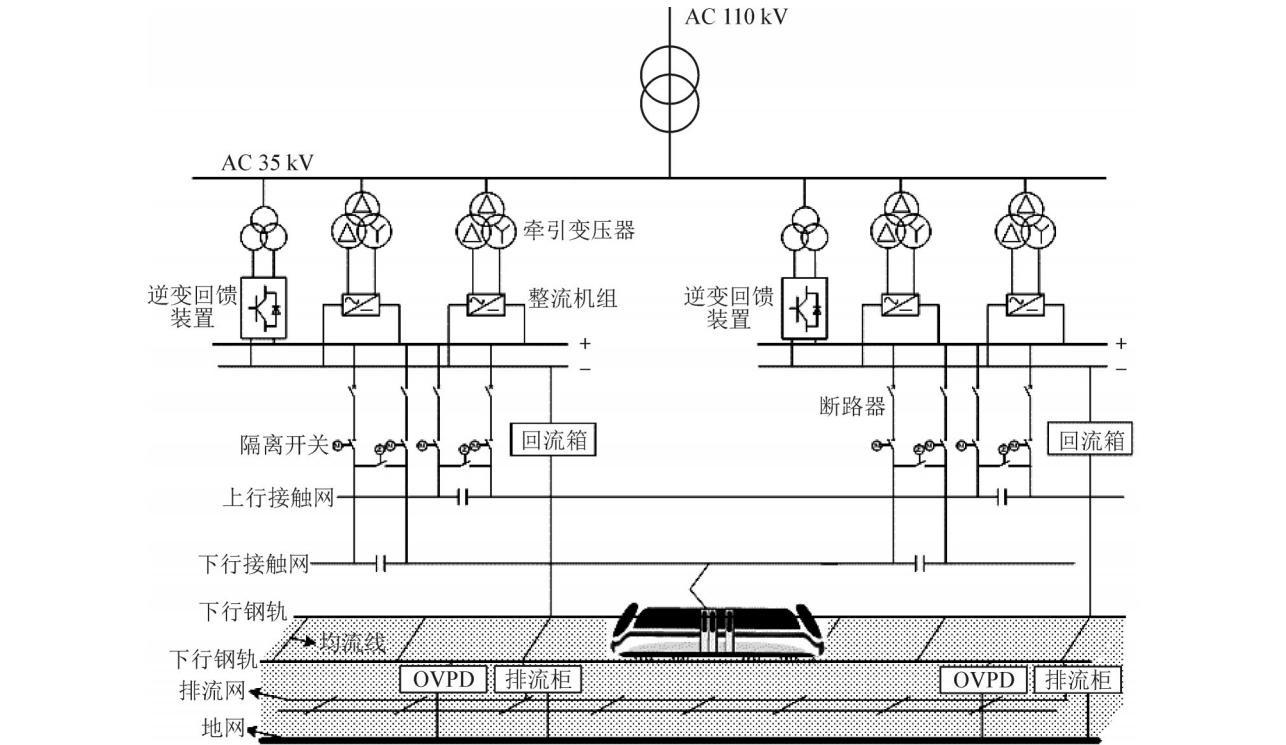


图2 双向变流装置系统接线图  
Fig. 2 Wiring diagram of PWM inverter

1.3.2 自动无功补偿原理

双向变流装置设置在牵引变电所内,通过总台监控系统、通信通道及功率调度系统,将控制系统所采集的供电线路范围内的有功功率、无功功率、运行状态以及主变电所供电范围的有功功率、无功功率数值等数据上传至网络,实时读取装置的运行状态、运行数据等<sup>[10]</sup>。双向整流装置的功率调度系统示意图见图3。

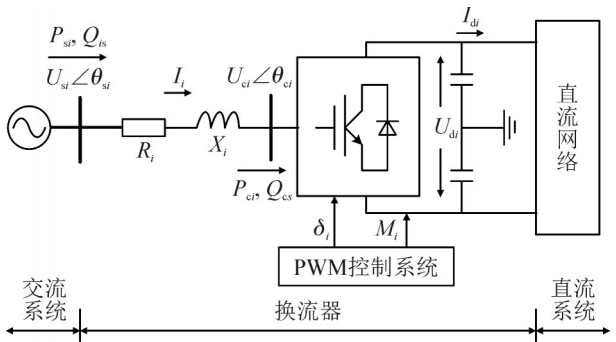


图3 双向变流装置系统模型示意  
Fig. 3 Schematic diagram of bidirectional converter system model

双向整流装置功率调度系统见图4。当双向变流装置投入运行后,根据线路输入条件、电缆参数和设备投入情况,对线路的无功功率进行实时计算<sup>[11]</sup>。根据主变电所的投入情况,计算出主变电所负责供

电范围内的无功功率需求量,以及各牵引变电所内双向变流装置的运行状态。通过后台服务器计算出每台双向变流装置承担供电范围内的无功功率设定值。根据计算的无功功率设定值,后台下发的无功补偿指令,输出无功功率,从而实现主变电所供电范围内的无功功率的分散补偿,满足线路功率因数要求<sup>[12-13]</sup>。

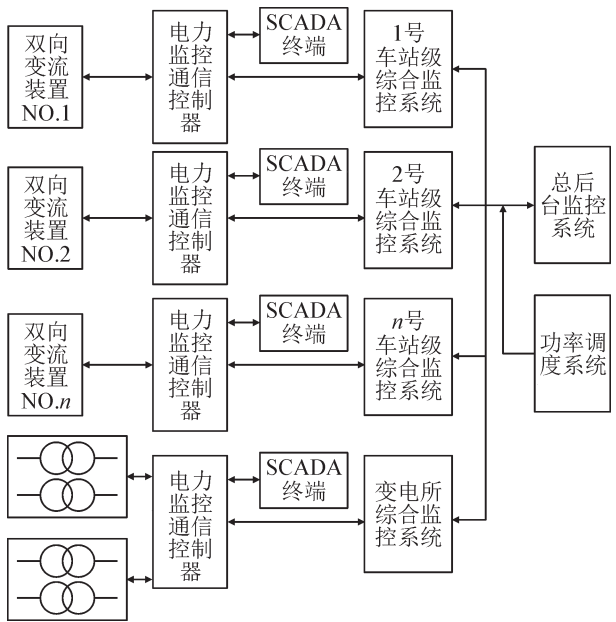


图4 双向整流装置功率调度系统  
Fig. 4 Power scheduling system of bidirectional rectification device

2 工程应用分析

2.1 无功计算

2.1.1 工程概况

本文结合一个典型的地铁施工模式,对一条长约 27 km 的全部地下线路进行了无功补偿分析。本线路采用 6B 车辆,最大运行速度 80 km/h,车站间距较为均匀,线路设计时考虑设置节能坡。运营组织各阶段均采用 6 辆编组,远期高峰小时最大行车密度为 30 对/h。本工程供电系统采用集中供电方式、110/35 kV 两级电压制式,每座牵引变电所设置 2 套 12 脉波牵引整流机组构成 24 脉波整流,设置 1 套双向变流机组,接在牵引变电所 35 kV 系统的同一段母线上;牵引变电所牵引整流机组的负荷特性应满足《地铁设计规范》(GB50157—2013)的规定,双向变流机组的负荷特性要求与牵引整流机组一致<sup>[14-15]</sup>。

在该线路上设有 2 个主变电站,分别称为甲、乙主变电所,其中,主线路共设有 11 个牵引变电所,每个变电所内设置双向整流装置。考虑节能效果及节约投资,场段牵引所内不设置节能装置。

2.1.2 电缆所产生的无功量计算

1)计算说明

该线路的无功考核点是在主变电所 110 kV 电缆进线侧,而外部电源的无功补偿是由供电局统一考虑的,使用的是电抗器来进行补偿。在各降压变电所的 400 V 侧设置有源滤波器,按照就地平衡和分散补偿的原则,有源滤波器可以在低压侧进行无功功率的补偿,以保证功率因数不低于 0.9。在这种情况下,可以考虑采用双向变流装置对 35 kV 电缆的无功进行补偿<sup>[16]</sup>。

2)电缆电容参数

本线 35 kV 中压环网使用的是两种电缆截面,它们的长度分别是 185 mm<sup>2</sup> 和 300 mm<sup>2</sup>,其电缆参数见表 1。

| 表 1 电缆电容参数<br>Table 1 Capacitance parameters of cable |                        |                        |
|-------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 电缆类型                                                  | 35 kV 电缆               | 35 kV 电缆               |
|                                                       | (300 mm <sup>2</sup> ) | (185 mm <sup>2</sup> ) |
| 单位电容/(μF/km)                                          | 0.1945                 | 0.1665                 |

注:不同电缆厂家电容参数存在差别。

3)计算结果

按夜间停运,轻负荷计算中压环网电缆充电无功功率公式为

$$Q_{CD}=2\pi fC_0U^2L$$
(2)

其计算结果见表 2。

表 2 中压环网电缆充电无功功率  
Table 2 Charging reactive power of medium voltage ring network cable

| 主变电所     | 截面/<br>mm <sup>2</sup> | 电缆长度/<br>km | 单位电缆长度<br>电容/(μF/km) | 无功功率/<br>Mvar |
|----------|------------------------|-------------|----------------------|---------------|
| 甲主变电所    | 185                    | 14.05       | 0.1665               | 0.900         |
| I 段/II 段 | 300                    | 5.62        | 0.1945               | 0.421         |
| 乙主变电所    | 300                    | 5.44        | 0.1945               | 0.407         |
| I 段/II 段 | 185                    | 12.92       | 0.1665               | 0.828         |

2.2 功率因数计算

各运营期间功率因数计算根据公式(3)计算,得出整体线路主变电所正常运行工况下年度功率因数测算结果见表 3,基本符合理论分析,即在线路送电调试、试运营期的半年至 1 年中电缆充电无功影响最大,随着发车对数增加,无功补偿量逐渐减少。功率因数公式为

$$\cos \theta=P/\sqrt{Q^2+P^2}$$
(3)

表 3 主变电所年度功率因数测算  
Table 3 Annual power factor estimation of main substation

| 运行<br>时段 | 时段   | 有功功率/<br>kW | 无功功率/<br>kvar | 功率<br>因数 |
|----------|------|-------------|---------------|----------|
| 电通       | 有车   | 1 011.11    |               | 0.61     |
|          | 无车   | 122.70      | 1321          | 0.09     |
|          | 全天   | 716.90      |               | 0.42     |
| 试运营      | 列车运营 | 3 206.82    |               | 0.92     |
|          | 停运   | 368.09      | 1321          | 0.27     |
|          | 全天   | 2 027.24    |               | 0.84     |
| 初期       | 列车运营 | 6554.69     |               | 0.98     |
|          | 停运   | 613.48      | 1321          | 0.42     |
|          | 全天   | 4374.29     |               | 0.95     |

2.3 双向整流装置无功补偿方案

本次采用单套双向变流器正线挂网运行,组成 2 套整流机组+1 套双向变流器的供电模式。在制动能量回馈时不存在并联工作<sup>[17]</sup>;在牵引功率输出时存在和全线整流机组并联的情况,具体接线见图 5。

2.4 补偿装置容量选择

本线路推荐 35 kV 环网采用双环大分区的方案,接线简洁、经济,可靠性、可用性满足运营需求。根据线路自首段牵引所开始,考虑采用分散式平均分配补偿的原则,每台双向变流装置须补偿容量为 0.9 Mvar 即可满足中压环网无功补偿需求。当前在双向变流装置的研制生产上,我国已完全掌握了先进的产品设计和制造工艺,性能达到国际同类设备先进水平<sup>[18]</sup>。额定功率在 1~3 MW,考虑 2 倍过负荷系数,短时容量在 2~6 MW 的装置均已挂网试验或投入运营经验,所以在设计方案中的双向变流装置能够满足无功补偿的需要。

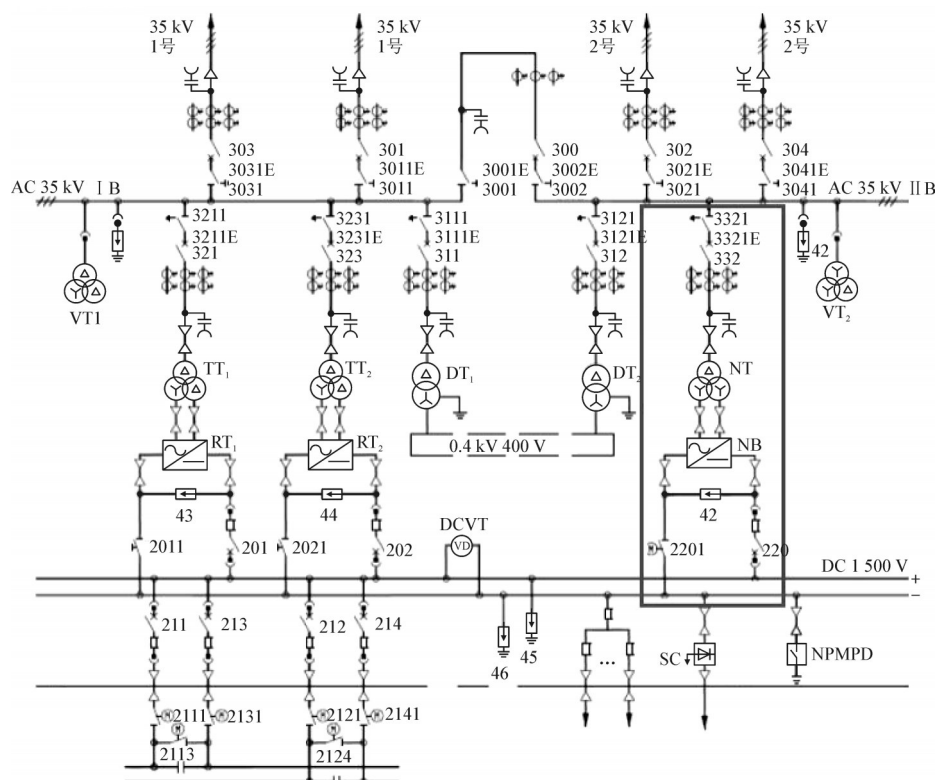


图5 双向变流装置设置站一次系统图

**Fig. 5 Primary system diagram of setting station of bidirectional converter**

### 3 试验测量结果

测试选择中间典型牵引站进行,该牵引站双边供电,正常供电范围约 2.5 km 左右,故障时大双边供电范围为 4.7 km。考虑在试运行阶段无功需求量最大,在该期间各种运行工况下的无功补偿结果如下:

### 1) 双向变流装置补偿功能未投入时工况

双向变流装置补偿功能未投入时 SVG 数据显  
示见图 6。该工况下双向变流装置投入无功补偿功



**图6 双向变流装置补偿功能未投入时SVG数据显示**  
**Fig. 6 SVG data display without operation of bidirectional converter compensation function**

能,此时供电线路的无功补偿量约为 1.3 Mvar 左右,在此期间需要的补偿量全部由主变电所内设置的 SVG 装置进行补偿,表计显示,此时的功率因数为 0.9,可以满足电网要求。

### 2)双向变流器启动补偿工况

双向变流装置启动补偿阶段 SVG 数据显示见图 7。双向变流装置切换至补偿模式,表计显示主变电所内的功率因数为 0.997 时,双向变流装置输出的无功补偿量接近 0.55 Mvar,主变电所 SVG 补偿装置输出无功补偿量约为 0.86 Mvar。

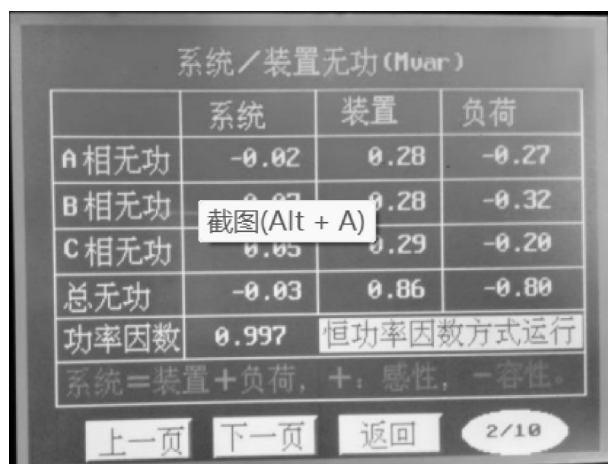


图7 双向变流装置启动补偿阶段 SVG 数据显示  
Fig. 7 SVG data display during startup compensation stage of bidirectional converter

3)双向变流装置额定功率下补偿

双向变流装置额定功率下补偿 SVG 数据显示见图 8。双向变流装置按照设定的额定功率输出补偿量 1 Mvar 时,主变电所内的 SVG 输出补偿量约为 0.4 Mvar,此时表计显示主变电所内的功率因数为 0.997。



图 8 双向变流装置额定功率下补偿 SVG 数据显示  
Fig. 8 SVG data display for compensation under rated power of bidirectional converter device

4)双向变流装置 1.5 倍过负荷输出

双向变流 1.5 倍过负荷补偿 SVG 数据见图 9,双向变流装置按照 VI 类负载设计,150% 额定功率持续时间为 2 h。按照额定功率的 1.5 倍输出时,主所内功率因数可以达到 0.997,此时的 SVG 可以完全停止输出容量。



图 9 双向变流 1.5 倍过负荷补偿 SVG 数据显示  
Fig. 9 SVG data display at 1.5 times overload compensation of bidirectional converter

5)测试结果统计及说明

双向变流器分布式无功补偿趋势见图 10,从测试统计数据可以看出,当利用双向变流装置对中压环网进行无功补偿时,随着装置补偿的容量不断加大,SVG 输出功率逐渐降低。当双向变流装置输出

无功功率达到一定值时,完全可以不用 SVG 对中压环网产生的无功进行补偿,此时仍可以保障供电系统功率因数始终维持在 1 左右。以上数据可以表明,单独采用双向变流装置可以高效的完成轨道交通供电系统内部中压网络产生的无功补偿需求。

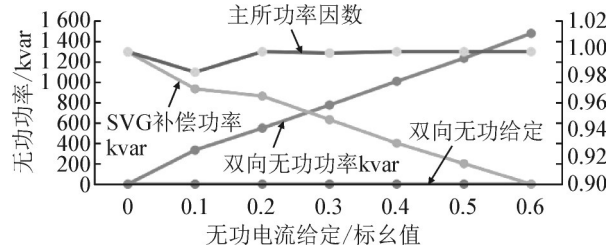


图 10 双向变流器分布式无功补偿趋势图  
Fig. 10 Distributed reactive power compensation trend diagram of bidirectional converter

4 结语

通过工程案例分析计算及试验测试数据,可以看出大功率双向变流技术在轨道交通领域分散补偿无功有着积极的工程推广价值,主要体现在以下几个方面:

1)将双向能量变换装置作为牵引供电系统核心设备,具有功率大小可调、功率流向可控的优点,结合完善的控制策略和数据传输水平让牵引系统的供电能力得到明显提升,为提升供电系统的安全性和效率提供了有力的保障;

2)鉴于牵引供电系统配置了双向变流装置、降压变电所低压侧设置了有源滤波装置,应充分利用其无功补偿功能,从系统角度统筹考虑无功补偿方案,不但可以在设备成本上节省大量的经济投资,而且还可以极大地改善主变电所狭小的设备室布局,使得原来的设备布置和一次接线更加简单;

3)大功率可控双向变流技术是电力电子变流技术的发展方向,在轨道交通牵引供电系统中有着广泛的应用和推广前景,功能验证结果表明,双向变流装置可以很好的分散补偿线路无功;

4)后续工程建设应用中重点关注:

- ①双向变流装置在不控电压值封锁脉冲的切换工程中的暂态特性,以及对继电保护的影响;
- ②双向变流装置的控制策略与整流机组特性的配合与优化;
- ③当一座牵引变电所一套或者两套设备退出时,根据初、近、远期发车对数的不同,研究设备的运行方式。

参考文献  
[1] 于松伟. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成

- 都:西南交通大学出版社,2008.
- [2] 王敖.城市轨道交通供电系统的无功补偿方案研究[J].机电工程技术,2021,50(5):48-52.
- WANG Ao. Research on reactive power compensation scheme of urban rail transit power supply system[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2021, 50(5):48-52.
- [3] 吴凡,刘传铎.双向变流器装置在城市轨道交通中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2021(12):180-181.
- WU Fan, LIU Chuanduo. Application of bidirectional converter device in urban rail transit[J]. Intelligent Building & Smart City, 2021(12):180-181.
- [4] 张扬鑫,刘炜,张戡,等.城市轨道再生电能吸收装置运行性能实测与系统节能效果评估[J].铁道科学与工程学报,2020,17(6):1554-1561.
- ZHANG Yangxin, LIU Wei, ZHANG Jian, et al. Operation performance measurement of urban rail renewable energy absorption device and evaluation of system energy saving effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6):1554-1561.
- [5] 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.
- [6] 杨树松,李辉,朱纪法.双向变流器应用于城市轨道交通供电系统的功能性验证[J].城市轨道交通研究,2020,23(1):187-190.
- YANG Shusong, LI Hui, ZHU Jifa. Functional verification of bidirectional converters applied to urban rail transit power supply system[J]. Urban Rail Transit Research, 2020, 23(1):187-190.
- [7] 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].都市快轨交通,2014,27(4):109-112.
- ZHANG Gang, LIU Zhigang, MU Fuqiang. Application of bi-directional converter in urban railway traction power supply system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(4):109-112.
- [8] 陈昕,杨立新.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(8):145-148.
- CHEN Xin, YANG Lixin. Application of bidirectional converter technology in traction power supply system of rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2022(8):145-148.
- [9] 史丹.地铁供电系统中双向变流装置设计方案对比研究[J].都市快轨交通,2022,35(2):61-66.
- SHI Dan. Comparative study on design schemes of bidirectional converters in the subway power supply system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2):61-66.
- [10] 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):110-113.
- CHENG Ji'an. Application of traction power supply technology with bidirectional converter for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(12):110-113.
- [11] 张戡,刘炜.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):92-98.
- ZHANG Jian, LIU Wei. Power flow calculation of urban track traction power supply system based on bi-directional converter[J]. China Railway Science, 2020, 41(1):92-98.
- [12] 孙二杰,王敬.地铁供电双向变流控制研究[J].今日制造与升级,2023(2):7-10.
- SUN Erjie, WANG Jing. Research on bidirectional converter control of subway power supply[J]. Manufacturing & Upgrading Today, 2023(2):7-10.
- [13] 刘聪.再生电能吸收装置在城市轨道牵引供电系统中的建模与仿真[D].成都:西南交通大学,2016.
- [14] 车锐坚.交流制式市域(郊)铁路主变电所无功补偿方案研究[J].电气化铁道,2023,34(3):12-15.
- CHE Ruijian. Research on reactive power compensation scheme of main substation of urban (suburban) railway with AC system[J]. Electrified Railway, 2023, 34(3):12-15.
- [15] 杜光,王超,刘健等.直流轨道交通系统过区馈电对轨道电位和杂散电流的影响[J].工程数学问题,2016(2):1-15.
- DU Guang, WANG Chao, LIU Jian, et al. Effect of over zone feeding on rail potential and stray current in DC mass Transit system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(2):1-15.
- [16] 张喜海.利用中压能馈装置分散补偿无功的工程应用分析[J].电气化铁道,2018,29(3):51-53.
- ZHANG Xihai. Engineering application analysis of distributed reactive power compensation by medium voltage energy feed device[J]. Electrified Railway, 2018, 29(3):51-53.
- [17] 刘炜,娄颖,张戡,等.计及城市轨道再生电能吸收装置的交直流统一供电计算[J].电工技术学报,2019,34(20):4381-4391.
- LIU Wei, LOU Ying, ZHANG Jian, et al. AC-DC unified power supply calculation including regenerative energy absorption device for urban rail[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20):4381-4391.
- [18] 郑旺.城市轨道交通牵引供电双向变流器应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- 作者简介:
- 戴丽君(1967—),女,教授,主要研究方向为电气化供电、自动化技术。E-mail:1170899318@qq.com。
- 杨立新(1967—),男,正高级工程师,主要从事轨道交通供电系统工作。
- 张喜海(1983—),男,高级工程师,主要从事轨道交通牵引供电系统设计工作。
- 成明华(1967—),男,正高级工程师,主要从事铁道供电系统工作。