

# 双向变流器应用于城市轨道交通供电系统的功能性验证

杨树松<sup>1</sup> 李 辉<sup>2</sup> 朱纪法<sup>2</sup>

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315100, 宁波; 2. 江苏晨大电气股份有限公司, 221116, 徐州//第一作者, 工程师)

**摘 要** 双向变流器是一种由大功率全控型器件组成的能量可双向流动的大功率变流设备, 其应用在城市轨道交通供电系统中, 具有稳定直流网压、制动能量回馈、无功补偿、节省占地面积等优点, 但在城市轨道交通的供电系统中尚没有应用。宁波地铁率先实施了双向变流器应用于城市轨道交通供电系统的功能性验证。介绍了功能性验证的试验条件、测试项目、测试结果及验证结果。

**关键词** 城市轨道交通; 供电系统; 双向变流器; 能量回馈

**中图分类号** U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.045

## Functional Verification of Bidirectional Converter Applied in Urban Rail Transit Power Supply System

YANG Shusong, LI Hui, ZHU Jifa

**Abstract** Bidirectional converter is a high power switch-mode device with energy flowing in both directions, composed of high power fully controlled apparatus. Its application in urban rail transit power supply system features stable DC network voltage, regenerative braking, reactive power compensation and land usage decrease. Since urban rail transit power supply system has not adopted the bidirectional converter yet, Ningbo Metro Company takes the lead to use bidirectional converter in urban rail transit power system for functional verification. The experiment conditions, items, results and functional verification project are introduced in this paper.

**Key words** urban rail transit; power supply system; bidirectional converter; energy feedback

**First-author's address** Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315100, Ningbo, China

随着城市轨道交通线网规模的扩大和客运量的剧增, 城市轨道交通能源消耗总量也在大幅增长, 列车制动能量浪费严重问题被日益关注。

城市轨道交通制动能量再利用主要有电阻吸

收、电容储能、逆变(包括逆变至中压和逆变至低压)能馈、双向变流器等方式。目前主流的再生能馈系统为中压逆变型能馈。双向变流器因兼具牵引稳压供电和制动能量回馈功能, 已成为供电技术的发展方向。

为推动行业进步, 尽早实现双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用, 由宁波地铁牵头, 联合相关设计院及设备生产商开展了双向变流器在城市轨道交通供电系统中应用的功能性验证。验证内容包括可靠性验证、双向变流器牵引供电及制动回馈功率验证、电能质量测试、网损优化效果分析、稳压效果测试和短路试验。

## 1 双向变流器功能验证试验概况

双向变流器功能验证试验, 采用单台双向变流器对试车线的单列列车进行牵引稳压供电及制动能量回馈。列车采用全牵引全制动(以下简称“全牵全制”)的方式往返运行, 对不同速度和不同直流电压工况下的车辆、双向变流器及供电系统的相关数据进行采集, 并考核双向变流器的容量及可靠性。

试验场所为宁波中车试车线, 试车线全长 1.3 km, 接触网采用 DC 1 500 V 架空柔性接触网供电; 牵引变电所内 10 kV 电源及开关柜为宁波中车原有设备。

试验列车为宁波地铁 1 号线的电客车, 为 4 动 2 拖编组, 列车编号为 01029。AW0(空载)载荷工况下的列车总质量为 201.2 t, AW2(满载)载荷工况下的列车总质量为 288.8 t。

变压器型号为 ZQSCB-2200/10, 额定容量为 2 200 kVA, 额定电压为 10 kV/0.9 kV/0.9 kV, 相应的额定电流为 127.0 A/705.7 A/705.7 A, 连接组别为 Dy11y11。

双向变流器的控制方式为 SPWM(正弦波脉宽

调制),运行方式为 S1(连续工作制),冷却方式为强迫风冷。双向变流器技术参数如表 1 所示。

表 1 双向变流器技术参数

序号	技术参数	数值
1	额定功率/ kW	2 000
2	短时峰值功率/ kW	6 000
3	峰值功率工作时间/ min	1
4	额定输入电压/ V	AC 900
5	输出电压/ V	DC 1 450 ~ 1 800
6	额定输入频率/ Hz	50
7	电流谐波含量/%	< 4
8	功率因数	≥0.99(可调)
9	双向变流器效率	≥0.99
10	控制电源/ V	AC 220,DC 110

## 2 双向变流器功能验证

### 2.1 可靠性验证

验证方式:使用单台双向变流器对试车线的单列列车进行牵引供电及制动能量回馈,列车采用全牵全制的方式以 80 km/h 的速度往返运行,这使列车车载逆变器在最严酷的工况下考核双向变流器的容量及可靠性。

容量及可靠性考核分为 AW0 载荷和 AW2 载荷 2 种载荷工况进行考核。AW0 载荷工况下,列车运行里程为 446 km,由于天气原因及数据测试要求,试验历时 16 d,单日最高运行里程为 115 km。AW0 载荷工况下,列车牵引时双向变流器最大输出功率为 4.8 MW,列车制动时双向变流器最大回馈功率为 4.0 MW。AW2 载荷工况下,列车运行里程为 670 km,试验历时 28 d,单日最高运行里程为 140 km。AW2 载荷工况下,列车牵引时双向变流器最大输出功率为 5.0 MW,列车制动时双向变流器最大回馈功率为 5.6 MW。AW2 载荷工况下列车电压、电流波形图如图 1 所示。

考核结果:试验列车运行总里程为 1 116 km,重复全牵全制循环次数约为 1 300 次,运行历时 44 d。试验中,双向变流器输出稳定,各项技术指标无异常,未曾出现故障。

### 2.2 牵引稳压供电及制动能量回馈功率测试

AW0 载荷工况下,双向变流器稳压目标值为 1 600 V。从零速开始执行全牵引操作,试验列车可按照设定运行加速度曲线加速至全速。双向变流器

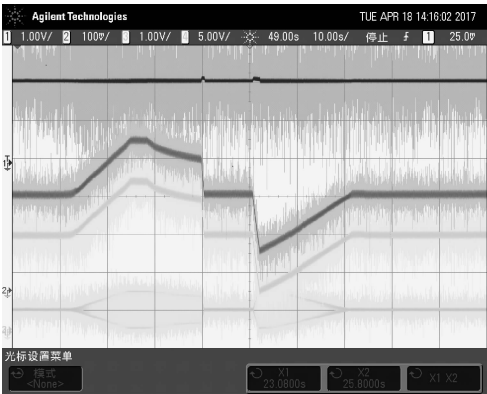


图 1 AW2 载荷工况下列车电压、电流波形截图

最大牵引供电功率为 4 752 kW,最大牵引供电电流为 2 980 A。当列车运行速度为 80 km/h 时执行全制动操作,车载制动电阻未启动,最大制动回馈功率为 4 053 kW,最大制动回馈电流为 2 533 A。

AW2 载荷工况下,双向变流器稳压目标值为 1 600 V。从零速开始执行全牵引操作,试验列车可按照设定运行加速度曲线加速至 80 km/h。双向变流器最大牵引供电功率为 5 059 kW,最大牵引供电电流为 3 091 A。当列车运行速度为 80 km/h 时执行全制动操作,车载制动电阻未启动,最大制动回馈功率为 5 639 kW,最大制动回馈电流为 3 507 A。试验列车运行中,双向变流器端口直流电压稳定。以控制直流电压为控制目标,可以在牵引供电和制动回馈工况之间自动切换。

试验表明:双向变流器的最大牵引供电功率及最大制动回馈功率均可满足单列 4 动 2 拖编组电客车在 AW2 载荷工况下的全牵全制需求。

### 2.3 电能质量测试

现场实测网侧电压谐波含量为 1.8%,电流谐波含量为 2.9%,功率因数为 0.997,实测值满足国家相关标准。

### 2.4 网损优化效果分析

接触网功率损耗试验中,分别采集了直流电压 5 个电压等级(1 500 V、1 550 V、1 600 V、1 650 V、1 700 V)的试验数据。试验表明,随着直流电压的提升,无论牵引供电状态还是制动回馈状态,接触网的电流和功率损耗都呈下降趋势(接触网损耗的计算方法是:峰值功率时接触网两端的电压降乘以直流电流)。

网损试验数据分析:理论上来说,在传递功率恒定时,网损与直流电流的平方成正比;而直流电流与直流电压成反比,因此网损与直流电压的平方

成反比。以 1 500 V 和 1 700 V 为例进行分析,则有:

$$P_{1\,700\text{ V}} = P_{1\,500\text{ V}} \left( \frac{1\,500\text{ V}}{1\,700\text{ V}} \right)^2 = 0.779 P_{1\,500\text{ V}}$$

式中:

$P_{1\,700\text{ V}}$ ——1 700 V 网压时的网损;

$P_{1\,500\text{ V}}$ ——1 500 V 网压时的网损。

图 2 为列车在 AW2 载荷工况下全牵全制运行时电压与线路损耗的关系图。试验数据验证了这一理论分析,即网损与直流电压的平方成反比。由此可见提高直流网压,对网损的优化有明显的效果。

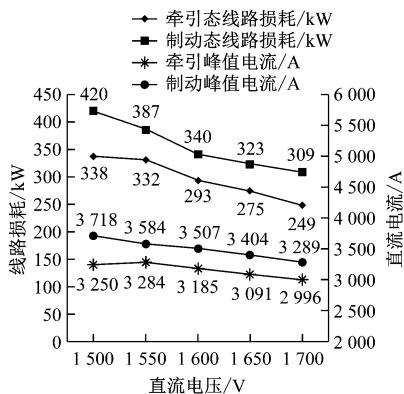


图2 列车在 AW2 载荷工况下全牵全制运行时电压与线路损耗的关系图

在前期设计时并未涉及接触网损耗优化,由此可见,在城市轨道交通供电系统中采用双向变流器的网损效果优于预期效果。

## 2.5 节能效果分析

双向变流器不仅具有二极管整流+传统能馈装置的节能效果,同时还具有以下优势:足够的容量(单台设备短时峰值功率6 MW运行60 s),可将全部制动能量由就近站回馈且无需投入制动电阻,避免了因能馈装置容量不足需邻站协同吸收造成的跨区域线路损耗;稳压功能可以有效降低网损。采用适当的控制策略后,整条接触网网压在一个较小的范围内波动,既可避免长距离越区供电造成的巨大网损,又能最大程度保证制动能量被邻车吸收,因此双向变流器节能效果更为显著。

## 2.6 稳压效果测试

图3为列车在 AW2 载荷工况下的全牵全制运行曲线。由图3可见,采用电压、电流 PI(比例积分调节器)双闭环控制的双向变流器,电压输出可以实现稳态无误差;动态有10 V左右的偏差用于动态 PI 控制,瞬时功率冲击时电压偏差在30 V左右,即

使在车辆空转或滑行双向变流器功率冲击较大的情况下,也能迅速恢复1 600 V的电压给定,稳压效果良好。

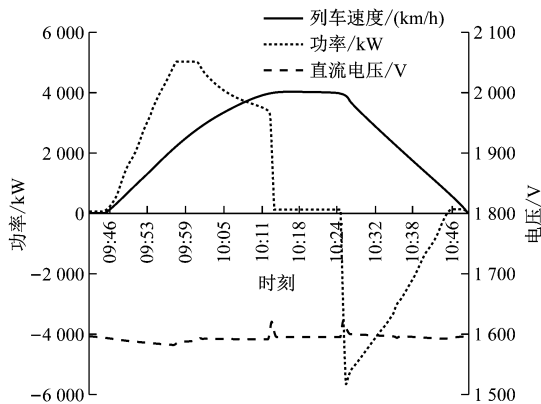


图3 列车在 AW2 载荷工况下的全牵全制运行曲线

保持直流网压稳定可使列车从直流接触网取流时遵循就近牵引所供电的原则,避免了因网压下降造成远端供电而产生的线路损耗。

## 2.7 短路试验

图4为短路试验的电气连接示意图。

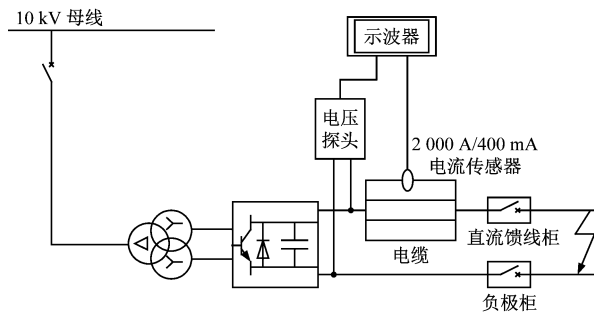


图4 短路试验的电气连接示意图

如图4所示,本次短路试验采用接触网对回流轨直接短路的方式,短路点选择在距离接触网上网点约100 m处。根据试车线供电系统参数,经设计院仿真计算,试车线单机组短路试验电流为9 060 A。

试验结果:短路试验直流馈线开关速断保护正常动作,能够切除故障点电流;双向变流器重新上电检测设备正常。短路时电压电流的采集波形如图5所示。

根据波形换算,短路电流大小为9 608 A。设备承受的短路电流接近并大于设计院仿真的短路电流,设备承受短路电流后无损坏。

## 3 结论

根据双向变流器功能验证试验内容及验证结

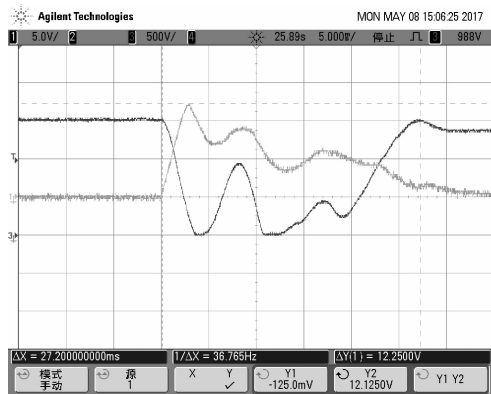


图5 短路时电压电流的采集波形截图

果可知,双向变流器的性能及功能可以满足城市轨道交通直流供电系统的使用要求。通过对试验数据进一步分析,可知双向变流器具有以下优点:

- 1) 容量大、体积小,可降低土建成本;
- 2) 具有足够大的将各种工况下的制动电能就近回馈至电网的容量,使能馈系统具备取消制动电阻的条件;

3) 具有足够大的满足牵引辅助供电功能的容量,可稳定直流网压,避免越区供电,降低网损;

4) 全线配置双向变流器时可适当提高直流网压,能够减小接触网供电电流并减小接触网损耗;

5) 可根据需求设置无功补偿参数,自动对供电系统进行无功补偿;

6) 高效可靠的三电平矢量控制算法保证了优异的电能质量。

通过双向变流器功能验证试验,证明我国已掌握了适用于城市轨道交通运行的大功率变流设备研制及系统保护与控制技术,为双向变流器逐步取代再生制动能馈装置和整流器做好了技术准备。

## 参考文献

- [1] 黄德胜,张巍. 地下铁道供电[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

(收稿日期:2019-09-10)

## 搜狐城市:“数说”2019 年中国地铁成就

在即将过去的2019年里,中国的城市发展迎来许多高光时刻,“搜狐城市”盘点了9个值得被记住的数字,带大家探寻数字背后的意义。以下是关于地铁的“数说”。

### 【搜狐城市】

截至2019年底,全国城市轨道交通新增运营里程近300 km,运营总里程达6 600 km。全国共有39个城市(不含港澳台)开通轨道交通,乌鲁木齐、温州、济南、兰州4城今年首开地铁。近几十年来,随着基建投入的增加,中国城市的地铁建设也进入了快车道,地铁总里程近10年间翻了4倍。在开通城市数量、轨道交通运营里程、运营客运量等方面均居世界第一;列车运行可靠度、正点率、还有发车间隔等关键运营指标位居国际前列。

### 【专家点评】

搜狐城市特约专家:孙章,同济大学教授,原上海铁道大学副校长

1863年1月10日,世界上第一条地铁在英国伦敦建成通车,牵引动力为蒸汽机车。1890年,第一条电气化地铁开通,地铁进入电力牵引时代,由于环境条件改善,地铁显示了强大的生命力:对促进经济社会发展、优化城市空间布局、转变交通运输模式、提高市民出行质量、节约能源改善环境等方面都具有十分重要的意义。

中国地铁经过50多年的建设,尤其是近20年来的快速发展,至今已有39座城市,开通了6 600 km地铁运营线路,运营总里程世界第一。

作为公共产品,地铁的建设和运营需要政府资金的投入和补贴。为避免资源浪费,建设地铁应按照国家政策法规,科学、合理地选择技术制式,节约成本、降低造价。按国际经验,一个城市每年拿出大约1%的生产总值来建设地铁,是可持续的。

(摘自2019年12月31日搜狐网“搜狐城记”)