

# 城市轨道交通双向变流式牵引供电系统的应用

徐金平<sup>1</sup> 杜贵府<sup>2\*</sup> 朱纪法<sup>3</sup> 李辉<sup>3</sup>

(1. 宁波轨道交通集团有限公司, 315100, 宁波; 2. 苏州大学轨道交通学院, 215131, 苏州;

3. 江苏晨大电气股份有限公司, 221116, 徐州//第一作者, 教授级高级工程师)

**摘 要** 早期的城市轨道交通牵引供电系统主要采用二极管整流机组供电, 列车制动时产生的制动能量被制动电阻消耗, 造成较大能源浪费。基于 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)的 PWM(脉冲宽度调制)整流器具有四象限工作能力, 能量可双向流动, 不但能回馈列车制动能量, 还能稳定直流网压、优化供电环境, 具有很高的推广价值。重点研究了整流机组与双向变流器混合供电的控制策略, 并分析了混合供电模式对城市轨道交通牵引供电系统系统的影响。

**关键词** 城市轨道交通; 牵引供电系统; 双向变流器; 混合控制

**中图分类号** U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.043

## Application of Bidirectional Converter Traction Power Supply System in Urban Rail Transit

XU Jinping, DU Guifu, ZHU Jifa, LI Hui

**Abstract** At the early stage, diode rectifier unit was adopted as the main power supply system for urban rail transit, but the braking energy produced by vehicle braking was consumed by braking resistance, causing huge energy waste. The PWM (pulse-width modulation) rectifier based on IGBT (insulated gate bipolar transistor) has four-quadrant working ability with bidirectional energy flow. It could not only respond to the vehicle braking energy, but also stabilize the DC network voltage and optimize the power supply environment, therefore has high promotion value. By focusing on the control strategy of hybrid power supply between rectifier unit and bidirectional converter, the influence of hybrid power supply mode on urban rail transit traction power supply system is analyzed.

**Key words** urban rail transit; traction power supply system; bidirectional converter; hybrid control

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

## 0 引言

城市轨道交通牵引供电系统承载电能变换、输送、回馈、故障保护和隔离等多种功能, 是城市轨道交通的核心系统。早期的城市轨道交通牵引供电系统主要采用二极管整流机组, 在列车启动和加速时提供牵引电能; 但列车制动时产生的制动能量只能通过车载或地面制动电阻进行消耗, 能源浪费较大。

近期新建的城市轨道交通线路开始采用增加列车制动能量吸收装置的方案, 通过由全控电力电子器件 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)组成的全控整流装置, 将大部分列车制动能量反馈回电网, 节能效果明显。

本文提出一种基于 IGBT 的 PWM(脉冲宽度调制)变流器, 其具备与原二极管整流机组相同的容量(额定容量 2 MW)、同等的过载能力(峰值 6 MW/1 min)和同级的短路耐受能力, 被定义为城市轨道交通牵引供电系统双向变流器。双向变流器具备整流机组的牵引供电能力和能馈装置的制动回馈能力, 由此形成新一代城市轨道交通牵引供电双向变流系统, 可显著改善节能指标, 优化供电环境, 是城市轨道交通牵引供电系统的发展方向。双向变流式牵引供电系统如图 1 所示。

## 1 双向变流器工作原理

双向变流器本质上是一个四象限的 PWM 整流器, 通过电压闭环控制使其具备能量自然双向流动的能力, 通过坐标矢量旋转变换, 实现无功电流  $I_d$  与有功电流  $I_q$  的解耦; 通过  $I_d$  控制双向变流器的无功分量, 来实现无功功率控制和无功补偿功能; 通过  $I_q$  控制双向变流器的电压, 来实现牵引和能馈功能。因此双向变流式牵引供电系统的动态特性很

\* 通信作者

容易实现解耦控制。双向变流式牵引供电系统控制图如图 2 所示。

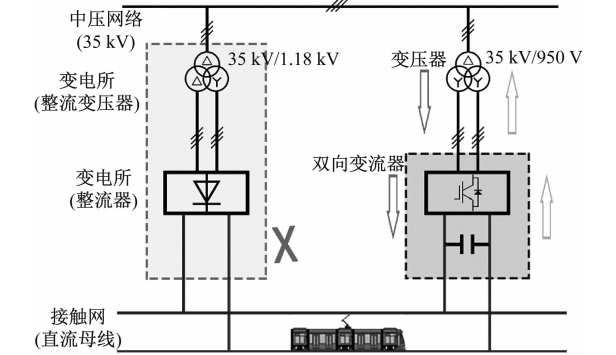
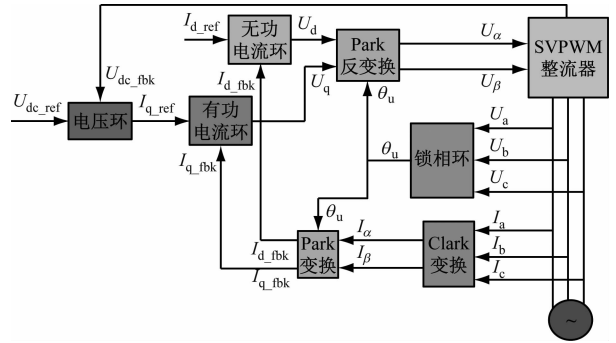


图 1 双向变流式牵引供电系统示意图



注:SVPWM——空间矢量脉宽调制

图 2 双向变流式牵引供电系统控制图

2 正线挂网方案

本文以宁波地铁 2 号线一期工程为例进行分析。宁波地铁 2 号线一期工程于 2015 年 9 月 26 日开通运营,线路起点为栎社国际机场站,途经海曙区、江北区、镇海区 3 个行政区,终点至清水浦站;线路全长 28.35 km,其中,地下线 22.23 km、高架线 5.77 km、过渡段 0.35 km;设 4 座高架站、18 座地下站,平均站间距约 1.331 km。挂网地点选定为宁波大学站,本站位于线路次末端,为高架车站。宁波地铁 2 号线双向变流式牵引供电系统一次接线方式如图 3 所示。

如图 3 所示,双向变流式牵引供电系统新增 1 个 35 kV 开关柜、1 台整流变压器、1 个直流开关柜,与原有的 2 套整流机组共同组网运行。

3 双向变流器挂网实施

双向变流器在正线挂网,对施工和试验都提出了较高要求,重点需要解决以下 3 个问题:设备安装不影响牵引变电所内设备运行;解决双向变流器正线操作逻辑及保护问题;采用适当的控制模式使双向变流器与现有整流机组能够协调运行。

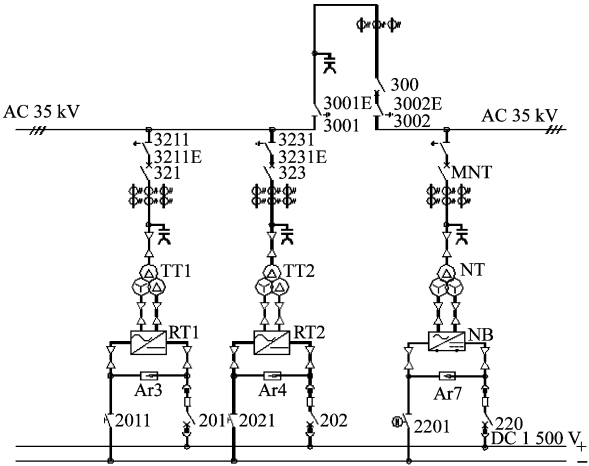


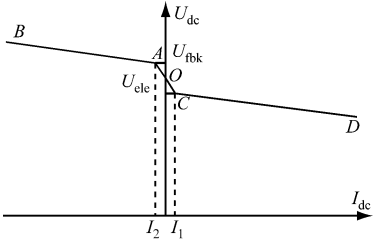
图 3 宁波地铁 2 号线双向变流式牵引供电系统一次接线方式

3.1 操作保护逻辑

操作显示单元主要由柜门操作按钮、指示灯、仪表及触摸屏组成,实现启停、运行/检修、近控/远控等操作,触摸屏可以实现系统运行状态监视、参数设定、故障记录及录波等功能。

3.2 混合供电控制模式

双向变流器作为 PWM 整流器,其本质上是一个电压源,要想与整流机组协调供电,一方面需要杜绝各整流电源之间产生能量环流,另一方面需要顺应整流机组自然下垂特性的负载曲线,因此采用图 4 所示的多段下垂控制模式。



注:U<sub>fbk</sub>——设备大功率回馈时稳定直流电压的目标值,根据双向变流器工作模式需求设定;U<sub>ele</sub>——设备提供大功率牵引电流时牵引稳压目标值,根据双向变流器工作模式及整流机组特性设定;U<sub>dc</sub>——直流电压;I<sub>1</sub>——进入牵引稳压特性的启动电流值;I<sub>2</sub>——进入回馈稳压特性的启动电流值;I<sub>dc</sub>——直流电流

图 4 双向变流器下垂控制模式

如图 4 所示:CD 段双向变流器工作于牵引整流状态;AB 段工作于制动回馈状态;AC 段斜率较大,作为过渡阶段,既可避免各供电设备之间的能量环流,也可留出优先邻车吸收的电压区间。

4 运行数据分析

双向变流器按下垂控制模式可正常运行,列车

加速时配合整流机组提供牵引供电支撑,列车制动时及时回馈制动能量。运行过程中通过修改双向变流器系统参数,验证测试双向变流器对牵引供电系统的影响。

#### 4.1 双向变流器对直流网压的影响

采集列车起动时双向变流器工作和不工作情况下的数据,分析双向变流器对直流网压波动的影响,如图5所示(每秒钟采集5组数据)。

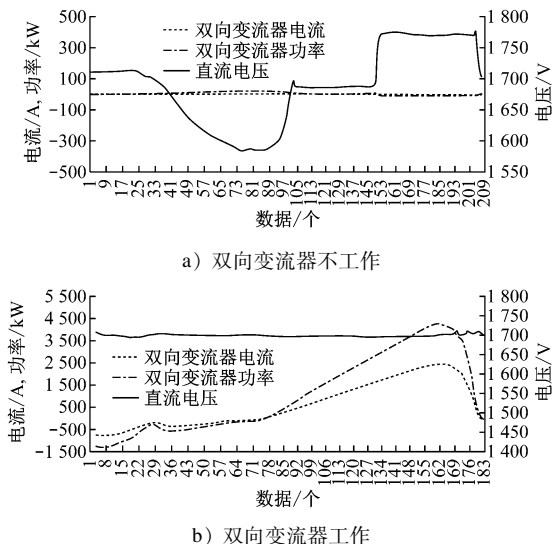


图5 双向变流器不同工作状态下直流网压波形曲线图

如图5 a)所示,双向变流器不工作情况下,列车加速时直流电压跌落至1 580 V,列车制动时直流电压抬升至1 780 V,电压存在200 V的波动范围。如图5 b)所示,当双向变流器工作于稳压模式时,随着列车加速和制动,直流电压波动约为15 V。

由此可见,双向变流器具有较强的稳压性能。由于线路上只有1台双向变流器挂网,双向变流器无法采用稳压模式。这种情况下,即使采用下垂控制模式,直流网压波动幅度也可以大幅下降。

#### 4.2 混合供电模式分析

双向变流器与整流机组协同供电,二者不同优先供电模式对直流网压波动的影响如图6所示(每秒钟采集5组数据)。

通过修改系统参数,双向变流器可工作于整流机组优先模式和双向变流器优先模式,二者最大的不同在于双向变流器的牵引阈值不同。如图6 a)所示:双向变流器牵引阈值较低,列车加速时整流机组先供电;随着电压下降到牵引阈值时双向变流器开始提供牵引支撑,网压变得较为稳定。如图6 b)所示:双向变流器牵引阈值较高,列车加速时双

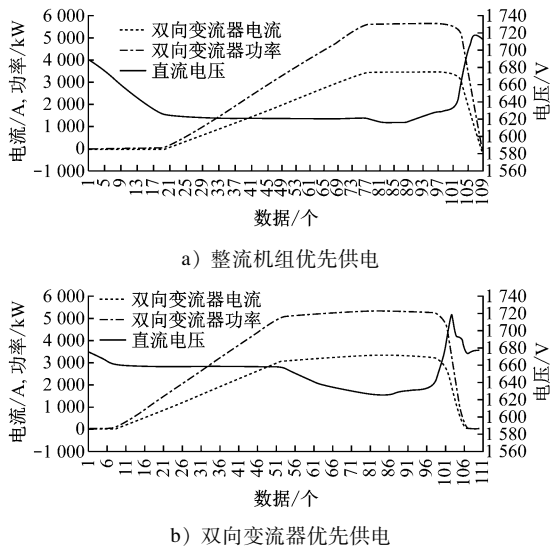


图6 混合供电模式时的直流网电压波形曲线图

向变流器优先提供牵引支撑,网压较为稳定;随着牵引功率的增加双向变流器进入下垂控制,直流网压下降,整流机组开始提供牵引能量。

#### 4.3 对越区供电的影响

采集列车起动时双向变流器工作和不工作情况下的数据,分析双向变流器对本站及邻站整流机组输出功率的影响,如图7所示(每秒钟采集5组数据)。

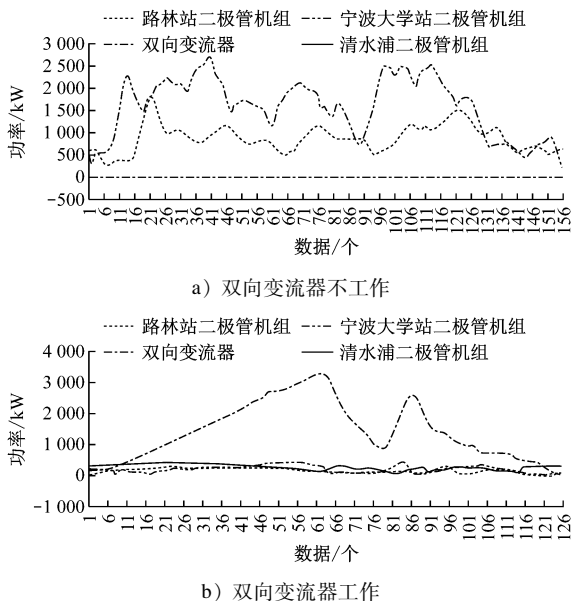


图7 双向变流器不同工作状态对本站及邻站整流机组的影响

当列车起动加速时,本站整流机组会优先供电,但由于整流机组的自然下垂特性,邻站及远端站整流机组也会进行越区供电。如图7 a)所示,当

双向变流器不工作时,可以看到本站整流机组提供的牵引能量最多,但邻站穿越过来的功率也占了相当大的比例。如图 7 b) 所示,当双向变流器工作时,本站牵引功率几乎全部来自双向变流器,本站及邻站整流机组输出功率占比非常低,大大降低了越区供电现象。如果全线路都有双向变流器挂网运行,则列车在全线路都可以实现能量的就近传递,这就从根本上解决了越区供电的问题。

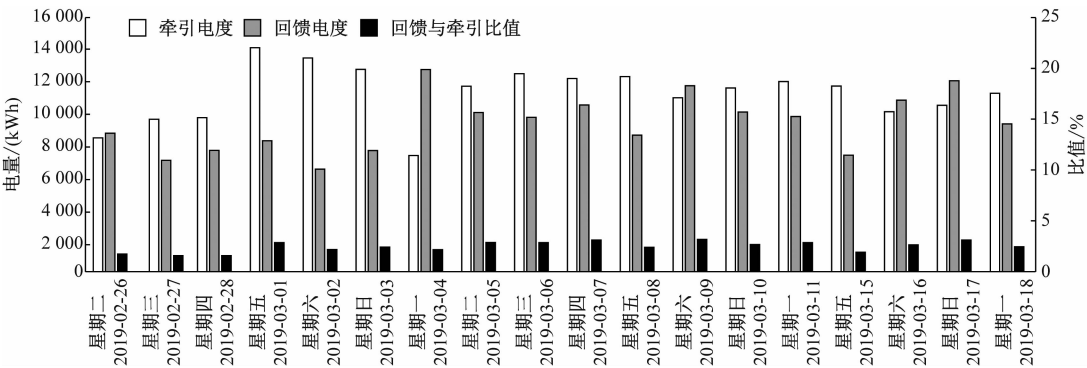
#### 4.4 无功补偿效果分析

城市轨道交通牵引供电系统采用主变电所集中补偿的方案,在主变电所配备 SVG(无功补偿设备)对线路无功进行补偿。双向变流器作为一个电压源型的 PWM 整流器,本身具备无功补偿的功能。图 8 为主变电所 SVG 界面截图。



a) 双向变流器不补偿      b) 双向变流器全额补偿

图 8 主变电所 SVG 界面截图



注:比值为回馈电能与牵引电能之比

图 9 宁波地铁 2 号线一期工程牵引及回馈电能统计图

## 5 结语

通过宁波地铁 2 号线一期工程双向变流器挂网验证测试,表明双向变流器具备峰值 6 MW 的牵引供电能力及制动回馈能力,具备替代“二极管整流机组 + 能馈装置”的能力。相比较而言,双向变流器具有体积小、占地面积小、土建成本低,以及能够稳定直流网压、提高供电质量、降低越区供电、减少线路损耗、降低轨电位等优点,因此具有非常广阔的推广应用价值。

如图 8 a) 所示,双向变流器不进行无功补偿时,主变电所无功负荷为  $-1.29 \text{ MVar}$ ,主变电所 SVG 补偿  $1.22 \text{ MVar}$ 。如图 8 b) 所示,双向变流器逐渐增加无功补偿容量直至全额补偿时,主变电所无功负荷几乎为零 ( $-0.03 \text{ MVar}$ ),主变电所 SVG 停止补偿,主变电所处功率因数为 0.997。

由此可见,双向变流器具备良好的分布式无功补偿能力,完全可以替代主变电所 SVG 集中补偿的方式,进行全线路分布式无功补偿。

#### 4.5 挂网运行小结

宁波地铁 2 号线一期工程双向变流器挂网以来运行稳定,没有出现因设备故障而停机的现象。运行期间统计了部分工作日的牵引电能和回馈电能,如图 9 所示。

如图 9 所示,双向变流器日均牵引供电  $11\,255 \text{ kWh}$ ,日均回馈  $1\,635 \text{ kWh}$ ,回馈电能占牵引电能的 14.69%。每月按 30 d 计算,则月均可回馈电能为  $49\,050 \text{ kWh}$ 。

双向变流器挂网期间设备运行稳定,各性能指标符合预期要求。作为国内第一个峰值 6 MW 的全功率双向变流器正线挂网案例,本研究具有重大的里程碑意义。

## 参考文献

- [1] 张钢.城市轨道交通能馈式牵引供电变流系统关键技术研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [2] 陆然.城市轨道交通变电站中的无功补偿分析[J].天津电力技术,2011.
- [3] 许爱国.城市轨道交通再生制动能量利用技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [4] 谢萌.大功率 PWM 整流器并联控制策略研究[D].北京:北京交通大学,2008.

(收稿日期:2019-09-10)