

# 城市轨道交通双向变流器牵引供电技术的应用

成吉安

(宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司,315111,宁波//高级工程师)

**摘要** 随着全国城市轨道交通线网规模的不断扩大,列车再生制动能量的有效利用问题也日益被关注。宁波轨道交通集团有限公司创新地研发了双向变流器牵引供电技术,该技术将牵引变电所整流机组的整流供电和能馈装置的逆变回馈功能合二为一,通过运营线路挂网试运行、实车测试,验证了双向变流器牵引供电技术优势突出,经济及社会效益亦较为明显。

**关键词** 城市轨道交通;牵引供电技术;双向变流器;列车再生制动;整流机组;能馈装置

**中图分类号** U231.8; TM46

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.12.026

## Application of Traction Power Supply Technology with Bidirectional Converter for Urban Rail Transit

CHENG Ji'an

**Abstract** With the continuous expansion of national urban rail transit network, the effective utilization of train regenerative braking energy has become a rising concern. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd. has creatively developed a traction power supply technology with bidirectional converter, which combines the rectifier power supply of traction substation with the inverter feedback function of the energy feedback device. Through trial run on the operation line, actual vehicle test and verification, the technical advantages of bidirectional converter are verified, the economic and social benefits generated by the bidirectional converter are obvious.

**Key words** urban rail transit; traction power supply technology; bidirectional converter; regenerative braking of train; rectifying unit; energy feed device

**Author's address** The Operation Branch, Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315111, Ningbo, China

城市轨道交通列车制动过程中产生的再生制动能量有效回收利用技术,已成为目前重要的研究课题。

目前,城市轨道交通行业普遍使用三相交流异步电机驱动系统,其牵引系统的设备构成如图 1 所

示。图 1 中,列车牵引系统包括主隔离开关、高速断路器、VVVF(变压-变频)逆变器、滤波电抗器、制动电阻器及牵引电机等。

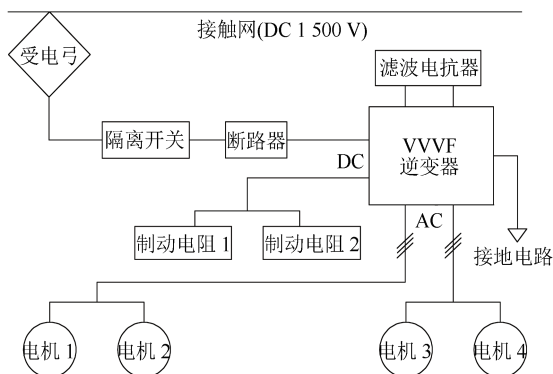


图 1 城市轨道交通列车牵引系统构成图

列车通过车顶受电弓向接触网取流,当列车处于牵引工况时,车载 VVVF 逆变器将取自接触网的直流电转换成频率和电压连续可调的三相交流电,供牵引电机使用;当列车处于制动工况时,要求充分发挥电制动功能,优先进行再生制动,最大限度地能量返回电网。列车在制动工况下,牵引电机变成异步发电机,利用列车制动过程的惯性运动发电,产生的交流电通过 VVVF 逆变器整流成直流电回馈给接触网或车载制动电阻。列车再生制动过程中产生的能量回馈通常会引起牵引网电压升高,部分再生能量可以被线路上相邻列车或本车其他车载用电设备吸收,不能被吸收的部分则只能转换为车载制动电阻而被消耗浪费掉。

## 1 逆变回馈型能馈装置的应用

在牵引变电所设置再生能量吸收装置,能够使列车最大限度使用再生能量,减少环境污染,降低隧道温度,以达到节能的目的。牵引变电所设置再生能量吸收利用的常用能馈装置有 4 类,分别为电阻消耗型、飞轮储能型、电容储能型、逆变回馈型。其主要工作原理为:当处于再生制动工况的列车产

生的再生能量不能完全被其它车辆和本车的用电设备吸收时,牵引网电压将很快上升,上升到一定程度后,牵引变电所中设置的再生能量吸收装置投入工作,吸收掉多余的再生电流,使列车再生电流持续稳定,以最大限度地发挥再生制动性能。

目前,我国解决再生能量吸收利用问题的主流方案是在牵引变电所原有两台牵引整流机组的基础上,设置 1 套中压逆变回馈型能馈装置,其工作原理如图 2 所示。

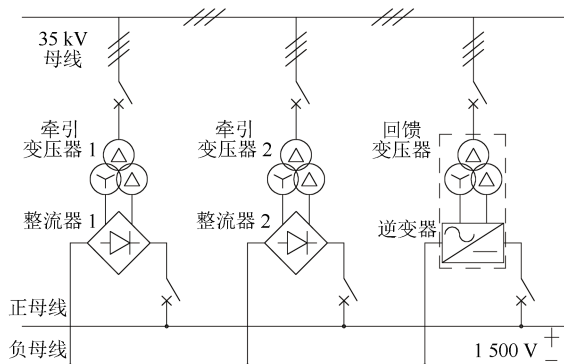


图 2 “牵引整流机组+中压逆变回馈型能馈装置”  
工作原理图

该类型能馈装置主要采用电力电子器件构成大功率逆变器,其直流侧与牵引变电所中的整流器直流母线相连,其交流进线连接到 35 kV 交流母线上。当再生制动使接触网电压升高并超过规定值时,逆变器启动并从直流母线吸收电流,将牵引供电系统中再生直流电逆变成工频交流电回馈至中压供电网络,保障列车电制动功能的发挥,同时起到降低并稳定直流牵引网电压的作用。当列车再生制动功率大于能馈装置逆变功率峰值时,装置能够保持额定功率恒功率逆变运行。

该装置充分利用了列车再生制动能量,提高了再生能量的利用率,节能效果较好,并可直接取消列车车载制动电阻的配置;其再生能量直接回馈到中压供电网络,不需要配置额外的储能设备。

## 2 中压逆变回馈型能馈装置的缺点

宁波轨道交通集团有限公司一直不断致力于开发更加简单可靠、节能及节省投资的牵引供电设备和应用模式。目前,已经运营的轨道交通 1 号线、2 号线采用车载制动电阻方案。在建轨道交通 3 号线列车全部取消了车载制动电阻,除车辆段牵引变电所采用电阻消耗型能馈装置外,正线牵引变电所

全部采用中压逆变回馈型能馈装置。该方案的缺点如下:

1) 需要在牵引变电所原有牵引整流机组设备配置的基础上,单独增加直流开关柜、回馈变压器、高压开关柜及能馈控制柜等设备,增加了再生能馈装置设备房间的建筑面积,同时也增加了牵引变电所的土建和设备投资。

2) 能馈装置只有在牵引网电压升高并超过某个规定值时,才启动能馈装置的再生能量吸收利用功能,虽然在一定程度上抑制了过高的牵引网电压,但终究不具备能馈装置的自然逆变和持续稳定直流网压的功能。

## 3 双向变流器方案的提出及论证

牵引供电系统是保障列车正常运行的重要组成部分,对其功能进行整合、优化和提升,不仅符合系统运行要求,也与我国倡导的节能环保发展战略决策一致。随着电力电子器件的发展及大容量变流设备控制和生产工艺水平的提高,大功率双向变流器已具备实施条件。因此,双向变流器是牵引供电系统牵引技术发展的一个新方向。

针对再生制动能馈装置存在的诸多缺点,2016 年 5 月,宁波市轨道交通集团有限公司牵头,联合中铁电气化勘测设计研究院有限公司、徐州和纬信电子科技有限公司、海南金盘电气有限公司等单位提出了双向变流器研究及应用课题,致力于研制出可以完全替代二极管整流机组+再生制动能馈装置的牵引供电双向变流设备。2016 年 11 月,陆续完成了双向变流器可行性分析、产品设计、样机生产及工厂测试。截止 2017 年 6 月,在中国中车宁波车辆基地试车线进行了近半年的双向变流器挂网试运行试验,测试并记录了多项车辆及双向变流器运行技术参数,并顺利通过专家评审。2018 年 3 月,经过反复论证及现场勘察,选择在宁波轨道交通 2 号线一期宁波大学站,启动牵引变电所改造工程及双向变流器挂网试运行研究项目,并陆续完成双向变流器的安装、调试及运行试验数据的测试、分析、专家评审等工作任务。

## 4 双向变流器方案的工作原理及运行方式

绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 是一种复合全控型电压驱动式功率半导体器件,具有驱动功率小、饱和压降低的优点,非常适合应用于直流电压为

600 V 及以上的变流系统。双向变流器装置就是由 IGBT 构成的大功率牵引供电设备,该设备替代传统整流器机组和再生能馈装置,实现了整流回路和逆变回路的一体化设计,且便于运营管理和维护。双向变流器牵引供电工作原理如图 3 所示。

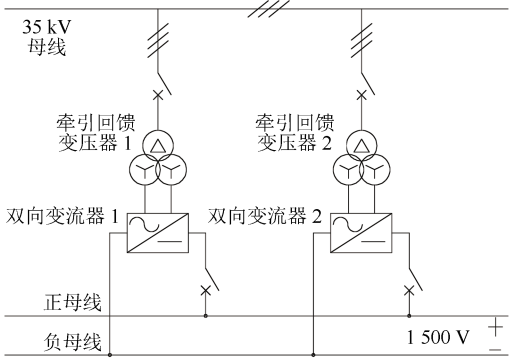


图 3 双向变流器牵引供电系统工作原理图

采用双向变流器替代整流机组后,在整流状态下工作时,双向变流器可为列车提供牵引功率,从而在一定程度上维持网压的稳定;在逆变状态下工作时,双向变流器能够将列车再生制动能量回馈到交流电网,供其他负载使用,避免消耗电阻,以达到节约能源的目的。此外,还可以在无功补偿状态下实现对交流中压电网的无功补偿,以提高交流系统功率因数。

采用双向变流器替代整流机组后,在正常运行方式下,全线双向变流器向牵引网供电;当一座牵引变电所发生故障时,由相邻牵引变电所越区形成大双边供电;当一套机组发生故障时,由另一套机组在其容量允许的范围内继续运行。宁波轨道交通在建 4 号线工程,对原有牵引供电系统初步设计方案进行了大量的创新修改,将自主研发的专用回流轨技术、双向变流器技术两项科研成果转化到实际应用中,成为全国第一条采用双向变流器牵引供电技术方案的城市轨道交通线路。

5 双向变流器方案的继电保护配置

5.1 双向变流器方案 35 kV 保护配置

采用双向变流器方案后,牵引回馈变压器的短路阻抗电压较传统牵引变压器增大,由此引起变压器低压侧的短路电流减小。以 2 200 kVA、2 750 kVA 和 3 300 kVA 3 种容量的变压器为例,通过计算得出变压器阀侧(0.9 kV 侧)发生半短路和全短路时的短路过流保护灵敏系数如

表 1 所示。

表 1 变压器阀侧短路过流保护灵敏系数

双向变流器 额定容量/kW	$I_c/A$	变压器阀侧短路过流 保护灵敏系数	
		半短路	全短路
2 000	33.300	1.590	1.490
2 500	41.600	1.290	1.230
3 000	49.900	1.060	0.997

注:  $I_c$  为变流机组额定电流,折算至 35 kV 侧;  $I_0 = 1.3$ ,  $I_0$  为过流保护整定值;  $I_{fmax}$  为最大负荷电流,  $I_{fmax} = 1.3 \times 3I_c$

由表 1 可知,采用双向变流器后,只有 2 000 kW 的双向变流器变压器阀侧发生半短路时 35 kV 过流保护能够满足灵敏系数 1.5 的要求,2 500 kW 及 3 000 kW 的双向变流器变压器阀侧发生半短路和全短路时 35kV 过流保护均不能满足灵敏系数 1.5 的要求。因此,常规的过流保护配置方案对于双向变流器不适用,需重新进行考虑。

采用复合电压(即负序过电压+低电压)闭锁过流保护是提高过流保护灵敏度的有效且常用的方法。列车在正常运行状态下,由于三相对称,负序和零序分量的数值均为零,保护不启动;当变压器高、低压任一侧发生相间不对称短路故障时,35 kV 系统都会产生负序分量,高压侧发生接地短路时还会存在零序分量,因此,尽管短路电流不大,但通过检测负序电压可判断系统是否出现相间不对称短路;当变压器阀侧发生三相对称短路时,由于变压器阻抗电压较大,因此短路电流不大,35 kV 侧的电压下降也不明显,但变压器阀侧电压下降明显,因此可将阀侧电压的降低作为启动过电流保护的条件。

因此,采用双向变流器方案后的牵引回馈变压器 35 kV 保护配置包括电流速断保护、复合电压闭锁过流保护、零序电流保护、过负荷保护、变压器内部绕组温度保护及铁芯温度保护。

5.2 双向变流器方案直流系统保护配置

采用双向变流器方案后,牵引回馈变压器的短路阻抗电压较传统牵引变压器增大,直流牵引供电系统的近、中、远端短路电流及短路电流变化率均比整流方式时要小。采用双向变流器方案后,传统直流馈线的大电流脱扣保护、电流增量保护的保护区范围比整流方式时有所减小,在近、中端短路的保护动作时间及全分断时间亦比整流方式时要长。正常运行方式下牵引网发生短路时各种保护相互配合,基本能保证牵引网近、中、远端短路的全范围保护;一座牵引所在解列、越区供电方式下,当远端

发生短路时,部分间距大的牵引所区间需要依靠双边联跳保护实现全范围保护。因此,直流系统保护配置方案维持与整流方式保护配置方案相同。

## 6 双向变流器方案的技术优势

双向变流器采用了 IGBT 模块和 PWM(脉宽调制)技术,通过 PWM 控制传输能量的大小和方向,既能实现整流又能完成逆变。该方案兼具牵引整流机组与中压能馈逆变功能,此外还具备稳定电压、提升供电质量及控制功率因数等多项优势,是城市轨道交通牵引供电技术的发展趋势和方向。该方案的优点在于:

1) 牵引回馈变压器采用高压无移相绕组,使得线圈结构更简单。线圈作为变压器的核心部件,结构越简单,相应的可靠性也会越高。借鉴牵引整流变压器的制造经验,完全可以保证牵引回馈变压器在生产制造中的品质。

2) 双向变流器具有牵引供电及再生能量回馈的能力,同时亦具备承受直流系统短路电流的能力,能够完全取代传统牵引整流机组+能量回馈装置。

3) 对于新建线路,与传统牵引整流机组+能量回馈装置比较,该方案能够有效减少设备房使用面积;对于未设置能量回馈设备用房又需增加能量回馈功能的既有线路,便于进行改造工作。

4) 该方案具有持续稳定直流牵引网网压作用,能够有效降低网损,改善列车运行环境;同时完全

取消了车载制动电阻的设置,减轻了车辆重量,一定程度上有利于列车节能。

## 7 结语

目前,我国各城市均在大力发展城市轨道交通建设,双向变流器牵引供电技术的研究与应用,从本质上可以改变原有牵引供电方式。因此,研发出具有完全自主知识产权的新一代牵引供电设备,实现全功率的列车牵引和制动能量自然双向变流,可以显著提升列车直流供电质量,并达到节能目的。双向变流器牵引供电技术在宁波轨道交通线路的科学研究、创新示范应用以及相关技术标准的不断完善,将为我国城市轨道交通新型牵引供电系统的应用和推广提供可靠的技术储备和保障。

## 参考文献

- [1] 张刚,刘志刚,牟富强.双向变流器在城轨牵引供电系统中的运用[J].都市轨道交通,2014(4): 109.
- [2] 陈德胜,刘志刚,张钢.能馈式牵引供电装置在轨道交通领域的应用[J].都市轨道交通,2014(1): 111.
- [3] 许爱国,谢少军,姚远.基于超级电容的城市轨道交通车辆再生制动能量吸收系统[J].电工技术学报,2010(3): 121.
- [4] 余龙,张刚.双向变流器在城市轨道交通中的应用浅析[J].电气化铁道,2012(6): 42.
- [5] 夏景辉,郑宁,左广杰.地铁车辆逆变型再生制动能量回馈方案与装置的研究[J].城市轨道交通研究,2013(6): 42.
- [6] 陈勇,刘承志,郑宁.基于逆变回馈的地铁再生制动能量吸收的研究[J].电气化铁道,2011(3): 36.

(收稿日期:2018-02-09)

(上接第 109 页)

- [10] DUIVE D C, DAAMEN W. State-of-the-art crowd motion simulation models [J]. Transportation Research Part C, 2013 (3): 193.
- [11] ZHANG Q, HAN B M, LI D W. Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations[J].Transportation Research Part C,2008(5): 635.
- [12] SCHELENZ T, SUESCUN A, WIKSTROM L. Application of agent based simulation for evaluating a bus layout design from passengers' perspective [J]. Transportation Research Part C, 2014(2): 222.
- [13] SERIANI S, FERNANDEZ R. Pedestrian traffic management of boarding and alighting in metro stations[J].Transportation Research Part C,2015,53: 76.

- [14] LI D W. Modeling and simulation of microscopic pedestrian flow in MTR hubs [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2007.
- [15] ZHAO N, AN S.Collaborative management of complex major construction projects: anylogic-based simulation modeling [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society,2016(10): 1.
- [16] 佟松贞.基于物料搬运系统认知自动化水平的制造柔性研究 [D].北京:清华大学,2013.
- [17] 贾洪飞.综合交通客运枢纽仿真建模关键理论与方法[M].北京:科学出版社,2011.

(收稿日期:2019-05-21)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704