

[变流器]

双向变流技术在轨道交通的应用

文/覃伟毅 喻奇 李鹏

中车城市交通规划设计研究院有限公司

双向变流技术在轨道交通牵引供电领域的推广应用，使其优势和潜力得到了进一步认可。该技术不仅引导着未来的发展方向，而且具备多种功能，如双向能量流、可控功率流和可调输出直流电压等，为提高供电质量、降低线路损耗和减少杂散电流危害提供了强有力的支持。介绍了双向变流器在国内外的应用情况，描述了双向变流器的工作原理，并详细分析了该技术在城市轨道交通中的典型应用方案的技术优势及目前存在的不足。此外，还介绍了双向变流技术在无锡至江阴城际轨道交通工程的实际应用案例，展示了其在轨道交通工程中的引领和示范作用。最后，双向变流器技术在国内轨道交通项目中的广泛应用和价值创造将为轨道交通行业的未来发展注入新的动力。

尽管城市轨道交通具有许多优点，如安全、舒适、快速、大运量和环保等，随着这种交通方式的发展和客运量的不断增长，其能源消耗总量也在持续增加。这也引发了对于列车制动能量浪费问题的关注。换句话说，城市轨道交通的快速发展和能源消耗的增加，让人们更加关注列车制动能量的有效利用问题。

针对制动能量浪费的问题，目前存在多种解决方案，包括电阻吸收、电容储能、逆变器（涵盖逆变器到中压和逆变器到低压）和双向转换器等。在这些方案中，逆变器方案应用最为广泛，它由二极管整流单元和能量反馈装置组成。这一方案不仅能有效减少列车制动能量浪费，还能有效抑制直流电网电压的上升问题。因此，逆变器方案在提高城市轨道交通能效方面发挥了重要作用。

双向变流器是近年来开发的另一种节能方案，它不仅可以在列车制动时吸收制动能量，还可以在列车启动和运行时提供能量，并具有整流功能。事实上，双向变流器同时具有整流器和逆变器功能，并具有取代整流器单元的功能，这是牵引设备在未来供电系统中的发展方向。

这一技术的进步为城市轨道交通系统带来了崭新的可能性。现在，能够更有效地满足牵引供电系统的需求，提高功率密度、增强过载能力，并在一定程度上控制成本。这表明双向变流器在城市轨道交通中的应用将更加广泛，为系统性能的提升和可持续性发展创造了更有利的条件。

因此，电力电子技术的不断创新与进步为城市轨道交通领域注入了新的活力，促使这一领域迈向更为先进和可持续的未来。

城轨再生制动装置应用现状

我国城市轨道交通中的直流供电系统存在电压不可控、能量单向流动等问题，再生制动能量的处理成为难题。传统耗能装置在短站间、快速速等情况下浪费大量再生能量，还可能增加隧道温度和环控通风系统负荷。再生制动能量占牵引能量的30%，但大部分被浪费或以热能消耗，引发能源浪费和列车磨损问题。因此，需要寻找更有效的再生制动能量处理方案。其中，电阻耗能方式会产生大量热量，导致隧道温度升高；电容储能方式虽具有高功率密度等优点，但储能容量相对较小；飞轮储

能方式具有高储能密度、环保可靠等优点，但轴承技术和飞轮材料的限制仍是技术瓶颈。逆变吸收装置可将再生直流电源转换为工频交流电源，反馈至交流母线，实现再生制动能量的回收和利用，提高能源效率。随着电力电子技术和数字控制技术的不断发展，逆变吸收装置的性能和可靠性得到进一步提升。

双向变流技术发展及应用

国外在城市轨道交通中已经广泛应用了双向变流装置。典型厂商如西门子、法国阿尔斯通、日本明电舍和瑞士ABB等，都已经进行了工程化应用。这些装置通过不同的技术方案，实现了对再生制动能量的有效回收和再利用，提高了能源利用效率和系统的稳定性。其中，西门子的“Sitrans-TCI”方案通过提升交流电压和使用直流电抗器来限制循环电流；法国阿尔斯通的双向变流装置采用了IGBT可控模块，节能效果显著；日本明电舍为双制式供电线路提供了大功率的PWM变流器，满足了高过载需求，并大幅提高了供电距离；瑞士ABB则推出了一款峰值功率高达2 750 kW的能量回馈设备，为交通运输领域提供可靠的能量回馈解决方案。这些技术的创新和应用，为城市轨道交通系统的稳定运行提供了重要的技术支持。国内外双向变流应用情况见表1和表2。

表1 国外双向变流应用情况

序号	线路	国家	年份	应用模式
1	筑波线	日本	2005	直流部分
2	Paris Tramway T1	法国	2011	单站
3	London Metro Victoria Line	英国	2015	单站
4	Milan Metro Line 3	意大利	2017	单站
5	Riyadh Metro line 4/5/6	沙特	2019	全线
6	Sydney CBD & South-East Light Rail	澳大利亚	2020	全线
7	Panama Metro Line 2	巴拿马	2020	全线
8	Dubai 2020 Extension	阿联酋	2020	全线
9	Riyadh Metro line 5	沙特	2020	全线
10	Riyadh Metro line 6	沙特	2020	全线
11	Milan Desio-Seregno Tramway	意大利	2021	全线

表2 内双向变流应用情况

序号	项目	应用模式	年份	说明
1	宁波地铁2号线	单站“2+1”	2018	挂网，后投入使用
2	呼和浩特地铁1号线	全线“2+1”	2019	挂网，验证功能
3	徐州地铁4号线	单站“2+1”	2020	验证功能
4	丽江有轨电车	全线“0+1”	2023	正式应用
5	重庆4号线二期工程	全线“2+1”	2023	正式应用
6	无锡锡澄线	全线“1+1”	2024	正式应用
7	宁波地铁8号线	全线“1+2”	/	在建

双向变流技术在城轨应用研究

1. 双向变流装置工作原理

双向变流技术是利用直流接触器柜、PWM变流器、变压器、0.4 kV开关柜和40.5 kV开关柜等设备，将直流1 500 V系统与AC 35 kV环网连接。它既可以工作在图1所示的将AC 35 kV的牵引电能整流到DC 1 500 V的牵引整流模式，也可以工作在图2所示的将DC 1 500 V的制动电能逆变到AC 35 kV的逆变回馈模式，实现能量双向流动。其基本原理是，当列车制动时，DC 1 500 V系统电压升高，当电压升高到一定程度时，触发PWM变流器，优先于车辆制动电阻吸收再生电能，再生电能经变压器升压至AC 35 kV返回环网交流系统，供本站及其他车站的牵引和动力照明负荷使用。这样就减少了主站供给的电能，达到了再生制动电能利用的效果，实现了节能。

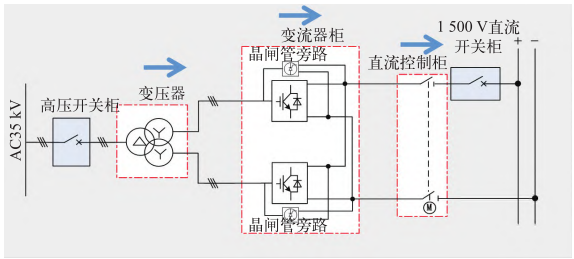


图1 牵引整流模式

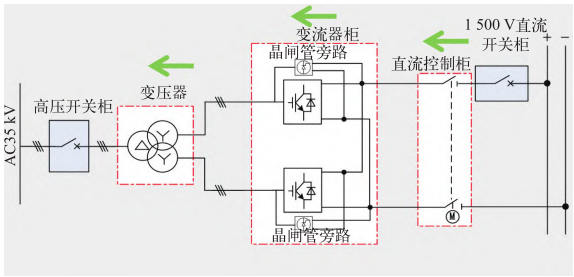


图2 逆变回馈模式

2. 工程应用方案

(1) 方案一：完全替代方案

本方案采用两套独立的双向变流装置，将其完全替代原有的两套整流机组。具体的实现方式如图3所示。通过并联的方式将两套双向变流装置连接，以此来为直流牵引网提供电力。这一方案的实施使得系统整体的供电结构发生了全面的改变，完全摒弃了原有的整流机组，以双向变流装置为主要供电来源。

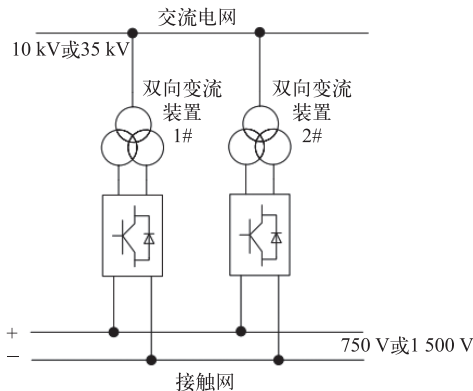


图3 完全替代方案示意图

(2) 方案二：部分替代方案

本方案通过并联的方式连接一套双向变流装置和原有一套整流机组如图4所示，共同为直流牵引网提供电力。这一调整使得系统的供电结构发生了部分性的变化，引入了更为灵活和先进的双向变流技术，同时仍然保留了一套整流机组。

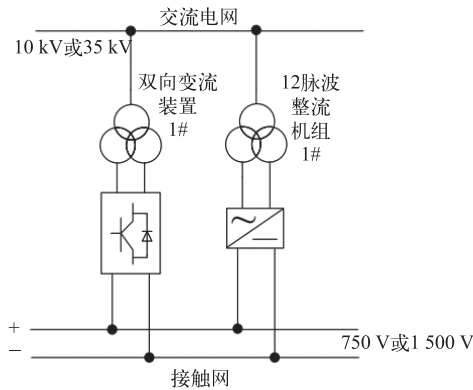


图4 部分替代方案示意图

(3) 方案三：独立新增方案

本方案通过并联的方式连接双向变流装置和原有的两套整流机组如图5所示，共同为直流牵引网提供电力。这种方案的引入使得系统具备更加灵活的

供电结构，同时无须对原有的整流机组进行改动。

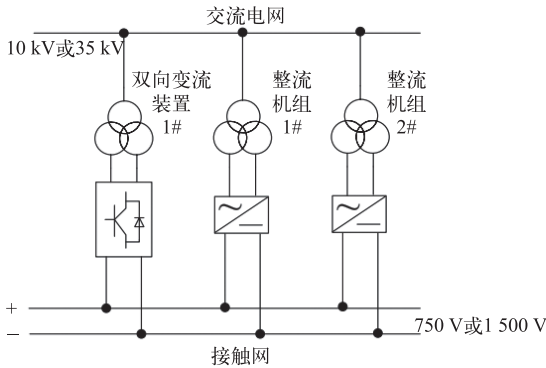


图5 独立新增方案示意图

三种方案的优缺点比较见表3。

表3 双向变流器设置方案比较

序号	方案	优点	缺点
1	完全替代	无需额外增加设备安装空间，占地面积小；充分用装置的双向变流能力；输出可控，可维持直流侧电压稳定	设备容量大；系统可靠性稍；投资较大
2	部分替代	不新增安装空间，降低使用面积；可靠性高；价格低；输出可控，可维持直流侧电压稳定	谐波含量较大；控制系统复杂
3	独立新增	扩大牵引容量；系统可靠性高	需额外增加设备安装空间，投资增加

通过以上分析可以得知，一些备选方案面临的难题主要集中在整流机组与逆变回馈装置的协同配合，导致控制系统变得复杂。在方案一中，从功能、性能和工程实施的角度分析，相较传统整流机组方案系统功能更强大、性能更优越和工程实施更简单，不仅能满足当前的需求，还能适应未来的发展趋势。

3. 双向变流技术优势

双向变流技术在城市轨道交通工程中应用有如下几个方向。

1) 节约能源。双向变流器在轨道交通牵引供电系统中具备独特优势，能够完全取代传统的牵引整流机组和能量回馈装置。它具备能量双向流动功能，输出可控，维持直流侧电压稳定，并能承受直流系统短路电流。这使得供需更加匹配，电客车在任何时候都能保持最佳取流状态，从而优化了整个系统的运行效率和稳定性，提高节能水平。

2) 稳定牵引网网压。采用双向变流技术，这种

控制方式不仅提高了牵引网的稳定性，还增强了列车运行的安全性。因为无论是在正常行驶还是制动过程中，牵引网都能保持在一个相对稳定的电压范围内，这样可以大大降低因电压波动导致的不稳定因素，进一步保证列车的安全运行。

3) 提高系统功率因数。双向变流器具有任意调节功率因数的能力，并能补偿无功功率。

国内典型应用案例

无锡至江阴城际轨道交通工程（锡澄线）是一项全长30.4 km的城际轨道交通项目，始于江阴外滩，终于无锡堰桥。其中，地下线路占10.5 km，过渡段为0.2 km，高架线路长达19.7 km。沿线共设有9座车站，包括5座地下站和4座高架站，平均站间距为3.37 km，最大站间距为7.02 km，最小站间距为1.72 km。江阴市区段采用地下敷设，而徐霞客大道段采用架空敷设。

供电系统方面，该工程采用集中供电方式，列车的牵引供电系统为110/35 kV两级电压，采用DC 1 500 V接触轨供电方式。设计最高列车运行速度为120 km/h。沿线设有11座牵引降压混合变电所，其中10座设有1套12脉波整流单元和1套双向变流单元，车辆段设有1座，配备等效24脉波整流装置，供电设施分布如图6所示。



图6 供电设施分布示意图

无锡至江阴城际轨道交通工程不仅在线路布局上兼顾地下和高架结构，还通过高效的供电系统，包括双向转换器等先进设备，为城际交通提供了可靠的基础设施，推动了交通运输领域的发展。设备参数见表4。

表4 双向变流装置性能参数

项目	参数
额定交流电压/kV	0.9
牵引供电系统最高非持续电压/V	DC 1 800
牵引供电系统最低电压/V	DC 1 000
牵引供电系统列车再生电制动最大非持续性电压/V	DC 1 950
额定直流电压/V	1 500
额定功率/kW	2 200/3 000
牵引供电系统接地方式	正、负极不接地
直流侧纹波系数	≤3%

自2023年6月以来，无锡至江阴城际轨道交通工程已完成高架接触轨热滑试验，运行状态良好，准备正式投入运营。这条轨道交通新线不仅为城际交通提供了便利，也为无锡和江阴的经济发展注入了新的活力。随着这条线路的正式运营，必将吸引更多的客流和商业资源，进一步促进无锡和江阴的繁荣发展。

结束语

在轨道交通牵引供电行业，双向变流技术的应用在国内蓬勃发展。它不仅代表着未来的发展方向，而且集众多功能于一身。该技术具有能量双向流动、功率流可控、输出直流电压可调和供电品质优良等优点。通过优化列车运行环境，减少越区供电需求，降低线路损耗，减少杂散电流危害，双向变流技术得到了业界的广泛认可。更重要的是，该技术的应用已经能够替代传统方案中的SVG无功补偿装置，在国内轨道交通建设中起到了很好的引领和示范作用。因此，双向变流技术具有广阔的应用前景和价值，值得进一步推广和应用。EA

(收稿日期：2024-01-22)