

大功率双向变流装置在轨道交通中的应用研究

李书臣 于喜林

神铁二号线(天津)轨道交通运营有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i1.11430

[摘要] 大功率双向变流装置,亦被称为四象限变流器,在城市轨道交通领域有着极为关键的应用。其具备整流、逆变以及无功补偿等卓越功能,其中整流功能可有效替代传统的整流机组,逆变功能则能实现中压馈装置的作用。通过这些功能,它不仅能够稳定直流网压,还可以对交流系统进行无功补偿,有力地提升了整个轨道交通电力系统的稳定性与能效表现,因此在业界收获了广泛的关注与重视。

[关键词] 城市轨道交通;牵引供电;双向变流装置

中图分类号: U223 文献标识码: A

Research on the application of high power bidirectional converter in rail transit

Shuchen Li Xilin Yu

Shentie Line 2 (Tianjin) Rail Transit Operation Co., LTD.

[Abstract] High-power bidirectional converter, also known as four-quadrant converter, has a critical application in the field of urban rail transit. It has excellent functions such as rectifier, inverter and reactive power compensation, among which the rectifier function can effectively replace the traditional rectifier unit, and the inverter function can realize the role of medium voltage energy feed device. Through these functions, it can not only stabilize the DC network voltage, but also carry out reactive power compensation for the AC system, which effectively improves the stability and energy efficiency performance of the entire rail transit power system, so it has gained extensive attention and attention in the industry.

[Key words] Urban rail transit; traction power supply; two-way converter device

本文系统地阐述了双向变流装置的功能特性、系统架构以及工作原理。文中展示了在天津地铁2号线开展的现场试验数据,这些数据以直观且极具说服力的方式证实了该装置所具有的显著节能效果,为其在城市轨道交通乃至更广泛的电力应用场景中的推广应用提供了坚实的理论与实践依据。

1 城轨轨道交通牵引供电系统现状

现在,城市轨道交通牵引供电系统大部分采用二极管整流器进行供电。二极管整流器是一种较为传统的整流设备,它基于二极管的单向导电性将交流电转换为直流电,为城轨列车的牵引电机提供稳定的直流电源。这种供电方式在早期的城轨建设中被广泛应用,技术相对成熟。

1.1 存在的问题-能量单向传输

二极管整流器的一个主要局限在于其能量只能单向传输。这意味着它只能将交流电转换为直流电,而无法实现逆向转换。在城轨列车的运行过程中,当列车进行制动时,牵引电机将由电动机状态转变为发电机状态,产生再生制动能量。

1.2 存在的问题 - 输出特性不可控

二极管整流器的输出特性不可控也是一个重要问题。其输

出的直流电压和电流基本取决于输入的交流电压和负载情况,无法根据城轨列车的实际需求进行灵活调节。

当城轨线路上的列车数量、运行速度等因素发生变化时,牵引供电系统的负载也会随之改变。由于二极管整流器无法对输出特性进行有效控制,可能导致直流网压出现波动。例如,在早晚高峰时段,列车密集运行,牵引供电系统负载较重,直流网压可能会出现下降的情况;而在非高峰时段,列车较少,负载较轻,直流网压可能会升高。这种电压波动会对列车的正常运行和设备的使用寿命产生不利影响。

1.3 存在的问题-再生制动能量浪费及衍生问题

由于二极管整流器无法有效利用列车再生制动能量,这些能量不得不通过制动电阻进行消耗。这造成了巨大的能量浪费。

同时,制动电阻在消耗能量的过程中会产生大量的热量,导致隧道内温度升高。

2 大功率双向变流装置的优势

大功率双向变流装置具有能量双向流动、直流特性可控、功率因数可调、谐波含量小等优良特性。

天津2号线双向变流装置基本参数如下:

系统容量: 4MW;

系统功能: 整流、逆变、无功补偿;

功率器件: IGBT;

交流输入: $2 \times AC3 \Phi \times 450V$;

直流输出: 750-1000V;

功率因数: >0.99 ;

变流器效率: $>98\%$ (额定功率);

电流谐波畸变: $<3\%$ (额定功率);

该装置应用于城市轨道交通牵引供电系统具有以下优良特性:

2.1 再生制动能量回馈功能(逆变模式)

节能效果显著: 大功率双向变流装置在逆变模式下, 能够将城轨列车制动过程中产生的再生制动能量有效地反馈回交流电网。这与传统的二极管整流器形成鲜明对比, 传统方式只能将这部分能量通过电阻消耗掉。

对电网的友好性增强: 再生制动能量反馈回交流电网后, 能够优化电网的能量分布。在城市轨道交通系统中, 列车的频繁制动会产生大量间歇性的再生制动能量, 双向变流装置就像一个能量的“回收器”和“中转站”, 使这些能量能够平滑地注入电网, 有助于维持电网的稳定性和电能质量。

2.2 整流功能稳定直流网压(整流模式)

动态调节直流电压: 在整流模式下, 大功率双向变流装置可以为城轨列车提供牵引电能, 并且能够对直流网压进行动态调节。与二极管整流器输出特性不可控不同, 双向变流装置可以根据列车的运行状态和负载需求, 实时调整输出的直流电压。

2.3 无功补偿功能提升交流系统功率因数(无功补偿模式)

改善功率因数: 大功率双向变流装置还可以工作在不功补偿状态, 对交流中压电网进行无功补偿。双向变流装置能够动态地提供无功功率, 补偿系统中的无功需求, 将功率因数提高到0.95以上。

3 大功率双向变流装置的构成及工作原理

大功率双向变流装置通常由隔离变压器、滤波柜、双向变流柜、隔离开关柜等组成, 该系统与既有的二极管整流机组并联。其中, 双向变流柜是整个大功率双向变流装置的核心, 内含两台四象限变流器, 直流侧可以并联或串联, 分别满足750V和1500V供电电压的需要。

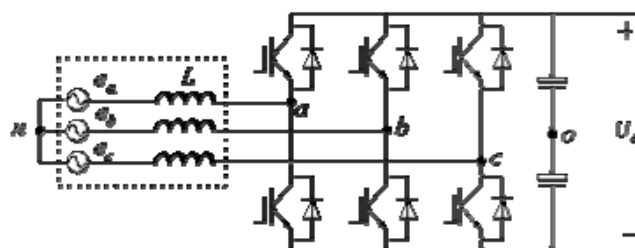
事实上, 每台双向变流器主电路可以看成是一个三相PWM逆变器加上一个交流电感 L , 如图1(a)所示。

由图1(b)所示双向变流器的单相等效电路也可知, 在电网电压 e_a 和交流电感 L 一定的情况下, 通过控制 U_a 的大小和相位, 就可以控制电流 i_a 的大小和相位, 进而控制变流器传输的有功功率和无功功率。

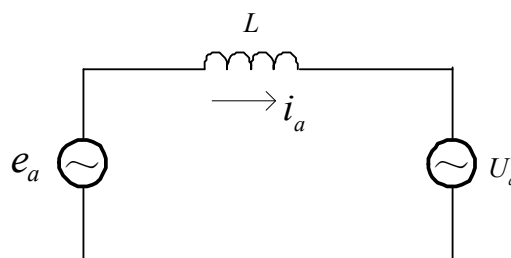
4 现场实验

2023年底, 两套大功率双向变流装置在天津地铁2号线成功投入实际应用, 其中设备容量为4MW, 交流电网额定电压为35kV,

直流额定电压750V。



(a) 主电路



(b) 单相等效电路

图1 双向变流器主电路及单相等效电路

通过图2能够直观地观察到相关波形, 其中CH1代表的是电网电压波形, CH2对应的则是交流电流波形。根据该波形可以看出, 回馈的电压和电流波形均比较好。这意味着在双向变流机组执行逆变操作、将制动能量回馈至电网的这个过程中, 所产生的交流电流波形具备较好的特性, 从而说明双向变流机组在回馈制动能量时, 对于电流方面的输出质量是符合要求的, 能够较为稳定且有效地将列车制动产生的再生制动能量以质量良好的交流电流形式回馈到35kV的交流电网中, 有助于整个城市轨道交通牵引供电系统更好地实现能量回收利用以及保障电网的电能质量等。

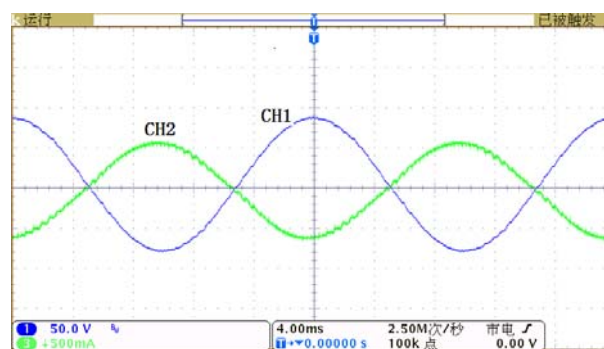


图2 电网电压和电网电流波形

图3所示为双向变流机组与二极管机组并联工作时交流侧电流波形(包络线)。CH1为双向变流机组交流电流波形, CH2为二极管机组的交流电流波形。从图3可知, 在列车牵引时, 二极管整流机组和双向变流机组共同向列车提供牵引能量; 在列车制动时, 二极管整流机组反向截止, 双向变流机组将再生制动能量反馈回电网。

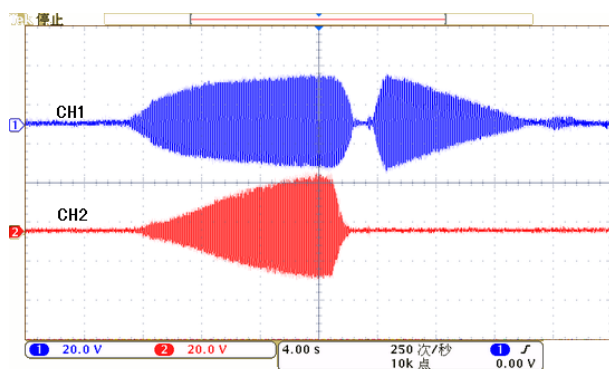


图3 并联工作时交流电流波形

在整流方面,它能够分担部分整流功率,与传统的整流机组协同工作,有助于提升整个整流系统的稳定性、灵活性以及应对不同负载情况的能力。例如在高峰时段列车牵引功率需求大时,它可与整流机组共同输出合适的直流电压和电流,保障列车正常运行。

而无功补偿功率的提供也具有重要意义。它能够改善交流电网的功率因数,减少无功电流在电网中的传输,降低电网的损耗以及因无功功率不平衡带来的诸如电压波动、闪变等问题,进一步提升了城市轨道交通供电系统的电能质量和可靠性,为

其他电气设备的稳定运行创造了更有利的条件,整体上提升了城市轨道交通牵引供电系统的综合性能和运营效益。

5 结论

本文分析了当前的城市轨道交通牵引供电系统现状和存在的问题,提出了一种新型的双向变流机组应用方案,介绍了其性能特点、系统构成及工作原理,并在天津2号线进行了现场试验。试验结果表明该装置具备整流、逆变、无功补偿等多种功能,应用到城轨牵引供电系统中,节能效果显著。

[参考文献]

- [1]余运友.城市轨道交通机电设备运维智能管控系统研究[J].人民公交,2024(12):73-75.
- [2]王启锋,彭恒义,仲聪,等.轨道交通车站环控风机在线监测系统开发及应用[J].机电工程技术,2023,52(12):137-141.
- [3]朱贺,陈波.地铁车辆基地智能环控系统设计与研究[J].科技与创新,2023(14):137-139,142.

作者简介:

李书臣(1988--),男,汉族,河南周口人,高级工程师,工学学士,主要从事轨道交通供电系统研究。