

[动力系统]

一种应用在新型无轨电车动力系统中的双有源桥变换器

文/北京公共交通控股(集团)有限公司 孔维峰 李 凯
北京理工大学 孔维峰
北汽福田汽车股份有限公司 刘继红
凯博易控车辆科技(苏州)股份有限公司 朱学军 钮 震

基于隔离DC-DC变换器的新型无轨电车动力系统是无轨电车最新的技术发展。目前国内有基于LLC拓扑及移相全桥拓扑的两种竞品隔离DC-DC变换器方案,各有其自身的缺点。介绍了一种基于DAB拓扑的隔离DC-DC变换器,通过在北京市场的可靠运行验证其性能优异及质量卓越。

自西门子在1882年发明无轨电车以来,无轨电车一直都是城市公共交通的重要组成部分。在100多年里,伴随着电池技术、电动机技术以及电力电子技术的进步,无轨电车经历了几轮技术升级。最初的无轨电车是单源纯电系统,能源仅来自于架空线网。20世纪80年代出现了油电双源和电电双源系统,油电双源的能源来自于车载柴油和架空线网,而电电双源的能源则来自于车载铅酸电池和架空线网,电池充电由非隔离充电变换器实现。进入21世纪,无轨电车全部统一成了锂电池电电双源,并且出现了基于隔离DC-DC变换器的新的动力系统架构。这种新的动力系统架构具有极大的技术优势和广阔的市场前景。本文正是在此背景下开发了一款适用范围广泛,基于双有源桥拓扑的隔离DC-DC变换器。最后通过北京市场的数年应用情况证明该产品具有良好的品质和应用优势。

基于隔离DC-DC变换器的无轨电车新动力系统架构

新动力系统架构如图1所示,新动力系统架构的明显特点是集成有全功率的隔离DC-DC变换器。该变换器不仅提供在线充电能力,还提供无轨电车高压电气设备必不可少的一层集中绝缘能力。有此集

中绝缘能力之后,所有下游高压电气设备只需要满足基本绝缘设计要求,就可使得无轨电车共用普通纯电动车辆的各种高压水冷组件成为可能。

这种新架构有希望让越来越多的公共交通管理部门更新旧系统或投资新的无轨电车路线。

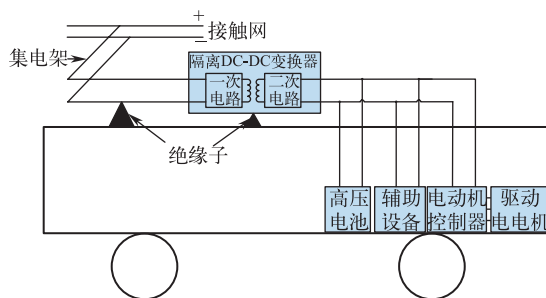


图1 基于隔离DC-DC变换器的无轨电车新动力系统架构

竞品隔离DC-DC变换器方案

无轨电车需求的隔离DC-DC变换器与一般应用的DC-DC变换器主要有两方面不同。

(1) 降压-升压工作模式

适用于较宽的输入电压范围和输出电压范围。输入电压范围为400~900 V,可同时适应600 V和750 V两种标准接触网电压。输出电压范围为400~750 V,可适应宽泛的锂电池配置。

(2) 双重绝缘

来自联合国无轨电车安全标准。根据该标准，所有与接触网连接的电气设备与车身之间应提供双重绝缘，不是单重绝缘，也不是加强绝缘。

在中国市场，目前有两个竞品解决方案。分别基于LLC拓扑和移相全桥拓扑，如图2和图3所示。图中仅显示核心拓扑，省略辅助部件，如预充电电路、EMI滤波器及控制器等。两种解决方案都采用模块化设计，并且变换器可以扩展到最多3个模块并联。

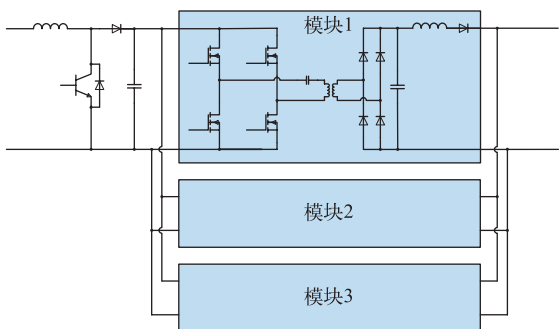


图2 Boost加LLC拓扑结构

基本的LLC拓扑升压能力有限，需要在LLC变换器之前使用一个Boost升压变换器来满足宽范围输入/输出电压的要求。基于LLC拓扑的解决方案的局限性在于谐振电容器耐压较高，并且两级变换结构导致整体效率偏低。在Boost加LLC解决方案中，Boost占空比和LLC频率可以调整，有两个控制自由度。

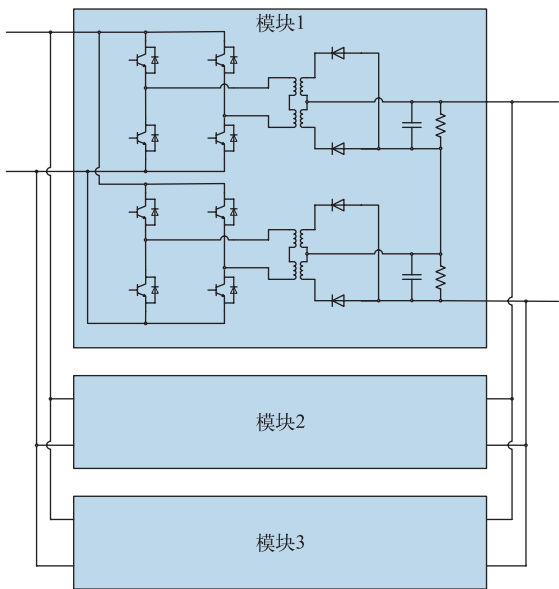


图3 移相全桥加串联二极管整流器拓扑结构

而基本的移相全桥拓扑没有升压能力，必须依赖升压变压器或者输出整流器串联来提供升压。这种拓扑的局限性在于其电压升压比为固定值2，在较宽的工作范围内无法实现效率优化，整体效率比前面的方案还要更低一些。在移相全桥加二极管整流器串联解决方案中，只有两个原边半桥之间的移相可以调整，是单自由度控制。

双有源桥变换器方案

1. 方案拓扑

鉴于已有方案的缺点，开发了基于双有源桥（DAB）拓扑的隔离DC-DC变换器，如图4所示。该拓扑最初是由Kheraluwala于1987—1991年首次提出的，现在是智能电网应用中固态变压器的研究热点。

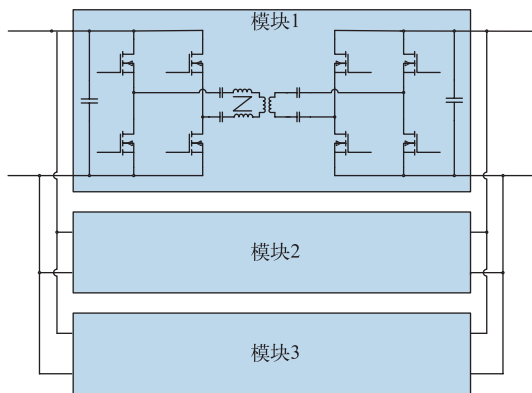


图4 DAB拓扑结构

这种拓扑的显著优点是增加了控制自由度、一次侧半桥之间的移相、二次侧半桥之间的移相及一次侧和二次侧全桥之间的移相，所有这些都可以作为控制自由度进行调整，非常适合宽输入/输出电压范围下的应用，并且效率获得提升。

本方案采用了模块化设计，最多是可以扩展为3个模块并联。

2. 绝缘设计

根据UNECE客车标准，基本绝缘和附加绝缘的要求分别为AC 3 500 V和AC 2 100 V，其中额定绝缘电压 U_{Nm} 是DC 1 000 V。这种对基本绝缘和附加绝缘有着不同绝缘要求的情况在其他电气领域并不常见，容易引起歧义。在此产品设计时，一方面为避免引起歧义，另一方面为提高产品安全性，将附加绝缘提升到AC 3 500 V。整个变换器绝缘设计框架如图5所示。

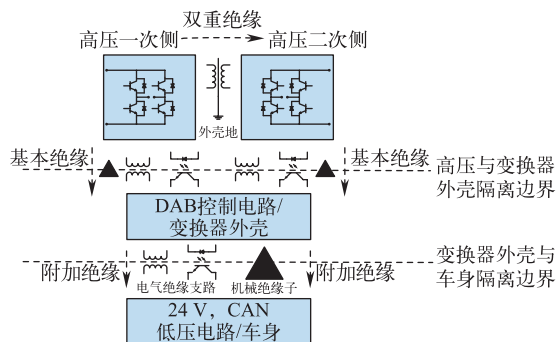


图5 DAB变换器中的双重绝缘设计

3. 组件连接框图

隔离变换器的核心是DAB模块。核心周围有输入二极管整流桥、预充电电路、直流链路大容量电容器、放电电阻器、输入和输出EMI滤波器、瞬态抑制器、输出二极管、传感器（电压、电流和温度）、IGBT驱动以及控制器。这些组件在变换器中的连接方式如图6所示。

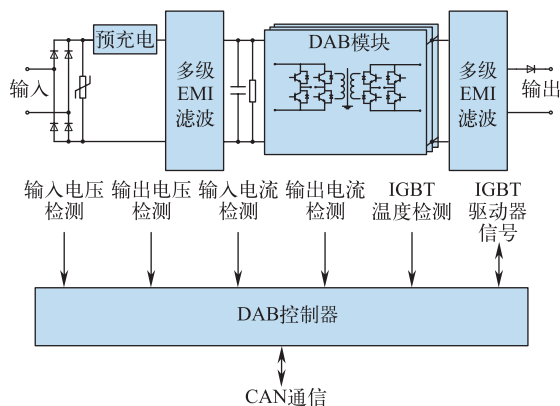


图6 DAB变换器组件连接框图

4. 实物DAB变换器

实物DAB变换器如图7所示。

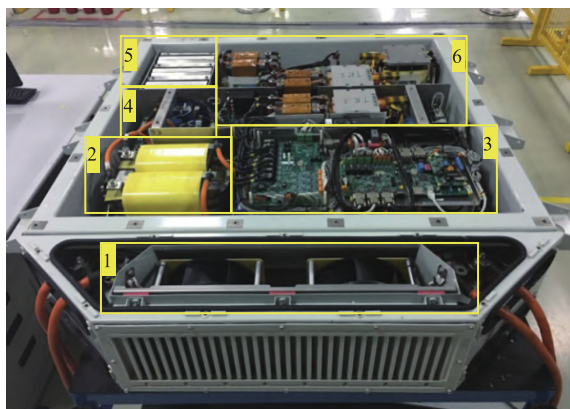


图7 实物DAB变换器

第1部分是两个电子控制的离心风机，转速根据IGBT的温度而变化。第2部分是一个巨大的输入电感器，抑制浪涌电流。第3部分是双层结构，顶层支撑控制器板，底层容纳一些输入和输出组件，例如输入二极管整流器、输出抗反向电流二极管和输出EMI滤波器。第4部分是预充电电路和输入EMI滤波器。第5部分是双层结构，顶层为直流母线大容量电容器，底层装有大功率电压均衡电阻器，当变换器关闭时，充当电容器放电电阻。第6部分是DAB变换器的核心，包括3个并联的DAB模块。

该变换器具有高IP防护等级，适合露天安装。安装示例如图8所示。



图8 DAB变换器在无轨电车车顶的露天安装

5. 规格指标

表1中列出了DAB变换器的主要规格指标作为参考。

表1 DAB变换器的主要规格

项目	规格
输入电压/V	DC 400~900 V
输出电压/V	DC 400~750 V
标称输入电压/V	DC 650 V
标称输出电压/V	DC 650 V
标称输出功率/kW	100
最大输入和输出电流	200 A, 500 V以下降额
冷却	按需强制风冷
标称效率 (%)	在标称电压和电流下 ≥ 96
最大效率 (%)	≥ 97
隔离	AC 3 500 V (基本) + AC 3 500 V (附加), 1 min
EMC	EN 50121-3-2 2015
保护	过电压、欠电压、过电流、短路、过热
控制供应	DC 24 V (DC 18~36 V)
通信	CAN J1939
工作模式	CV/CC/CP

(续)

项目	规格
诊断功能	CAN通信
工作温度/℃	-25 ~ 55, 40以上降额
储存温度/℃	-40 ~ 85
湿度	≤95% RH
振动	任何轴5 h的耐久性测试 EN 61373类别1, A类
减振	半正弦波 ± 3冲击/轴 EN 61373类别1, A类
噪声	≤65 dBA
IP等级	IP66
高度/m	≤2 000
最大尺寸(长×宽×高) / (mm×mm×mm)	~ 1 300×1 400×270
重量/kg	≤500
MTBF/h	≥50 000
MTRR/min	40

6. 效率

针对三种不同的输入/输出电压组合（分别为400 V输入/750 V输出、900 V输入/400 V输出和650 V输入/650 V输出）以及不同的输出负载测量变换器的效率，负载变化以5 kW作为增量，直至标称输出100 kW。获得的效率曲线如图9所示。在400 V输入/750 V输出以及900 V输入/400 V输出这两种极端工况下，由于一些关键元件的电流限制，将进行降额，因此这两种工况的输出负载不能达到100 kW。

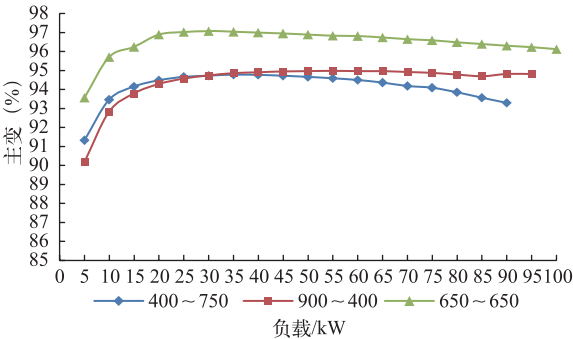


图9 100 kW DAB变换器效率曲线

从图9中可以看到，与标称650 V输入/650 V输出工况相比，两个极端工况的工作条件要恶劣一些，因此它们的效率比标称情况分别低了2%~3%。在标称工况下，效率可以很好地达到规格要求，满载时不低于96%，而部分负载时最大不低于97%。从图9中还可以注意到，该变换器的高效率部分相对平坦，10%~100%负载，效率在

1%~2%之间变化。这一显著的效率曲线特征归因于DAB拓扑结构及优化的控制算法。

DAB变换器在北京公交的应用

自2017年1月起，DAB变换器在北京公交双源无轨电车上开始应用，目前已装载运行460辆无轨电车，涉及四种车型，运营线路17条，既有600 V接触网电压平台，也有750 V接触网电压平台。

1. 专业鉴定

2017年6月，北京汽车行业协会组织对采用DAB变换器的BJD-WG120FN型双源无轨电车进行鉴定，并出具了编号（2017）鉴字（001）号《产品鉴定证书》，认为采用带两级隔离DC-DC变换器的新型高压电气架构，在保证线网安全的前提下，底盘兼容纯电动客车系统可共用生产体系。

2. 运行状况

2020—2021年DAB变换器在北京公交双源无轨电车应用情况见表2。

表2 基于DAB变换器的故障统计

序号	日期	车号	故障现象	更换件
1	2020-3-10	9528691	GUI板无通信，DC-DC不工作	GUI板
2	2020-3-31	9528693	GUI板无通信，DC-DC不工作	GUI板
3	2020-6-11	9532306	仪表报DC电源故障，故障代码27 IGBT驱动故障；A3 两路驱动板损坏	A3 驱动板
4	2020-9-17	9528723	不充电（仪表未报故障）	DC-DC
5	2021-1-8	9528719	上电时报DC通信故障，集电杆通信故障，电机通信故障；A6板异常	A6板 异常
6	2021-5-16	9528639	仪表显示DC电源模块三级故障，故障代码30，A6板损坏	A6板
7	2021-09-03	9528709	DC-DC CAN通信故障	A6板
8	2021-10-10	9528709	上电报DC-DC三级故障，故障代码30（通信故障）	A4板
9	2021-12-02	9532254	上电报DC-DC三级故障，故障代码22(高温硬件报警)、27 (IGBT驱动故障)	A4板

可见在该期间共计发生故障9次，其中2020年发生故障4次，2021年发生故障5次，主要故障现象为系统报警，无法正常上电，分析其主要原因为变换器内部电路板出现故障导致，更换电路板后故障

消除。通过故障数据可以看出，DAB变换器运行比较平稳，故障率较低。

3. 对驱动系统的影响

从车辆驱动系统的整体运行情况来看，DAB变换器不仅提供了线网电压与车辆的电气隔离，还使得车辆端输入电源更加稳定，改善了无轨电车车辆上DAB变换器下游的高压电气组件的工作条件，从而使整个驱动系统运行得更加平稳。以北京公交传统结构的BJD-WG120FL与装有DAB变换器的BJD-WG120FN两种车型为例，2020—2021年两种车型车辆驱动系统及辅助高压电源组件故障情况见表3。

表3 驱动系统故障统计

车型	投入年份	车数	2020年故障辆次	2021年故障辆次	两年故障率
WG120FL	2017年	186	52	46	52.69
WG120FN	2017年	358	27	26	14.80

对比可见：基于DAB变换器的BJD-WG120FN型无轨电车，其驱动系统及辅助高压电源组件故障率约为传统结构的BJD-WG120FL型无轨电车的

1/4。相较于传统结构，在确保了自身具备较高稳定性的前提下，大幅降低了驱动系统故障，在应用上具有很强的技术优势。

结束语

基于隔离DC-DC变换器的新动力系统架构是无轨电车技术的最新发展，这些发展离不开锂电池技术、电动机技术以及电力电子技术的进步。这种结构将原先的分布式绝缘集中到了隔离DC-DC变换器上，既提高了整车安全性，又简化了下游所有高压部件设计，包括高压电池、驱动电动机、电动机控制器和其他辅助高压部件，这些部件可以完全和纯电客车通用。基于DAB拓扑结构的隔离DC-DC变换器相较于基于LLC和移相全桥拓扑的变换器，提供了更多的控制自由度，更容易实现宽电压范围工作及效率优化。北京市场的数年运营统计证明了该DAB变换器性能优异，安全可靠，预测未来会有更多的市场应用。EA

(收稿日期：2022-03-01)

