

储能式低地板车辆牵引变流器设计

李华¹, 忻力², 荣智林², 范荣辉¹, 夏晶¹, 陈玉其²

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 储能式低地板车辆因无需全程架设接触网而带来了极大的方便性及灵活性, 是当前该领域研究热点之一。为满足储能式低地板车辆的双供电制式自动切换及储能元件快速充电的要求, 文章设计了一种高集成的双供电制式牵引变流器, 介绍了其主电路设计、结构布局、主要技术参数计算等, 重点介绍了变流器模块、双向 DC/DC 电抗器、车顶安装门结构及变流器散热等关键技术设计。试验结果验证了牵引变流器能满足两种供电制式下的相关性能。

关键词: 低地板车辆; 牵引变流器; 储能元件

中图分类号: U264.3⁺7

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)03-0013-04

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.03.003

Design of Traction Converter for Energy Storage Low-floor Vehicle

LI Hua¹, XIN Li², RONG Zhilin², FAN Ronghui¹, XIA Jing¹, CHEN Yuqi²

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Energy storage low-floor vehicle is a convenient and flexible choice due to the sectional catenaries-free characteristics, and currently it is one of the research hotspots in this field. In order to meet automatic switch of dual-power-supply and fast energy storage element charging in energy storage low-floor vehicle, it designed a high integrated traction converter which can be supplied by both power grid and energy storage element, presented its main circuit, mechanical layout of components and calculation methods of main technical parameters, especially introduced its key technologies such as converter module, chopper reactor of DC/DC circuit, door structure and cooling method of roof installed converter. Test results verified the characteristics of the traction converter.

Keywords: low-floor vehicle; traction converter; energy storage element

0 引言

低地板车辆具有节能环保、乘坐舒适、整车及线路造价低等优点, 特别适用于中小城市的干线交通和大城市的支线交通^[1]。采用超级电容器或锂电池储能的低地板车辆, 无需全程架设空中接触网, 并能在乘客上下车的时间里快速充电, 大大减小了城市空间压力。随着储能元件大容量、快充电技术的逐渐成熟, 集成储能元件的储能式低地板车辆成为了当前该领域的研究热点之一^[2]。

为满足储能式低地板车辆的双供电制式自动切换及储能元件快速充电的要求, 本文提出一种高集成的牵引变流器。该牵引变流器包含两重为牵引电机供电的逆变

电路, 同时集成了双向 DC/DC 电路, 可实现储能元件能量的双向流动, 满足接触网供电和储能元件供电两种供电制式工作需要, 另外还自带电制动斩波电路及冷却系统等。

1 主电路设计

该牵引变流器集成化程度高, 其主电路如图 1 所示。其中变流器模块集成了支撑电容 C_d 、能馈桥臂 (V1, V2)、双向 DC/DC 桥臂 (V3, V4)、逆变桥臂 (V6~V8, V10~V12) 和斩波桥臂 (V5, V9)。每个桥臂为一个 IGBT 封装, 每个封装包含两只 IGBT 元件, 分别作为桥臂的上管和下管, 以下简称“双管 IGBT”。双向 DC/DC 桥臂与斩波电抗器 FL1~FL2 组成两路并联的双向 DC/DC 电路, 电制动斩波桥臂与外接的制动电阻组成电制动斩波电路, 充电短接接触器 KM1、KM2 和充电电阻 R1

收稿日期: 2017-02-14

作者简介: 李华 (1978-), 男, 高级工程师, 现从事变流技术研究及相关科研管理工作。

基金项目: 湖南省科技重大专项课题 (2014FJ001-2)

组成充电短接回路, 固定放电电阻 R_2 与支撑电容 C_d 组成中间直流回路。牵引变流器还包含传感器、传动控制单元等部件, 用来实时检测主电路各项参数, 实现过流保护、过/欠压保护、缺相保护等功能, 保证了牵引变流器的安全可靠运行。

该牵引变流器具有接触网供电和超级电容供电两种供电制式。站内由接触网供电, DC 750 V 经高压箱进入牵引变流器, 通过充电短接回路、线路电抗器 FL 及能馈桥臂上管并联的二极管进入中间直流回路, 再由逆变

桥臂输出三相交流电, 经隔离接触器 KM11、KM12 连至永磁电机 M1、M2, 实现车辆的牵引功能; 同时通过双向 DC/DC 电路降压斩波, 对储能元件进行限流充电。出站后由储能元件供电, 储能元件通过双向 DC/DC 电路升压斩波, 使中间直流电压稳定在 DC 750 V, 为牵引电机及外部充电机供电。电制动工况下, 电机制动能量首先通过双向 DC/DC 电路降压斩波, 给储能元件充电^[4], 储能元件充满后再开通能馈桥臂上管, 使能量反馈至接触网, 多余的能量则由制动电阻器消耗。

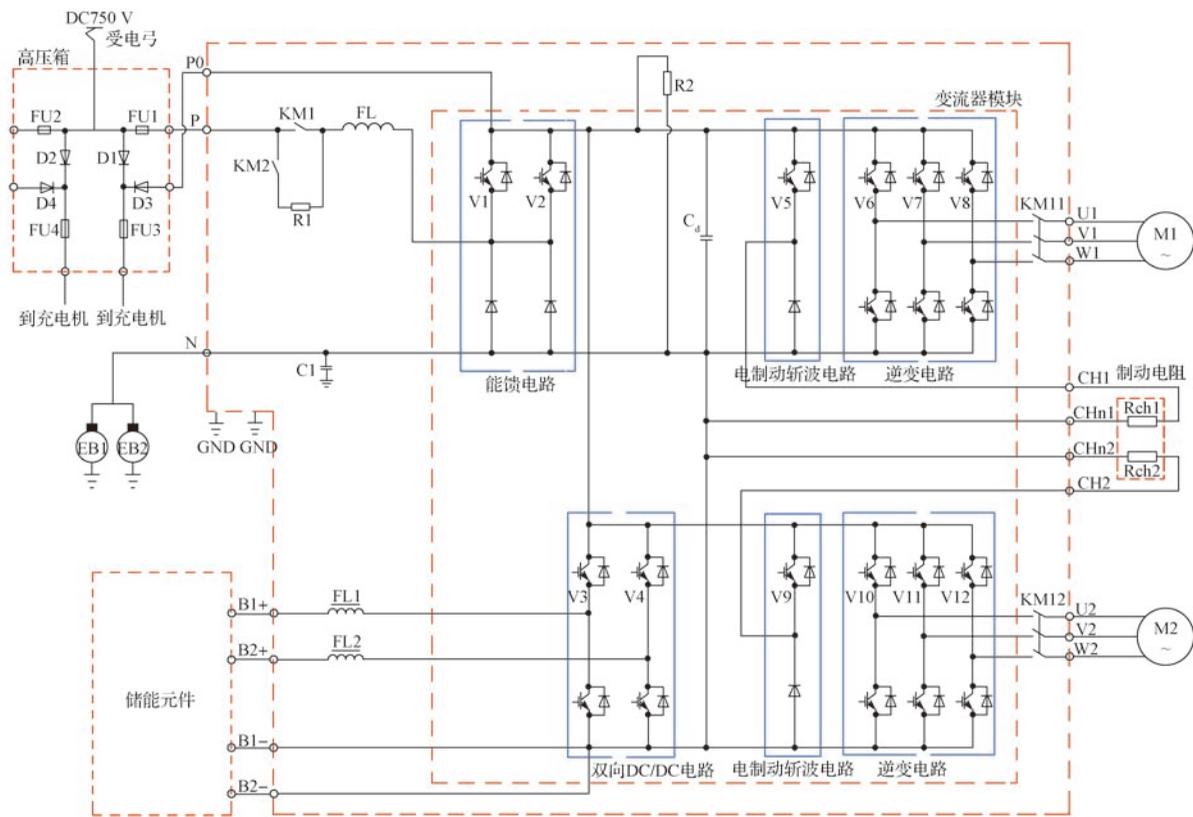


图 1 牵引变流器主电路

Fig. 1 Main circuit of the traction converter

2 主要技术参数计算

根据车辆牵引系统整体需求, 牵引电机额定功率为 120 kW, 储能元件容量为 150 kVA。通过对全线路仿真, 提出了牵引变流器主要技术参数, 如表 1 所示。

表 1 牵引变流器主要技术参数

Tab. 1 Main parameters of the traction converter

参数	数值
接触网输入电压 /V	DC 500~DC 900
逆变输出电压 /V	0~585 (三相)
逆变额定输出电流 /A	2×250 (基波有效值)
逆变最大输出电流 /A	2×450 (基波有效值)
制动最大电流 /A	2×450 (基波有效值)
储能元件电压 /V	DC 470~DC 540
DC/DC 电路额定电流 /A	2×300
DC/DC 电路最大电流 /A	2×600

其 DC/DC 电路额定电流按区间无接触网运行仿真

确定, 此时 DC/DC 电路升压斩波提供牵引及充电机能量, 持续输出功率最大; DC/DC 电路最大电流为储能元件快速充电最大电流, 按 30 s 内达到充满状态确定。

3 关键技术

为满足整车的双供电制式、车顶安装、减重及小体积等要求, 储能式低地板车牵引变流器进行了相应的关键技术攻关设计, 主要涉及高度集成变流器模块、双向 DC/DC 电抗器、车顶安装门结构及变流器散热等。

3.1 高度集成变流器模块设计

为减小牵引变流器体积和减轻重量, 牵引变流器模块 (图 2) 选用 1 700 V/1 200 A 规格双管 IGBT 元件并将 IGBT 元件全部集成在一块散热基板上, 用 1 个变流器模块实现两路牵引逆变、两路 DC/DC 升降压斩波、

两路电制动斩波及两路能量回馈的功能。同时该变流器模块还集成了支撑电容器、驱动板、脉冲分配板等,最大限度地提高了模块的集成度。变流器模块的外形尺寸为 $1\ 040\ \text{mm} \times 400\ \text{mm} \times 412.5\ \text{mm}$ ($L \times W \times H$), 重量为 $120\ \text{kg}$ 。

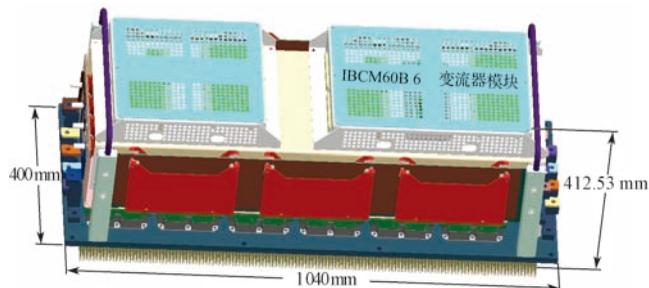


图2 高度集成的变流器模块

Fig. 2 High integrated power module for the traction converter

3.2 斩波电抗器设计

电抗器 FL1 和 FL2 是实现双向 DC/DC 电路升降压斩波必不可少的部件,对实现储能元件充放电具有重要作用。其设计除考虑基本的体积、重量指标要求外,还应综合考虑电感值、纹波电流及控制方式等。假设电路已工作在稳定状态,则电感电流的理想波形为三角波^[7],如图3所示。

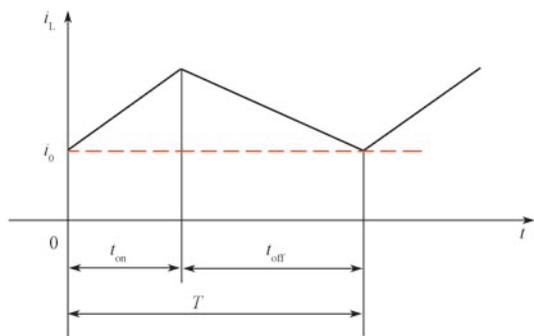


图3 斩波电抗器理想电流波形

Fig. 3 Ideal current waveform of chopper reactor

升压斩波时,定义斩波管在 0 时刻导通。设储能元件稳态电压为 U_1 , 升压斩波输出电压为 U_2 , 导通时间为 t_{on} , 由能量守恒定律可知:

$$U_2 = \frac{T}{T - t_{\text{on}}} U_1 \quad (1)$$

设电抗器初始电流为 i_0 , 斩波管导通期间电流为 i_{on} , 则

$$i_{\text{on}} - i_0 = \frac{1}{L} \int_0^{t_{\text{on}}} U_1 dt = \frac{1}{L} U_1 t_{\text{on}} \quad (2)$$

用电抗器的纹波系数 ρ 表示,有:

$$i_{\text{on}} - i_0 = 2 \times \rho \times I_L \quad (3)$$

式中: I_L ——电感上电流平均值。

其中纹波系数大小选取需遵循以下原则:

(1) 电感上电流不能断续;

(2) 电抗器能承受纹波电流引起的温升;

(3) 储能元件能承受纹波电流;

(4) 支撑电容器能承受电感纹波电流及逆变器带来的谐波电流。

将式(1)和式(3)代入式(2),可得

$$L = \frac{U_1 \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right) T}{2 \times \rho \times I_L} \quad (4)$$

当电感上电流加大时,铁心会趋于饱和,即电流增加时磁通量将不再增加,此时电感值会减小,因此电抗器选型时,除了额定电感值,也应规定电感值随电流变化的曲线,或最大电流时的电感值。根据经验,取 2 倍额定电流时电感值为额定电感值的 80%, 则本项目的斩波电感值为 $1.2\ \text{mH}$ 。

双向 DC/DC 电路一般采用电压/电流双反馈 PWM 控制,即保持开关周期 T 不变,通过比较电压电流反馈值与给定值来调节开关导通时间 t_{on} 。逆变器中包含两路双向 DC/DC 电路,其控制可分为同相控制和错相控制。同相控制为两组 IGBT 桥臂在同一时刻开通,其输出电流同相位;错相 180° 控制为两组 IGBT 桥臂导通时刻相差 $\frac{1}{2}$ 个周期,其输出电流错相。当电抗器 FL1 和 FL2 为共铁心电抗器时,由于两路电感值相互耦合,只能采用同相控制;当电抗器 FL1 和 FL2 为独立的电抗器时,采用错相控制能减小输出电压的波动,从而减小支撑电容的温升。因电抗器独立,本设计采用错相控制。

3.3 散热设计

牵引变流器中变流器模块、线路电抗器、斩波电抗器均为大功率器件,其散热性能直接影响器件的运行可靠性。低地板车辆牵引逆变器采用车顶安装,空间狭小,因此牵引变流器采用 T 型风道强迫风冷散热,如图4所示。其风道采用全密封式,冷却风先吹过变流器模块,再由离心风机吹向两侧的线路电抗器和斩波电抗器。由于线路电抗器损耗小于斩波电抗器的,且线路电抗器线圈间隙较大,易于冷却,通过缩小线路电抗器的进风口,以合理分配风道两侧风量、风压等。此外,变流器模块中 IGBT 元件采用对称式布局,以便于柜内布线及模块散热。通过仿真计算发现,双向 DC/DC 桥臂损耗最高,因此将其布置在散热基板的进风面正中间位置;2 路牵引逆变桥臂的损耗次之,布置在散热基板的两侧;能馈及制动桥臂的损耗最小,布置在散热基板的出风侧。采用上述设计,牵引变流器满功率运行约 1 h 后达到温度平衡,IGBT 元件安装散热板的台面温升控制在 $40\ \text{K}$ 以

内,电抗器的温升控制在 120 K 以内,满足实际应用需求。

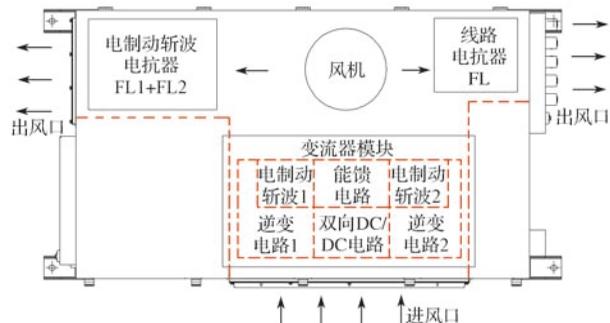


图 4 牵引变流器风道设计

Fig. 4 Design of air duct for the traction converter

3.4 双层门结构

该低地板车辆牵引变流器安装在车顶,其柜门设计对整柜的散热及维护有较大影响。该柜门采用双层结构,如图 5 所示,上层门为花纹铝板,具有防滑、可踩踏作用,在维护设备时允许直接踩踏;下层为 1.5 mm 厚钢板,满足柜体相关强度及密封设计要求,防护等级达到 IP55。柜门使用铰链和气动弹簧支撑,除了开关柜门的初始时刻需人力改变柜门的状态,后续的开关过程均由气动弹簧自动完成,速度均匀缓慢,方便牵引变流器维护。车顶设备受太阳直射,双层柜门中的空气层可有效降低持续高温辐射对牵引变流器的影响,同时当车辆运行时,双层门结构形成一个天然风道,也有利于牵引变流器的散热。

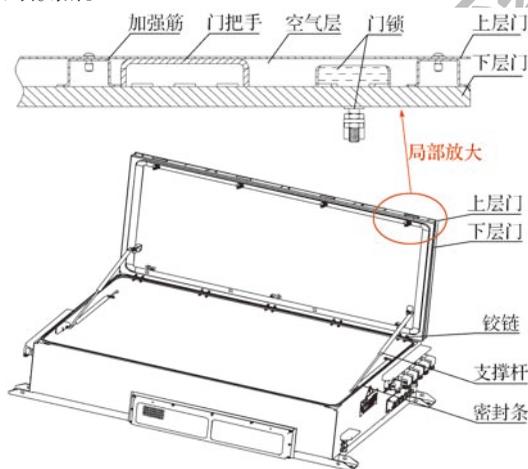


图 5 牵引变流器双层门结构

Fig. 5 Double-deck door structure of the traction converter

4 试验验证

为验证牵引变流器在两种供电制式下的相关性能,根据 GB/T 25622.1-2010《轨道交通 机车车辆用电力变流器第 1 部分:特性和试验方法》进行了针对性的试验。试验结果表明,牵引变流器的相关输出波形正常,各部件的温升符合设计要求。

4.1 接触网供电工作模式

由接触网提供 DC 750 V 电源,启动牵引变流器,

输出额定功率 2×120 kW,其逆变输出波形如图 6 所示。接触网供电时斩波电抗器及双向 DC/DC 不工作,各器件温升均较小,满足牵引变流器温升要求,其中温升最高的空心电抗器的温升为 40 K。

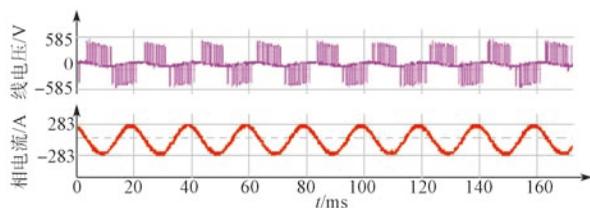


图 6 接触网供电时变流器输出波形

Fig. 6 Output waveforms of the traction converter supplied with power grid

4.2 储能元件供电工作模式

由储能元件供电,采用独立铁心电抗器错相控制,启动 DC/DC 电路升压斩波及牵引变流器,输出功率 2×120 kW,直至各器件温度趋于稳定。储能元件输出电流波形如图 7 所示,呈三角波,电流有效值为 300 A,纹波系数为 27%。储能元件升压斩波后中间电压波形如图 8 所示,其波动不超过 2%。变流器输出电压电流波形与接触网供电时一致。牵引变流器各部件的温升均满足要求,斩波电抗器中线圈温升最高,其稳态温升为 109 K;铁心温升 60 K;变流器模块中逆变桥臂温升为 15 K;DC/DC 桥臂温升较高,为 25 K。

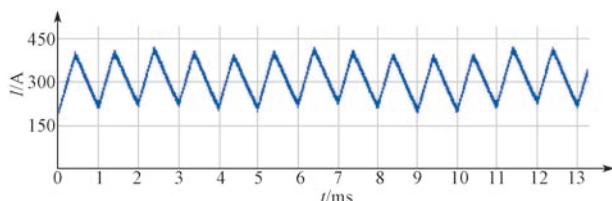


图 7 储能元件输出电流波形

Fig. 7 Output waveform of energy store element

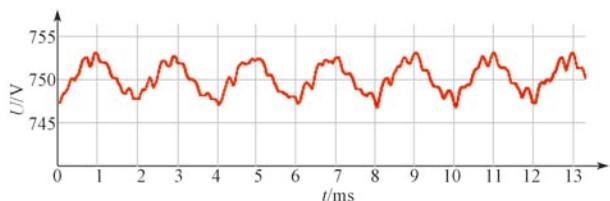


图 8 储能元件升压斩波后中间电压波形

Fig. 8 DC-link voltage waveform as in the boost chopper mode

5 结语

本文所介绍的低地板车辆用牵引变流器兼容了接触网供电及储能元件供电两种供电模式,可省却站间接触网,并能吸收利用制动时的能量,节约了低地板车辆的运行成本;同时,该牵引变流器在设计过程中充分考虑了可利用空间小及应用在露天环境的影响,柜体高度集成化且防护等级达到 IP55,满足储能式低地板车辆正常运行及车顶安装的要求。(下转第 49 页)