

HXN6 型大功率混合动力内燃机车牵引变流器

邹白苏^{1,2}, 刘永江¹, 何良¹, 范荣辉¹

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 湖南 株洲 412001)

摘要: 重点阐述了 HXN6 型大功率混合动力内燃机车牵引变流器的研制背景以及主电路、工作原理、性能参数和技术特点, 并对该牵引变流器的关键器件、冷却系统进行选型设计。地面试验和装车考核证明, 该牵引变流器完全能够满足整车的性能要求。

关键词: 牵引变流器; 动力蓄电池; 混合动力; HXN6 型内燃机车

中图分类号: U267.1; U262; U264.3⁺7

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.007

Traction Converter of HXN6 Hybrid Power Diesel Locomotive

ZOU Baisu^{1,2}, LIU Yongjiang¹, HE Liang¹, FAN Ronghui¹

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

2. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The development background of HXN6 high power hybrid diesel locomotive traction converter was introduced, as well as the main circuit, working principle, performance parameters and technical features, and design and selection of traction converter key components and cooling system was provided. Ground test and loading test showed that the traction converter could fully meet the performance requirements of the vehicle.

Keywords: traction converter; power storage battery; hybrid power; HXN6 hybrid diesel locomotive

0 引言

自上个世纪 90 年代以来, 随着能源的日益枯竭以及环境恶化给人类带来的严重影响, 能源危机和环境保护已经成为全球面临的重大挑战, 作为轨道交通领域的能源大户——内燃机车, 其节能减排已经势在必行。众所周知, 电力机车使用的是纯电力清洁能源, 具备优秀的节能减排性能, 但是受作业性质所限, 部分区域仍然保留一定数量的内燃机车, 而混合动力牵引技术, 作为传统内燃机车与电力机车之间的一种过渡技术形态, 能够在现有技术基础上大幅度提高燃油经济性并减少排放, 是实现节能减排的重要举措之一。

为此, 中国铁路总公司通过与国内主机厂进行混

合动力内燃机车的自主研发合作, 来推动轨道交通内燃机车领域节能减排的技术研究, 其中作为混合动力机车电传动核心部件——牵引变流器, 由株洲中车时代电气股份有限公司承担研发与设计。

1 牵引变流器主电路结构及主要技术参数

HXN6 型大功率混合动力内燃机车电传动系统包括主发电机、动力蓄电池、牵引变流器、牵引电机。整台机车配备 1 台牵引变流器, 该牵引变流器采用主辅一体化设计, 由其向 2 个转向架的 6 台牵引电机以及辅助负载供电。

1.1 主电路结构

牵引变流器主电路由 1 组三相二极管整流器 + 中间直流环节 + 6 组 VVVF 牵引逆变器 + 1 组 CVCF 辅助逆变器组成 (如图 1), 采用轴控方式, 各轴控制相对独立,

可以单轴控制各轴输出功率, 当 1 台牵引电机或 1 组逆变器出现故障时, 可通过传动控制单元对相应故障轴进行隔离, 机车仅损失 1/6 动力, 其余牵引电机以及逆变器仍然可以正常工作, 提高了机车的运行冗余度。

现以单台牵引电机的驱动为例来说明牵引变流器的工作原理: 柴油发电机组输出的三相交流电, 首先通过三相交流接触器 K1, 由三相二极管整流器将其整流为直流, 通过中间直流环节支撑电容器的滤波, 可得到平缓的 DC 1 600 V 电压, 再经过逆变器逆变为幅值、频率变化的三相交流电供给牵引电机, 并通过变频变压来控制电机转速, 从而控制机车运行状态; 另外的一个辅助逆变模块, 将直流电逆变为频率和电压

都固定的三相交流电, 经过三相隔离变压器和三相滤波电容器降压滤波后给机车上的辅助负载供电; 机车电制动或自负荷时, 机车的动能或柴油机的输出转化为电能输入至牵引变流器中间直流环节, 相应逆变器的斩波支路开通, 由动力蓄电池将该能量吸收, 或者由制动电阻 BR1、BR2 消耗。

牵引变流器中间直流环节设置有固定放电电阻, 用于快速放电路失效后, 将支撑电容器上的电压降低至安全电压以下; 同时在中间直流环节设置的固定放电电阻也可作为直流分压电阻, 其中点接地, 用于主电路接地检测; 逆变器半导体功率器件采用大功率高压 IGBT 元件, 通过水冷却方式为器件进行有效散热。

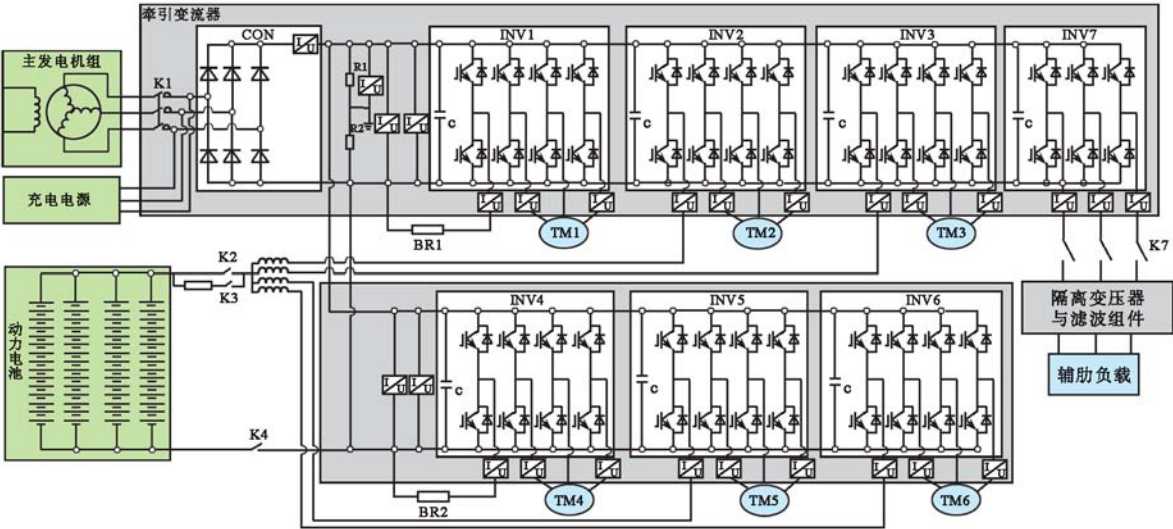


图 1 HXN6 机车主电路原理图

1.2 主要技术参数

HXN6 机车牵引变流器主要技术参数如下:

三相不可控整流器

额定输入电压	三相 AC 1 248 V
最大输入电压	三相 AC 1 326 V
额定输入电流	三相 AC 693 A
整流器效率	99 %

中间直流环节

标称电压	DC 1 600 V
------	------------

VVVF 牵引逆变器 (单组)

标称输入电压	DC 1 600 V
输出电压	三相 AC 0~1 248 V
额定输出电流	AC 478 A
最大输出电流	AC 545 A

CVCF 辅助逆变器 (单组)

标称输入电压	DC 1 600 V
输出电压	三相 AC 720 V
额定输出电流	AC 240 A

2 牵引变流器关键器件选型

2.1 二极管整流器

三相二极管整流器电路结构通常为三相不可控整

流电路, 其电路结构简单, 应用可靠性高, 在内燃机车领域, 经常应用于发电机输出端, 对发电机输出三相交流电进行整流。

三相二极管整流器主要由二极管和 RC 过电压吸收组件组成, 如图 2 所示, 采用模块化和简化设计, 使得 6 个整流二极管与 RC 过压吸收组件都集成安装在水冷板上构成模块式结构, 便于产品的安装与维护, 同时整流器模块采用水冷散热, 提高了器件的散热效果。其中关键元件二极管选型如下:

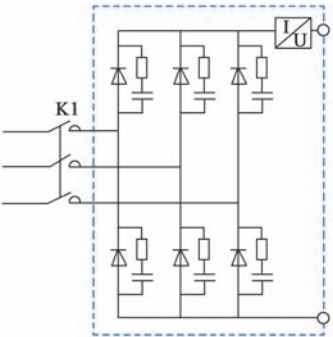


图 2 二极管整流器电路示意图

整流器额定输入电压 U_n 为

$$U_n = U_d / K_u \tag{1}$$

式中: K_u 为三相桥式整流电路考虑换相重叠损失后的电压换算系数; U_d 为中间直流环节标称电压。

可推导出整流器额定输入电流 I_n 为

$$I_n = P_n / (U_n \times \sqrt{3}) \tag{2}$$

式中: P_n 为额定输入容量。

结合式 (2) 可推导出中间直流环节额定电流 I_d 为

$$I_d = I_n / K_i \quad (3)$$

式中: K_i 为三相桥式整流电路考虑换相重叠损失后的电流换算系数。

结合式 (3) 可得知整流器每个桥臂的电流有效值为

$$I = I_d / \sqrt{3} \quad (4)$$

可通过式 (4) 得知整流器每个二极管的平均电流:

$$I_{av} = I \times 2/\pi \quad (5)$$

结合式 (1) 得知整流器每个二极管的最大反向电压为

$$U_{max} = \sqrt{2} U_n \quad (6)$$

根据实际需求以及相关技术参数, 结合式 (1) ~ 式 (6), 计算得出二极管平均通过电流以及最大反向电压。通常在实际工程设计时, 二极管的最大反向电压选取 2 倍值, 以留有足够裕量, 满足模块的需求, 同时兼顾后续的平台开发。

2.2 IGBT 器件

IGBT 器件作为变流器模块的核心部分, 其运行是否可靠直接影响了牵引变流器的可靠性, 因此 IGBT 器件的选型应当按照最恶劣的工况进行选型。

器件电压定额为

$$U_m = (K_1 \times U_{dmax} + U_{sp}) \times K_2 \quad (7)$$

式中: K_1 为过电压系统; K_2 为安全系统; U_{dmax} 为额定直流电压最大值; U_{sp} 为关断即将结束时的尖峰电压。

器件电流定额为

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_o \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \quad (8)$$

式中: α_1 为电流尖峰系数; α_2 为温度降额系数; α_3 为过载系数。

根据现场使用以及参照样本, 可确定 IGBT 选型器件。同时在实际工程设计时, 考虑 IGBT 在开通和关断过程中其 di/dt 很大, 根据 $\Delta u = L_s(di/dt)$, 若线路杂散电感过大会产生较大的尖峰电压, 对 IGBT 极为不利, 因此为减少杂散电感, IGBT 元件与主电路的连接采用低感母排。

2.3 支撑电容器

支撑电容器的电容值计算主要考虑负载的无功、提供瞬态电流和直流电路的滤波, 可根据式 (9) 进行估算, 最后根据实际工况采用 Matlab 主电路仿真对电容值进行修正:

$$C_d = \frac{K \cdot P}{\omega \cdot U_d^2} \quad (9)$$

式中: K 为经验系数; ω 为频率系数。

3 牵引变流器功能单元

3.1 总体布局

HXN6 型大功率混合动力内燃机车牵引变流器采用

模块化结构布局, 变流器模块对称分布在柜体两边, 整流模块和辅助逆变模块放置在中间, DCU 布置在辅助逆变模块腔体的上方。整个布局中, 两边布置逆变模块, 可方便集中从中间整流模块取得整流后的直流电, 简化中间直流母排的设计, 同时, 对外输出端子全部放置在柜体后边, 减少柜内电缆走线, 相当于减少了一部分热源, 有利于优化柜内温升。牵引变流器外形尺寸为 3 100 mm × 600 mm × 2 000 mm (长 × 宽 × 高), 质量约为 1 700 kg。

3.2 变流器模块

变流器模块 (外观如图 3) 采用 IBXM 系列变流器模块, 为通用化标准模块, 每个模块集成了 8 个 IGBT 元件, 作为三相逆变器的三相桥臂及斩波相桥臂。该模块还包括散热器、温度传感器、门控单元、门控电源、脉冲分配单元、支撑电容器、低感母排等部件。变流器模块作为一个整体部件, 可方便进行拆卸与安装, 通过拆卸模块上下两端的固定螺栓、模块右边的控制插头和输出电缆以及柜体后面的水管插头, 整个模块即可移出进行维修或者更换, 易于售后维护。

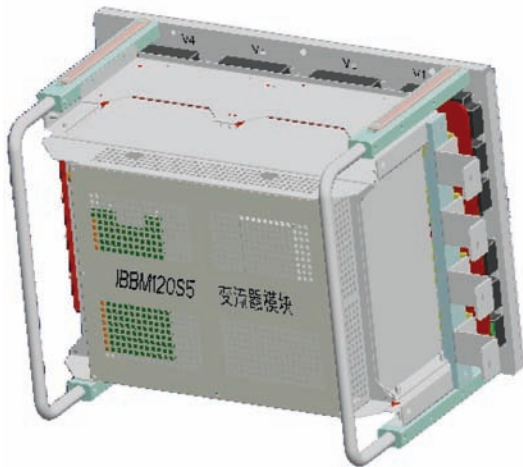


图3 变流器模块外观图

4 牵引变流器热仿真和结构仿真

4.1 热仿真

根据系统需求明确环境条件, 对牵引变流器模块损耗进行仿真计算 (一般 IGBT 生产厂家都会提供相应仿真软件), 以及对其他部件的损耗估算, 如固定放电电阻等, 加上变流器模块总损耗, 即可得出牵引变流器的总损耗。根据牵引变流器的损耗设计合适的散热方式, HXN6 型大功率混合动力内燃机车牵引变流器采用强迫水循环冷却。IGBT 器件直接安装在水冷板上, 通过对 IGBT 器件温升进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。

通过图 4 仿真结果可知, IGBT 器件在环境温度为 45℃ 时, 最高结温为 88.9℃。根据目前 IGBT 器件工程应用经验, 最高结温一般控制在 125℃ 以下, 因此满足要求。

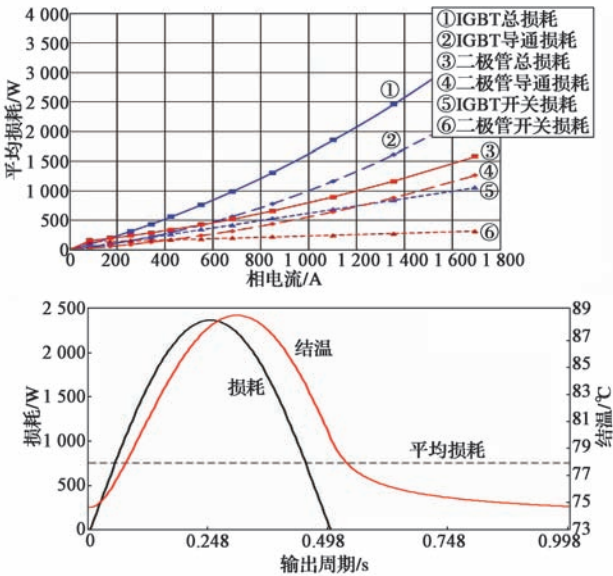


图 4 IGBT 热仿真结果

4.2 结构仿真

牵引变流器柜体材料采用 0Cr18Ni9, 屈服强度 205 MPa。由钣金件焊接和螺栓紧固而成, 柜体的结构强度对内部电气设备的影响及行车安全至关重要, 因此需建立牵引变流器有限元结构仿真模型 (如图 5 所示)。

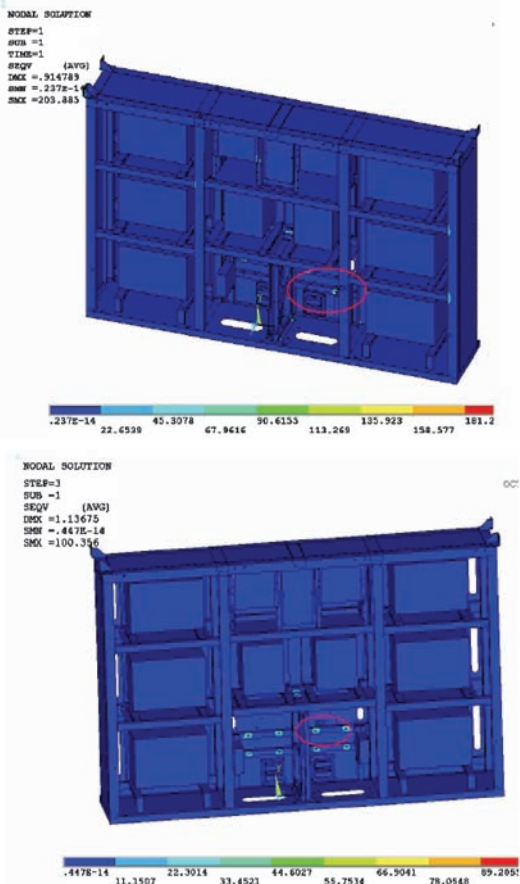


图 5 结构强度仿真

通过结构强度仿真分析可以得出: 纵向 3g, 横向 1g, 垂向 3g (包括重力) 时柜体局部最大应力为 203.8 MPa; 随机振动时柜体局部最大应力为 100.3 MPa, 没

有超过材料的屈服极限。由以上结构仿真可以得出: 牵引变流器结构强度可满足实际运用需求。

5 牵引变流器技术特点

5.1 油电混合工况设计

在铁路运输行业, 内燃机车作为调车机车使用有着不可替代的优势。但是在调车机车作业时, 机车往往需要较大的启动加速度, 便于通过道岔及半径较小的曲线, 启动牵引力较大, 且最大运行速度较低, 因此机车在作业时会有频繁制动减速、起步停车的操作。传统内燃机车因为没有能量回收功能, 只能将牵引电机在电制动工况时产生的能量消耗在制动电阻上, 使得机车燃油效率较低, 而 HXN6 型机车采用混合动力模式, 且牵引变流器针对油电混合工况进行了优化设计, 较好地处理了能量回收问题, 具备节能减排效果, 大大提升了机车燃油效率。

下面结合牵引变流器关联图图 6 来说明牵引变流器油电混合工况设计的特点。

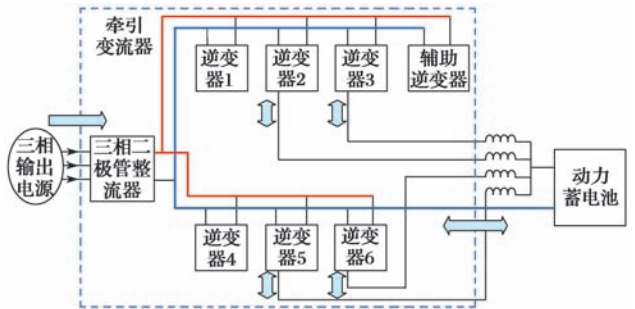


图 6 牵引变流器关联图

如图 6, 当机车在电制动工况时, 牵引变流器通过控制逆变器 2、3 和逆变器 5、6 的斩波支路, 经过斩波电抗器后, 对动力蓄电池进行充电, 将机车动能转化为电能储存在动力蓄电池; 当机车在牵引工况时, 动力蓄电池通过将电能输入到牵引变流器中间直流环节经 VVVF 牵引逆变器给牵引电机提供能量, 达到节能减排的目的。通过控制 IGBT 器件的开通, 以及结合斩波电抗器, 使得动力蓄电池的充电电流更趋稳定, 可有效延长动力蓄电池使用寿命。

牵引变流器油电混合工况设计的技术特点, 使得混合动力机车在频繁制动减速或频繁地起步停车的工况下, 相比传统内燃机车具备更加显著的节能效果。

5.2 平台化设计

HXN6 型机车牵引变流器采用模块化布局, 统一的柜体结构以及电气、机械安装接口, 可根据功能需求将模块进行整体变化或者局部变换, 具备高度的兼容性以及易维护性, 具体表现在:

①不同车型的通用性。通过变换牵引变流器内部器件的布置, 即可满足不同型号机车的使用; 通过拆除中间直流连接母排, 辅助逆变模块更换为三相不可控整流模块, 在原 DCU 旁边的预留空间增加一个

DCU, 该型牵引变流器即可变为两转向架独立控制的主电路模式, 可满足传统六轴内燃机车的装车使用, 如 SDA1 型内燃机车使用的 TGA18 型牵引变流器。

②变流器模块简化。采用 HXn1 型电力机车牵引变流器平台的同一系列型号的变流器模块, 其机械安装接口与电气接口完全一样, 方便模块整体拆卸与更换, 易于售后维护。

5.3 主辅一体化设计

传统内燃机车的辅助供电一般由辅助发电机提供, 只有当柴油机启动时, 辅助设备才能正常运行。当机车停车时, 一般只有司机室空调、冷却风扇等必须工作的辅助设备需要开启, 辅助设备的功率一般都较低, 此时如果使用柴油机进行供电, 其燃油效率很低, 不利于降低空气污染和噪声污染。

HXn6 型机车牵引变流器采用主辅一体化设计, 将传统内燃机车辅助负载的供电模式由辅助发电机供电转变为由辅助逆变器供电, 节省了传动齿轮箱、辅助发电机等对应设备, 节省了空间, 简化了主电路, 同时, 在无牵引作业时 (例如停车时), 可通过动力蓄电池给牵引变流器的中间直流环节进行供电来启动辅助逆变器, 从而减少柴油机的使用, 既降低燃油消耗量, 又降低环境污染。

6 试验验证

在地面交流传动试验平台上, 对该牵引变流器进行了型式试验、系统组合试验等一系列试验。

进行牵引变流器温升试验时, 在整流输入端输入三相 AC 1 248 V, 逆变输出额定电流为 (478 ± 10) A (如图 7), 辅助逆变器额定输出电流为 (240 ± 10) A (如图 8), 变流器在额定工况下运行 (约 2.5 h),

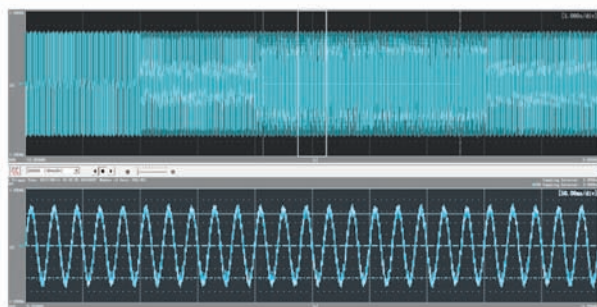


图 7 额定工况下电机电流 (RMS: 485.1 A)

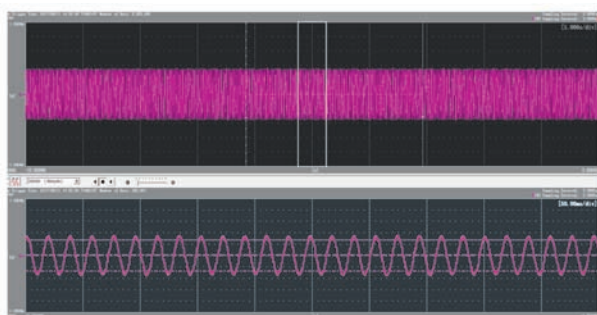


图 8 额定工况下辅变输出电流 (RMS: 235.7 A)

变流器温升不超过 30 K, 满足设计要求; 在逆变短时输出最大电流 545 A (如图 9) 时, 变流器完成正常换相。经过试验验证, 该型号牵引变流器电气性能输出均满足技术指标。

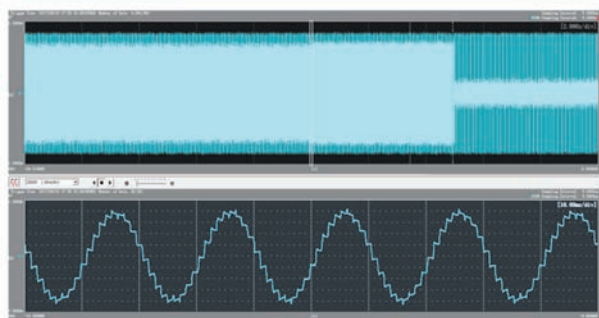


图 9 短时工况下电机电流 (RMS: 548.9 A)

目前, HXn6 型机车 001 号车牵引变流器已经完成装车调试, 在加格达奇极寒条件下 (-40°C), 机车一次性成功启动柴油机, 牵引变流器输出正常, 顺利完成低温性能考核; 在重庆高温条件下 (环境温度 40°C), 机车满功率自负荷运行 1 h, 牵引变流器输出正常, 顺利通过高温性能考核试验。通过整车线路试验考核证明, HXn6 型大功率混合动力内燃机车牵引变流器在各种工况下均能稳定可靠运行, 完全满足整车实际运行要求。

7 结语

HXn6 型大功率混合动力内燃机车牵引变流器已顺利通过装车调试以及现场运用考核, 牵引变流器性能发挥稳定, 各项性能指标满足整车技术要求, 为大功率混合动力机车牵引变流器平台化打下了良好的基础。在当今时代, 混合动力内燃机车是“低碳、环保”理念的实施者, 随着蓄电池技术的发展, 相信混合动力将会是今后轨道交通牵引动力的发展趋势。

参考文献:

- [1] 折力. 兆瓦级 IGBT 牵引逆变器的开发[J]. 机车电传动, 2000(5): 4-5.
- [2] 丁荣军, 黄济荣. 现代变流器技术与电气传动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 饶沛南, 柴多, 张义. 基于混合动力型内燃机车主变流器的研制[J]. 机车电传动, 2012(6): 1-4.
- [4] 张义, 饶沛南, 陈燕平. TGA18 型内燃机车水冷主变流器的研制[J]. 机车电传动, 2012(5): 21-24.
- [5] 肖功彬, 张东方, 陈华国. SDA1 型交流传动内燃机车电气牵引系统及技术新点[J]. 机车电传动, 2013(1): 27-30.

作者简介: 邹白苏 (1988-), 男, 现从事牵引变流器总体设计及系统方面的研究工作。