

HXD1 交流机车牵引变流柜总体技术

林溪远

国能朔黄铁路发展有限责任公司机辆分公司 062350

【摘要】在铁路运输中,伴随经济发展的高歌猛进以及大众对出行快捷性与货物运载量的需求水涨船高,铁路牵引技术也在持续迭代升级。HXD1交流机车作为我国铁路货运阵营里的中坚力量,其性能表现直接左右着铁路运输的效率高低与运行稳定性。牵引变流柜堪称HXD1交流机车的灵魂组件,肩负着将接触网输入的电能,精准转化为牵引电机可利用电能的重任。这一电能转换过程,对机车的牵引效能、调速精准度以及运行可靠性,都有着一锤定音的影响。在这样的形势下,深度钻研HXD1交流机车牵引变流柜的总体技术,积极探寻优化策略与创新路径,不仅能全方位提升机车的综合性能,满足高效运输的迫切需求,更能为我国铁路牵引技术的长远发展添砖加瓦,助力铁路运输行业朝着更高目标奋勇前行。

【关键词】HXD1交流机车;牵引变流柜;总体技术

Overall technology of traction transformer cabinet for HXD 1 AC locomotive

Lin Xiyuan

Guoneng Shuohuang Railway Development Co., LTD 062350

【Abstract】In the railway transportation, with the rapid development of the economy and the public demand for travel speed and cargo carrying capacity, the railway traction technology is also continuing to upgrade.As the backbone of China's railway freight camp, HXD 1 communication locomotive, its performance directly affects the efficiency and operation stability of railway transportation.The traction converter cabinet can be called the soul component of HXD 1 AC locomotive, which shoulders the responsibility of accurately converting the electric energy input from the catenary into the available electric energy of the traction motor.This electric energy conversion process has a final impact on the traction efficiency, speed regulation accuracy and operation reliability of the locomotive.In such a situation, the depth of study HXD 1 communication locomotive traction converter ark overall technology, actively explore optimization strategy and innovation path, not only can improve the comprehensive performance of locomotive, meet the urgent needs of efficient transportation, more for the long-term development of railway traction technology, power railway transportation industry toward a higher goal.

【Key words】HXD 1 AC locomotive; traction transformer cabinet; overall technology

引言:

在当代铁路运输体系里,高效可靠的牵引动力是运输效能的核心。HXD1HXD1 交流机车作为我国铁路货运关键装备,凭借强大牵引能力和稳定运行,在重载运输中作用重大。其核心电气组件牵引变流柜,技术水平直接决定机车整体性能。牵引变流柜负责将接触网交流电转化为可调节的三相交流电,为牵引电机供电。这一过程涉及电力电子变换、控制策略、散热设计等技术要点。随着铁路向高速、重载发展,对其性能提出更高要求,如功率密度、可靠性、电磁兼容性等。深入解析 HXD1HXD1HXD1 交流机车牵引变流柜技术,对提升机车牵引效能、优化能源利用、增强可靠性及推动铁路牵引技术发展意义重大。

一、HXD1 交流机车牵引变流柜概述

(一) 关联关系

网络控制系统借助 MVB 总线,与牵引变流器进行数据交互与信息通讯。来自弓网的单相交流电,经由变压器进行电压转换后,输入至牵引变流器。牵引变流器则通过四象限整流技术与逆变技术,输出三相交流电,为牵引电机提供稳定的电力供应。辅逆系统所输出的三相交流电,在经过辅助变压器的处理后,为列车上的各类辅助设备提供电能支持。

(二) 使用环境条件

HXD1 交流机车牵引变流柜适用的海拔条件为小于等于 5100 米,在此高度范围内,设备能够保持稳定运行状态。在湿度方面,其可适应的月平均最大相对湿度情况为:最大相对湿度可达 95%。关于温度条件,该设备所处的环境温度范围为-40℃至+40℃,在此环境温度区间内,设备能够正常工作并维持其性能稳定^[1]。而其自身的工作温度范围则更为宽泛,从-40℃至+55℃,这意味着在该温度跨度内,设备均

能有效执行各项工作任务,展现出良好的温度适应性。此外,在冲击和振动方面,该设备应具备足够的稳定性和可靠性,能够承受 GB/T21563-2018 中 1 类 A 级所规定的振动和冲击要求。这一标准确保了设备在各种复杂工况下,例如在运输过程中可能遭遇的颠簸,以及在运行现场可能面临的机械振动等情况下,依然能够保持完好无损,正常发挥其功能。

(三) 总体参数

HXD1 交流机车牵引变流柜的重量为 $3200\text{kg} \pm 3\%\text{kg}$ (含冷却液),其尺寸规格为 $3750\text{mm} \times 1060\text{mm} \times 2000\text{mm}$ (长 \times 宽 \times 高)。主变流器机组的冷却方式采用强迫水循环冷却与风冷相结合的模式。水和添加剂在冷却液中的体积比为 44%/56% (水/AntifrogenN),入水口温度要求小于等于 $+55^\circ\text{C}$ 。在电气参数方面,其额定输入电压为 $4 \times \text{AC}970\text{V}$,额定输入电流为 $4 \times 1473\text{A}$,额定输入频率为 50Hz 。设备中间电压为 $\text{DC}1800\text{V}$,额定输出电压为 $3\text{AC}0 \sim 1404\text{V}$,额定输出电流为 $3 \times 598\text{A}$,最大输出电流可达 $3 \times 814\text{A}$ 。主变流器在额定功率下的效率大于等于 97.5% 。控制电压为 $\text{DC}110\text{V}$,允许波动范围在 $-30\% \sim +25\%$ 之间。辅助逆变器输出电压为 $3\text{AC}440\text{V}/60\text{Hz}$ 。

(四) 工作原理

牵引变压器绕组输入电压,经充电回路对支撑电容充电,完成后闭合。牵引工况时,单相工频电压经四象限整流器整流为 1800V 直流,再经逆变器逆变,以三相电压供牵引电机。辅助变流器与中间直流回路并联,经辅助变压器输出 $\text{AC}440\text{V}$,为牵引风机等辅助设备供电。

再生制动时,牵引电机三相电压经主逆变模块整流、四象限模块逆变,通过牵引变压器、受电弓反馈回电网^[2]。电抗器组成的二次谐振回路,滤除四象限整流器输出的二次谐波电流。过压斩波电阻抑制直流过压、停机后快速放电。固定放电电阻,在快速放电回路故障时放电电压至安全值。检测变流器四象限输入电流、逆变输出电流、斩波电流、直流回路电压。辅变模块从中间回路取电,经变压器输出 $3\text{AC}440\text{V}$ 供辅助设备。检测辅变输出电流及辅变输出电压。

二、HXD1 交流机车牵引变流柜结构布局

(一) 传动控制单元 TCU

传动控制单元 TCU 是牵引变流柜的核心控制要件之一,在变流系统中负责精准把控牵引电机运行。TCU 通过高效链路接收机车控制系统的速度、牵引力等指令信号,据此协调调度、精准管控变流柜内其他模块。其配备先进微处理器与复杂算法,能快速处理大量数据,依据实时工况灵活调整控制策略。比如机车启动加速时,TCU 依司机加速指令,调控变流器输出合适电压和电流,确保机车平稳快速启动。此外,TCU 集成了强大的故障诊断与保护功能,一旦监测到过流、过热等异常,能迅速触发保护机制,避免设备损坏。

(二) 辅助逆变模块

辅助逆变模块在牵引变流柜中扮演着至关重要的角色,承担着为机车上各类辅助设备供应电力的关键任务。能够将中间直流回路中的直流电高效地转换为三相交流电,以此来满足诸如牵引风机、压缩机、充电机等辅助设备所需的用电需求。辅助逆变模块一般会采用先进的电力电子器件,并运用创新的逆变技术,进而可以输出稳定可靠的电压和频率。在 HXD1 交流机车上,该辅助逆变模块拥有多种不同的工作模式,这些模式可以根据辅助设备的实际用电情况进行灵活且便捷的切换。并且,辅助逆变模块还拥有出色的电磁兼容性,能够有效地降低对机车其他设备产生的电磁干扰,确保整个机车系统的稳定运行。

(三) 热交换风机

热交换风机对牵引变流柜稳定运行至关重要。变流柜运行时,四象限整流与逆变器模块等产热多,若散热不及时,会使设备温度过高,影响性能与寿命。热交换风机通过强制通风,将冷空气引入变流柜,与发热部件热交换,带走热量,维持柜内温度在正常工作范围^[3]。主要采用高效设计,风量强大、风压较高,能快速排热。热交换风机的运行受智能控制,依据温度传感器反馈的信号自动调节转速。温度低时,转速降低以节能降噪;温度升高,转速提高,增强散热效果。

(四) 四象限整流模块

四象限整流模块在电能转换过程中占据着举足轻重的地位,是实现高效电能转换的核心组件之一。其主要职责是将来自接触网的单相交流电转化为直流电。在此过程中,还承担着调节电网侧功率因数、抑制电流谐波这两项关键任务。四象限整流模块运用先进的 PWM 整流技术,通过精确操控电力电子器件的导通与关断状态,巧妙地让输入电流紧密跟随输入电压的波动而变化,进而达成功率因数近乎为 1 的理想效果。如此一来,电能利用效率得以显著提升,同时极大程度减少了对电网的谐波污染。在 HXD1 交流机车上,四象限整流模块展现出高度的灵活性,能够依据机车的不同运行工况,像牵引、制动等,智能调整整流模式。这一特性保证了其能持续为后续的逆变器模块提供稳定可靠的直流电压。

以再生制动工况为例,此时四象限整流模块能够高效地把牵引电机回馈的电能转化为直流电,然后顺利反馈回电网,实现能量的循环利用。

(五) 逆变器模块

逆变器模块负责将四象限整流模块输出的直流电转化为频率和电压可调的三相交流电,为牵引电机提供适配电能,实现对其转速和转矩的精准控制。该模块采用先进的 IGBT 等电力电子器件,结合高性能控制算法,实现快速精准的电能转换^[4]。在机车运行时,主要依据 TCU 指令实时调整输出电压和频率,满足牵引电机在不同工况下的需求。如高速运行时输出高频率交流电使牵引电机达到相应转速,低

速爬坡时输出大转矩保证机车有足够牵引力。此外,逆变器模块具备过流、短路等完备的保护功能,确保自身和牵引电机安全运行。

(六) 高压连接端子

高压连接端子是牵引变流柜与外部高压电路连接的关键接口。其负责将接触网高压交流电引入变流柜,再把变流柜输出的高压电传至牵引电机、辅助变压器等设备。该端子需兼具出色的电气与机械性能,能承受高电压、大电流冲击,保障连接可靠稳定。HXD1 交流机车上的高压连接端子采用特殊设计与制造工艺,有较高绝缘和抗振性能,以适应机车运行中的振动与恶劣环境。此外,其安装、维护简便,便于检修时快速拆卸与更换。

三、HXD1 交流机车牵引变流柜控制策略

(一) 网侧变流器控制策略

1. 功率因数校正

网侧变流器控制的核心任务,首先便是达成功率因数校正。借助先进的控制算法,能够让网侧电流精准地追随网侧电压的相位变化,最终促使功率因数无限趋近于 1。这一举措不仅显著提升了电能的利用效率,极大程度减少了无功功率的传输,有效降低了电网所承受的负担,还能够规避因功率因数偏低而引发的诸如罚款等一系列问题。以基于瞬时无功功率理论的控制方式为例,该方法可以迅速且精准地算出网侧电流的有功分量与无功分量,进而通过调控网侧变流器的开关器件,实时对电流的幅值和相位进行调整,最终成功实现功率因数的校正。

2. 电流谐波抑制

当网侧变流器执行将单相交流电转换为直流电的任务时,不可避免地会产生一定量的电流谐波。这些谐波一旦进入电网,便会对电网造成污染,干扰其他设备的正常运行秩序。鉴于此,在制定网侧变流器控制策略时,电流谐波抑制成为必须重点考量的关键要素。为有效解决这一问题,业界通常会采用适宜的滤波器以及先进的控制算法。其中,多电平 PWM 技术和谐波注入法颇为典型。多电平 PWM 技术的工作原理在于,通过增加逆变器输出电压的电平数量,巧妙地优化输出电流的波形,使其更加趋近于标准的正弦波形

态,从而显著降低谐波含量。而谐波注入法的思路则别具一格,是向网侧电流中精准注入特定频率和幅值的谐波电流,利用这些注入的谐波电流与变流器自身产生的谐波电流相互抵消,进而实现抑制谐波的目标。

(二) 牵引变流器控制策略

1. 矢量控制

矢量控制是牵引变流器控制策略里一种常见的方法。它的运作方式是把三相交流电机的电流拆解为励磁电流与转矩电流这两个部分,然后对这两个分量分别开展独立的控制操作,以此来精准地控制电机的转速和转矩^[9]。在 HXD1 交流机车这个应用场景中,矢量控制算法可以依照机车的运行状态,像是启动、加速、匀速、减速这些不同的工况,对励磁电流和转矩电流的大小进行实时的调整,让牵引电机能够输出与之相匹配的转矩和转速。

2. 直接转矩控制

直接转矩控制同样是一种在牵引变流器控制策略中被经常使用的方法。其特点在于直接针对电机的转矩和磁链实施控制,无需像矢量控制那样进行繁琐复杂的坐标变换操作。直接转矩控制的实现方式是,先对电机的定子电压和电流进行检测,然后依据检测结果实时计算出电机的转矩和磁链,将计算得到的转矩和磁链与预先设定的参考值进行对比,再利用诸如砰-砰控制器之类的控制算法,直接操控逆变器的开关状态,借此实现对电机转矩和转速的有效控制。直接转矩控制具备响应速度快、控制操作简便等优势,在 HXD1 交流机车上,可以迅速适应机车不同运行工况的变化。

结束语:

综上所述,HXD1 交流机车牵引变流柜凭借其精妙的结构布局与先进的控制策略,在保障机车高效运行中发挥着关键作用。各模块协同作业,实现电能的精准转换与传输。先进的控制算法确保变流柜在不同工况下稳定运行。随着技术的持续进步,牵引变流柜有望在性能提升、可靠性增强以及智能化程度提高等方面实现突破,为铁路运输的高效、安全与可持续发展提供更有力的支撑,持续推动行业迈向新高度。

参考文献

- [1]史衍可.HXD1 型交流电力机车高速电磁阀故障原因分析及改进措施[J].科技创新与应用, 2024, 14 (26): 142-145.
 - [2]赵国德.HXD1C 型大功率交流货运机车粘着利用控制的研究与应用[J].无线互联科技, 2020, 17 (20): 175-176.
 - [3]李平陶.HXD1C 型大功率交流传动电力机车网络控制系统探索[J].丝路视野, 2018 (20): 104.
 - [4]赵波涛.HXD1 型神华号交流机车辅助回路常见故障分析[J].IT 经理世界, 2020, 23 (3): 47.
 - [5]程龙.HXD1 型神华号交流电力机车列车管压力控制原理及常见故障分析[J].科海故事博览, 2022 (9): 55-57.
- 作者简介:林溪远(1997.8-)男,河北石家庄人,本科,助理工程师,研究方向:机车检修。