

HXd1C 型电力机车牵引变流器 直流母排故障分析

杨帆

(中国铁路总公司 机辆部, 北京 100844)

摘要: 针对配属西宁机务段 HXd1C 型(高原)电力机车多起牵引变流器直流母排故障, 详细分析直流母排故障原因, 提出了改进方案, 并通过仿真分析和试验验证了优化效果。该方案装车考核通过后得到全面推广, 牵引变流器直流母排未再发生故障。

关键词: HXd1C 型(高原)电力机车; 牵引变流器; 直流母排; 故障分析

中图分类号: U269.6

文献标识码: B

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.02.028

配属西宁机务段的 105 台 HXd1C 型(高原)电力机车总体运用良好, 但 2016 年陆续发生 10 余起直流母排故障, 故障无法自复位, 严重影响机车正常运行, 甚至造成机车破救援。

本文对变流器直流母排故障的根本原因进行了详细分析和论证, 提出直流母排优化方案, 并通过一系列仿真、地面试验和跟车测试验证了优化方案的可行性。

1 故障描述

HXd1C 型(高原)电力机车牵引变流器主电路采用二电平四象限整流+逆变拓扑, 主要由整流器、中间直流环节、逆变器、接触器、传动控制单元等设备组成。每重四象限整流器和 1 个逆变器组成 1 组独立的供电单元, 为 1 台牵引电机供电^[1]。主电路图如图 1 所示。

主电路中的直流连接母排用于四象限整流模块和牵引逆变模块直流侧电气连接, 主要作用是将四象限整流模块输出的电能传递给牵引逆变模块。结合系统

电路分析, 该连接母排上的电流成分主要有^[2]: ①四象限整流模块传递给逆变模块的直流电流; ②四象限模块流经二次谐振回路的二次谐振电流; ③由于主电路分布电感和四象限错相控制形成的高次谐波电流。可见, 该直流连接母排上的电流成分非常复杂, 且高次谐波含量丰富。当牵引变流器输出功率较大时, 直流母排连接处极易迅速产生热量堆积。

由于西宁地区处于高原环境, 海拔较高, 气压较低, 散热性能变差^[3-4]; 大功率牵引工况下, 连接母排连接处发热更为严重, 过高的温度可能破坏模块上的低感母排的固有绝缘性能; 此外, 高原地区昼夜温差较大, 容易造成凝露现象, 降低变流器主电路绝缘等级^[5], 加之高海拔条件对电气绝缘的影响, 极易造成直流回路正负极绝缘不足, 形成空气放电。

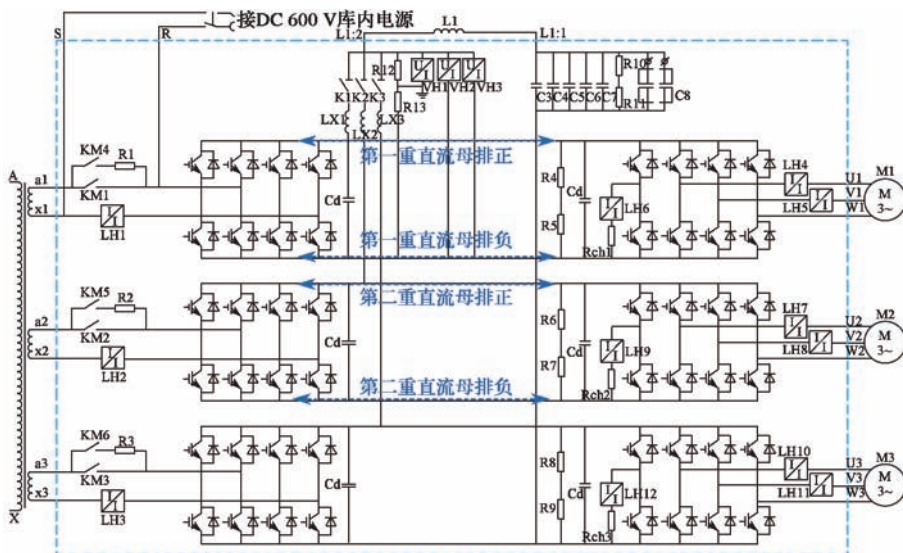


图1 HXd1C 型(高原)电力机车主电路图

2 故障原因分析

由于海拔高度对散热和电气绝缘及爬电等因素的影响, 加之连接母排的连接处本身电流较大, 载流密度较高, 容易造成 HXd1C 型(高原)电力机车牵引变流器直流母排产生放电烧损故障。

收稿日期: 2017-12-12; 修回日期: 2018-01-23

2.1 海拔高度对温升的影响

稳态条件下, 热能流动方程可表示为

$$\Delta T = \frac{q}{Q\rho c_p} \quad (1)$$

式中: ΔT 为温升; q 为传热率; Q 为体积流量; ρ 为空气密度; c_p 为比热压热容。

由式(1)可知, 若传热率 q 确定, 而在湍流状态下, 体积流量不发生改变, 温升和空气密度成反比^[3]。

因此, 在西宁地区, 随着运行区间海拔升高, 空气密度也会随之下降, 在同样的热量和散热风量的条件下, 温升就会随海拔的上升而相应上升。

2.2 海拔高度对散热的影响

变流器内部部件如母排、电缆等, 主要通过内循环风机使变流器内部形成对流辐射散热, 因此连接母排的自冷对流单位面积的散热量 q_k 可表示为

$$q_k = 2.5\tau^{1.25} \left(\frac{293}{T_2} \right)^{0.25} \delta^{0.5} \quad (2)$$

式中: τ 为连接母排表面与变流器内部空气的温差; T_2 为表面温度; δ 为以海平面的气压为参照的气压相对值。

可以看出, 随着海拔的升高, 气压降低, 空气对流能力变差, 系统的散热性能将会变差^[4]。

2.3 海拔高度对电气绝缘的影响

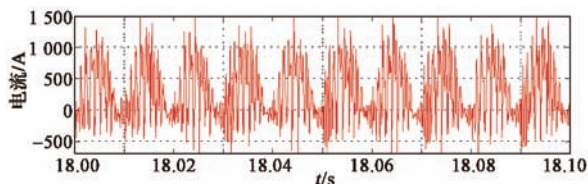
由于绝缘材料的绝缘强度与海拔高度成反比, 在海拔超过 1 000 m 的地方, 变流器内部的高压部件如连接母排的绝缘耐受试验电压要根据 TB 1333.1 标准进行相应修正, 如西宁地区海拔约为 2 300 m, 考虑参数修正系数 1.14 倍, 最小电气间隙为 16 mm。当污染等级为 PD2 时, 直流母排爬电距离要求 14 mm, 最小槽宽 1.5 mm。根据 HXD1C 型 (高原) 电力机车变流器连接母排的装配结构, 实测直流母排爬电距离为 22 mm, 最小电气间隙为 20 mm。因此, 在正常情况下, 连接母排的电气绝缘设计是满足海拔要求的。

随着机车应用时间的加长, 变流器内部可能会有污染; 加之西北高原地区昼夜温差较大, 可能会形成“凝露”现象, 连接母排处的电气绝缘会降低。

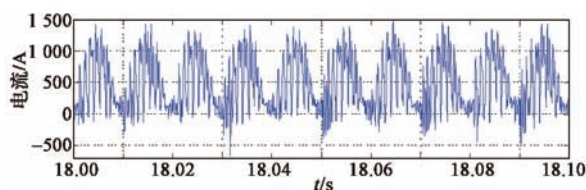
2.4 变流器连接母排电流测试

在西宁—格尔木区间添乘 HXD1C 型 (高原) 电力机车, 当机车输出满功率, 测试直流连接母排处通过的电流值。如图 2 所示为第一重直流连接母排四象限侧 2 个正极连接点的电流波形, 2 个连接点电流有效值分别为 496 A 和 615 A, 存在不均流现象, 同时可看出此电流谐波含量较高。

高原地区散热性能较差, 大电流会使连接母排处



(a) 连接母排电流 1



(b) 连接母排电流 2

图 2 现场测试波形 (通过第一重直流连接母排四象限侧 2 个正极连接点电流)

热量堆积, 高温和温度循环会使连接母排周边和周边的低感母排绝缘性降低, 从而出现放电现象。

3 改进方案

为彻底解决该类母排放电的故障, 需从改善散热及加强绝缘 2 个方面进行改进设计: ①改进直流母排结构, 减少母排直接裸露表面, 加大连接母排与周边部件的绝缘距离; ②减小连接母排端子上通过的电流, 并提高同极性端子的均流性, 改善连接处的散热条件以降低温升。

3.1 改进方案介绍

如图 3 所示, 改进后的直流连接母排在连接处取消了之前原始连接母排的铜柱, 一方面, 减少了连接母排裸露面积, 增大了连接母排与周边其他部件的绝缘及爬电距离; 另一方面, 为防止机车振动造成正负极连接母排距离过近, 在两块连接母排之间设计一块环氧绝缘板, 增加正负极连接母排之间的绝缘能力。

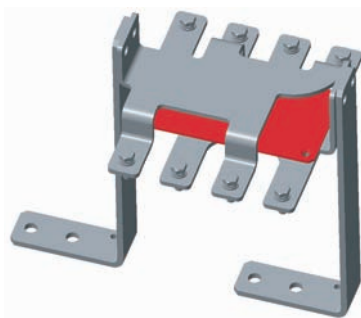


图 3 新设计连接母排结构示意图

此外, 新设计的连接母排折弯处更加平顺, 没有出现 90° 折弯现象, 避免尖端放电现象。

最后, 新设计采用叠层工艺, 将母排设计为柔性连接母排, 减小由于个体差异和组装误差导致的安装应力, 增大电气连接紧固接触面。

同时, 为减小连接母排通过的电流, 使不均流情况降低, 特提出在第一、第二整流和逆变模块支撑电容之间增加低感连接母排, 使电容与电容之间的电能直接通过电容低感连接母排, 而不必通过直流连接母排, 如图 4 所示。

同时, 为减小连接母排通过的电流, 使不均流情况降低, 特提出在第一、第二整流和逆变模块支撑电容之间增加低感连接母排, 使电容与电容之间的电能直接通过电容低感连接母排, 而不必通过直流连接母排, 如图 4 所示。

同时, 为减小连接母排通过的电流, 使不均流情况降低, 特提出在第一、第二整流和逆变模块支撑电容之间增加低感连接母排, 使电容与电容之间的电能直接通过电容低感连接母排, 而不必通过直流连接母排, 如图 4 所示。

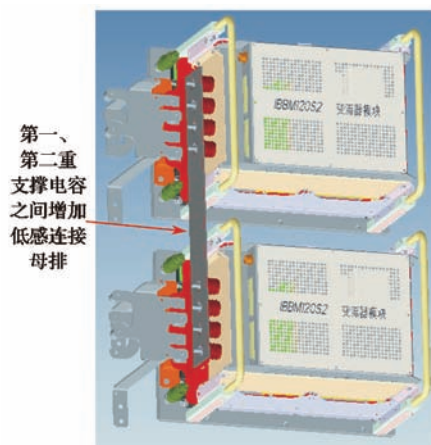


图 4 第一、第二重电容之间增加低感连接母排示意图

3.2 结构强度分析

对新直流连接母排建立有限元分析模型进行仿真(如图5),通过静强度、模态和随机振动疲劳分析,得出静强度分析最大应力未超过T2紫铜材料的屈服强度;横向、垂向和纵向随机振动的疲劳损伤之和小于1,疲劳强度满足要求。

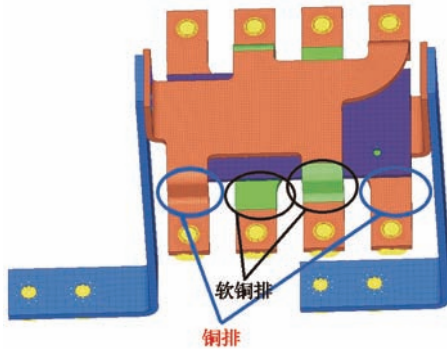


图5 直流连接母排的有限元模型

同时,对新直流连接母排进行随机振动试验。试验完成之后,目视外观无明显机械损伤,振动前后对试验母排进行10 kV耐压试验,均顺利通过。

综上,新设计母排结构强度和耐压均满足要求。

3.3 均流性测试

①在西宁—格尔木运行区间对改进方案的连接母排进行测试,当机车输出满功率,测试直流连接母排处通过的电流值。图6是通过第一重直流连接母排四象限侧的2个正极连接点电流波形,2个连接点电流的有效值分别为430 A和466 A,比不加电容母排的电流值(496 A和615 A)下降明显,均流性也更好。通过电流的减小可直接降低母排连接处的温升。

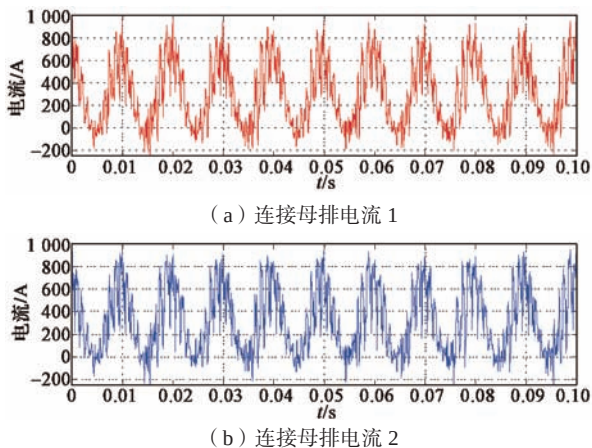


图6 加电容连接母排后现场测试波形(通过第一重直流连接母排四象限侧2个正极连接点电流)

②在地面搭建牵引变流器试验台位进行试验。加电容低感母排后,在满手柄牵引/制动工况下,对连接母排电流进行全速度范围内扫描得到如图7和图8所示的连接母排随速度变化的电流曲线图。可以看出,连接母排电流最大值与西宁线路添乘测试数据基本吻合,连接母排电流有较大幅度降低。

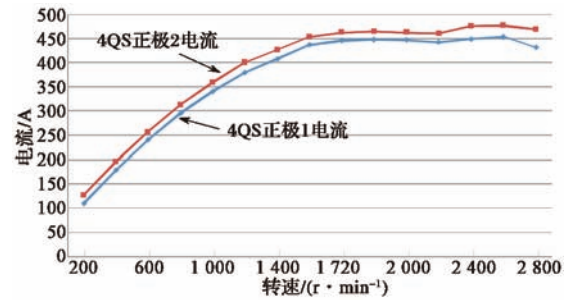


图7 满手柄牵引工况下连接母排电流随速度变化曲线图(通过第一重直流连接母排四象限侧2个正极连接点电流)

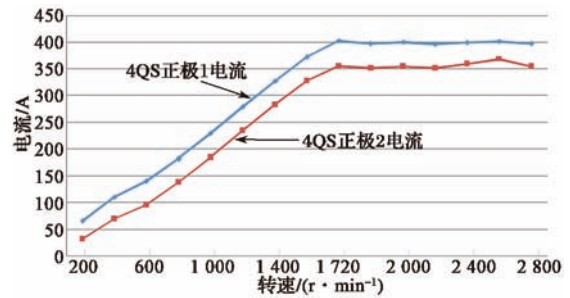


图8 满手柄制动工况下连接母排电流随速度变化曲线图(通过第一重直流连接母排四象限侧2个正极连接点电流)

4 装车试验

此优化方案于2016年11月在西宁—格尔木区间内进行测试和试验,测试完成之后,当在西宁机务段试改了5台车进行验证,添乘测试连接母排电流、变流器输入输出参数等均无异常。优化方案在小批量验证数月无异常后,已全面在西宁机务段HXd1C型(高原)电力机车上实施改造。

5 结语

经过现场调研、添乘测试、地面试验和装车验证,提出的“新设计连接母排+电容低感母排”的方案能够有效地改善直流母排的绝缘性能,降低母排特别是其连接端子的电流,改善其散热条件。自2017年1月开始,改进方案已经在西宁机务段配属的HXd1C型(高原)电力机车全面实施,改造后有效地避免了直流母排故障的发生,提高了机车的运用质量。

参考文献:

- [1] 范荣辉,秦方方,郭君博,等.高原电力机车IGBT主变流器[J].机车电传动,2012(3):70-74.
- [2] 陈燕平,忻力.变流器中电容器并联时的谐振现象及噪声研究[J].机车电传动,2008(5):19-22.
- [3] 黄延平.电器空气冷却系统受海拔影响的理论分析[J].机械工程学报,2015,51(12):153-160.
- [4] 吴冰,王建良.电力机车在海拔条件下运行初探[J].电力环境保护,2006,22(2):61-62.
- [5] 郭兴.适合高原车载的计算机系统设计[J].国防科技,2017(1):60-63.

作者简介:杨帆(1982-),男,硕士,高级工程师,主要从事全路机车检修质量管理相关工作。