

高速动车组高压箱内异常放电故障分析及解决方案

杨 军

(中国铁路北京局集团有限公司车辆处,100860,北京//高级工程师)

摘 要 介绍了高速动车组高压箱内异常放电故障的基本情况,介绍了高压箱主电路原理及故障检测原理。通过检查测试及仿真分析,找出了高压箱设计中的薄弱点,并针对性提出了改进方案,对电气间隙的薄弱点进行了优化提升,增加了箱内绝缘安全裕度。试验验证表明,改进方案满足设计要求。同时提出了高压箱设计绝缘配合的注意事项。

关键词 动车组;高压箱;绝缘故障

中图分类号 U260.4⁺9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.030

Analysis of Abnormal Discharge Fault in High-voltage Electric Box and Solutions

YANG Jun

Abstract With an analysis of the basic situation of abnormal discharge fault happened in high-speed EMU high voltage box, the principles of the main circuit in high voltage box and the fault detection are introduced. Through test and simulation analysis, the weak points in the design of high voltage box are detected, corresponding improvement solutions are proposed, including the optimization and improvement of weak points in electrical clearance, the increase of the insulation safety margin in the box. The experiment result shows that the optimization and improvement scheme could meet the design requirements, precautions for insulation coordination in the design of high voltage box are proposed at the same time.

Key words EMU; high-voltage electric box; insulation fault

Author's address Vehicle Department of China Railway Beijing Group Co., Ltd., 100860, Beijing, China

为了提高动车组高压电气设备在广域运用条件下对雾霾等恶劣环境的适应能力及应用安全,兼顾高速动车组气动阻力、气动噪声和脉动载荷减小的要求,复兴号系列动车组采用了高压箱的集成设计结构。

由于车载空间有限,因此针对高压箱的设计提出了紧凑设计的要求,而确保高压系统可靠运行的前提是要有足够的电气间隙及爬电距离。在满足

以上要求的同时,也发生了由于集成细节问题而引发的故障。本文以实际发生故障为例,分析高压箱绝缘配合中存在的问题及其形成原因,并提出改进建议和措施。

1 高压箱内异常放电故障基本情况

1.1 故障概况

2019年9月,配属北京局集团有限公司北京南所的某型车组,担当G83次列车交路(北京西站—长沙南站)。在石家庄站—郑州东区间,列车出分相合主断瞬间,11车报故障代码33E8(高压控制单元1触发线电流过流保护)和故障代码33F2(高压控制单元2触发线电流过流保护)。随车机械师通知司机降弓并通过受电弓监控装置确认03车、11车受电弓当前状态正常,后续通过受电弓监控装置回放发现故障发生时11车车顶有疑似放电现象,03车、06车、14车车顶无异常情况,升06车、14车受电弓,主断闭合正常,列车后续运行情况正常。

该车组运行里程652 040 km,未执行高级修。回库登顶检查发现高压箱内部活页侧箱盖及箱体顶层油漆有烧灼现象。主断极间触头烧损、接地夹及中间转臂部分轻微熔化。

1.2 高压箱主电路原理及故障检测原理

1) 高压系统组成及工作原理。接触网25 kV交流电通过受电弓进入高压箱,经过主断路器进入本牵引单元变压器,并通过车顶隔离开关到另一牵引单元变压器,为整车提供交流电。当检测到网侧电压、网侧电流超过限制值后,主断路器自动断开。高压系统主电路如图1所示。

2) 网侧电流检测原理。通过线电流互感器将采集到的电流值转换成电压信号并经过匹配变压器、匹配电阻传输到高压控制单元中,当高压控制单元检测网流值过流后,自动断开主断。网侧电流检测原理图2所示。

3) 高压控制单元触发线电流保护规则。当高

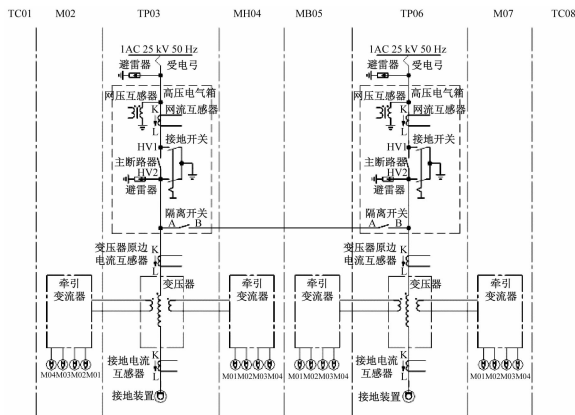


图1 高压系统主电路截图

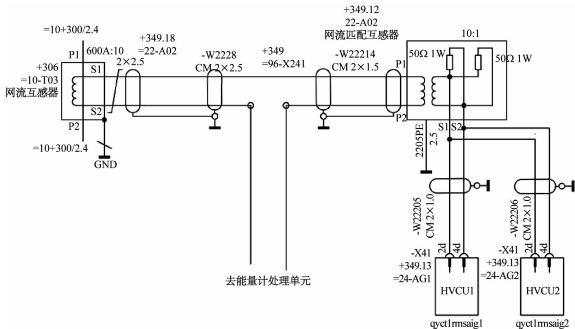


图2 网侧电流检测原理图截图

压控制单元检测到网侧电流峰值大于 1 300 A 时, 车组报出故障代码 33E8 和故障代码 33F2。

2 高压箱内异常放电故障原因分析

高压箱设计满足《时速 350 公里中国标准动车组技术条件》中的要求: 主回路对地额定冲击耐受电压不低于 170 kV, 工频耐受电压不低于 75 kV。

2.1 绝缘性能检查及测试

对故障高压箱进行开盖检查, 内部均无可见异物或明显水迹, 未见异常。为进一步验证水和潮气对电气间隙的影响, 进行如下试验:

1) 对高压箱进行淋雨试验。距离箱体 3 m 位置, 用喷射压力为 8 ~ 10 MPa 的高压水枪, 对故障高压箱的顶盖与箱体缝隙及周围侧板位置进行 5 min 以上的喷射。试验结果为: 箱体密封良好, 无进水现象。

2) 模拟高压箱内部受潮情况。对高压箱的顶盖及箱底绝缘板喷水后进行高压回路对地雷电冲击试验, 升压至 173 kV 时无击穿或闪络现象。在顶盖隔音棉碳化、绝缘材料表面状态不佳的情况下, 高压箱仍能承受 170 kV 雷电冲击耐受电压, 证明箱内绝缘性能正常。

3) 对故障主断进行工频耐压检测。检测结果表明主断路器外绝缘正常。

综上, 高压箱在淋雨及内部凝露条件下的绝缘性能满足设计要求。

2.2 电气间隙测量

对高压箱内所有带电部件的最小电气间隙进行测量。测量结果为: 真空断路器高压对地最小电气间隙为 310 mm, 高压断路器断口间最小电气间隙为 285 mm。高压箱电气间隙符合设计要求。

2.3 绝缘性能极限能力测试

根据 IEC(国际电工委员会)规定: 对 300 kV 以下的电气设备, 在工频工作电压、暂态过电压和操作过电压下的绝缘性能可用短时工频耐压试验来检验。

对断路器断口进行工频电压极限耐受能力测试。在断口施加 100 kV 工频电压, 持续时间为 1 min, 无闪络或击穿现象; 当工频电压升至 105 kV 时, 出现击穿放电现象。说明断路器断口耐受短时工频电压的极限有效值约 100 kV, 峰值约 141 kV。

2.4 仿真模型构建

将牵引网等效为由 R-L-C(电阻-电感-电容)元件组成的高阶电路, 车体等效为 R-L(电阻-电感)元件的组合。对出分相闭合断路器闭合瞬间在断口间产生的过电压进行仿真, 仿真电路如图 3 所示。

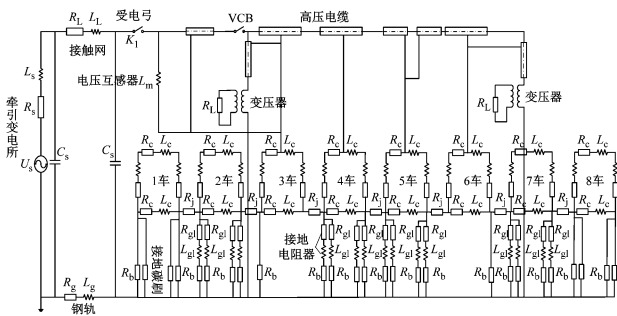


图3 主断路器合闸瞬间操作过电压仿真电路截图

2.5 仿真参数确定

仿真电路参数为我国高铁的典型参数及车辆实际测试参数。牵引变电所采用的电阻、电感和电压的参数分别为: $R_s = 0.165 \Omega$, $L_s = 10.8 \text{ mH}$, $U_s = 27.5 \cos \omega t \text{ kV}$ 。简单链型悬挂下供电臂长度为 25 km。接触网导线采用的电阻、电感的参数分别为: $R_L = 4.45 \Omega$, $L_L = 35.7 \text{ mH}$ 。接触网导线与钢轨间的电容值 $C_L = 0.134 \text{ } \mu\text{F}$ 。每 25 m 钢轨的电阻和电感的参数分别为: $R_g = 3.375 \Omega$, $L_g = 11 \text{ } \mu\text{H}$ 。

受电弓和断路器之间的高压电缆在 3 车上, 截

面积为 240 mm^2 , 其计算参数, 电阻为 $0.159 \text{ } \Omega/\text{km}$ 、电容为 $0.29 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$, 电感为 $0.22 \text{ mH}/\text{km}$, 长度为 1.6 m 。电压互感器负载相当于开路, 等效为励磁电感 L_{VT} , $L_{\text{VT}} = 100.9 \text{ mH}$ 。主变压器模型采用与实际变压器电气特性非常相似的 XFRM-Linear 线性变压器。变压器副边等效电阻为 $32 \text{ } \Omega$ 。

车体参数经实车测量为: 单节车体电阻为 $2.8 \text{ m}\Omega$, 车体电感为 $0.51 \text{ } \mu\text{H}$, 车间连接电阻为 $2 \text{ m}\Omega$ 。接地电阻器的电阻 $R_{\text{G}} = 100 \text{ m}\Omega$, 电感 $L_{\text{G}} = 4.5 \text{ uH}$ 。考虑并联情况, 模型设为 $R_{\text{G}} = 50 \text{ m}\Omega$, $L_{\text{G}} = 2.3 \text{ uH}$ 。

2.6 仿真分析

根据 GB/T 1402—2010《轨道交通 牵引供电系统电压》, 牵引变电所牵引电源电压为 27.5 kV , 最高为 31.0 kV 。

在最恶劣的情况下, 即在变电所牵引电源电压处于峰值时进行断路器操作, 在动车组高压部件上引起的过电压最大。

过分相时, 车上只有空调、照明等负荷, 变压器一次侧截断电流有效值约为 8 A (有效值按故障时刻电流计算), 负载功率约为 200 kW 。

设定断路器合闸后在波峰处发生弹跳, 仿真得出的断路器断口操作过电压波形如图 4 所示, 过电压峰值为 128.6 kV , 持续时间为 0.5 ms 。

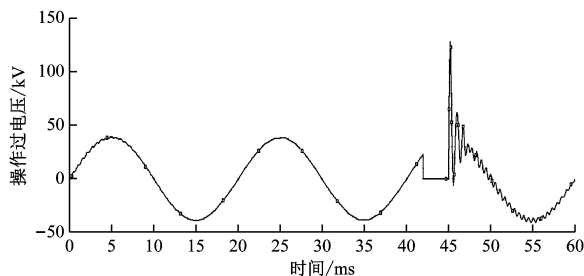


图4 主断路器合闸弹跳情况下的操作过电压波形截图

操作过电压仿真波形分析如下:

1) 断路器输出端直接与车载变压器相连, 当断路器断开后, 高压电缆分布电容、变压器励磁电感等形成振荡回路, 存储在其中的能量会瞬时被切断, 形成峰值较高的过电压之后以振荡形式耗散。

2) 在断路器合闸弹跳瞬间, 输入端与输出端各自形成了新的振荡电路结构。输入端受电源电压影响, 基本还是以工频周期变化; 而输出端电压以高频衰减形式振荡。因此, 断路器断口操作过电压是输入端和输出端过电压在时间上的叠加, 当输入端处于负向波谷、输出端处于正向峰值时, 断口就会叠加出很高的过电压。

2.7 真空断路器过电压分析

有试验结果表明, 气隙的 50% 操作冲击击穿电压 $U_{50\%}$ 与波前时间的关系曲线呈“U”型, 间隙电压随波前时间增加而减少, 在 $100 \sim 500 \text{ } \mu\text{s}$ 时达到最低值。且操作冲击击穿电压和放电时间的分散性较大, 在极不均匀电场气隙中可达 $8\% \sim 15\%$ 。

断路器操作过电压峰值持续时间短, 在 0.5 ms 以内存在操作过电压击穿电压比工频击穿电压峰值小发生气隙击穿的可能性。一旦断路器外绝缘被击穿就会导致周边空气发生电离, 在高压箱密闭的小空间内极易造成高压对地放电故障。

因此, 需要进一步提高断路器断口间外绝缘的击穿电压, 以减小操作冲击条件下的闪络风险。

3 解决措施

3.1 改进方案

根据上述分析, 解决方案为增强断路器断口的绝缘性能: 优化触头结构, 使其形状规则圆滑; 将电气间隙由 285 mm 增加至 312 mm 。断路器断口原方案和改进方案如图 5 所示。

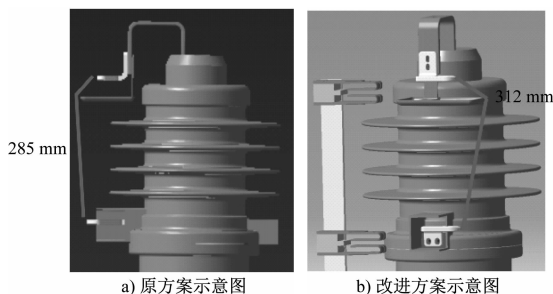


图5 断路器断口原方案和改进方案

3.2 试验验证

对改进后的断路器断口进行工频电压极限耐受能力测试, 施加 110 kV 工频电压并保持 1 min 时, 无闪络或击穿现象; 当工频电压升至 117 kV 时, 出现击穿放电现象。说明断路器断口耐受短时工频电压的极限有效值约 110 kV , 峰值约为 156 kV 。优化改进方案较原方案的空气击穿能力提高了 10% 。雷电冲击电压达到 185 kV 以上。

3.3 风险评估

上述改进方案会导致接地开关在接地位置时, 接地夹与接地触头单面的接触面积减小至 349 mm^2 , 两面的接触面积共 698 mm^2 。接地开关的额定电流为 400 A , 满足载流要求, 对实际使用不会产生影响。

(下转第 140 页)