

# 南京宁天城际线车辆压敏电阻 和续流回路故障分析

何玉琴, 张 勇

(南京地铁建设有限责任公司 系统设备处, 江苏 南京 210000)

**摘 要:** 针对南京地铁宁天城际线车辆在运营初期出现的压敏电阻和续流回路故障现象, 从电路保护原理、器件失效和故障数据分析以及试验验证等方面对故障现象进行分析和探讨, 并提出整改措施, 经长期运行考核表明, 车辆运行状态良好, 类似故障未再发生。

**关键词:** 压敏电阻; 续流回路; 雷电冲击; 过电压吸收

中图分类号: U231; U269.6 文献标识码: B

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.05.027

南京地铁宁天城际线一期工程起自大桥北路站,

经大厂、长芦、雄州、八百桥到金牛湖, 线路全长 45.2 km。全线共设置 17 座车站, 其中大部分为高架车站 (11 座)。全线列车总数为 26 列 (4 辆编组, B<sub>2</sub> 型车), 最高运行时速度 100 km/h。对于 B<sub>2</sub> 型车, 本项目是国内首条采用自主研发“两半动+两全动”架控牵引系统的地铁线路。该线路于 2014 年 8 月正式开通运营。在开通运营 1 个月内, 接连出现 4 起压敏电阻和续流回路烧损故障, 导致列车清客下线。

## 1 故障原因分析

4 起故障均发生在雷雨天气, 车辆回库后, 打开高压电器箱检查, 发现箱内的压敏电阻 F1 和续流回路均已烧损 (Rd 烧损、V1 击穿) (主电路原理见图 1), 同时, 辅助母线熔断器 ADF 熔断, 防反二极管 VD1

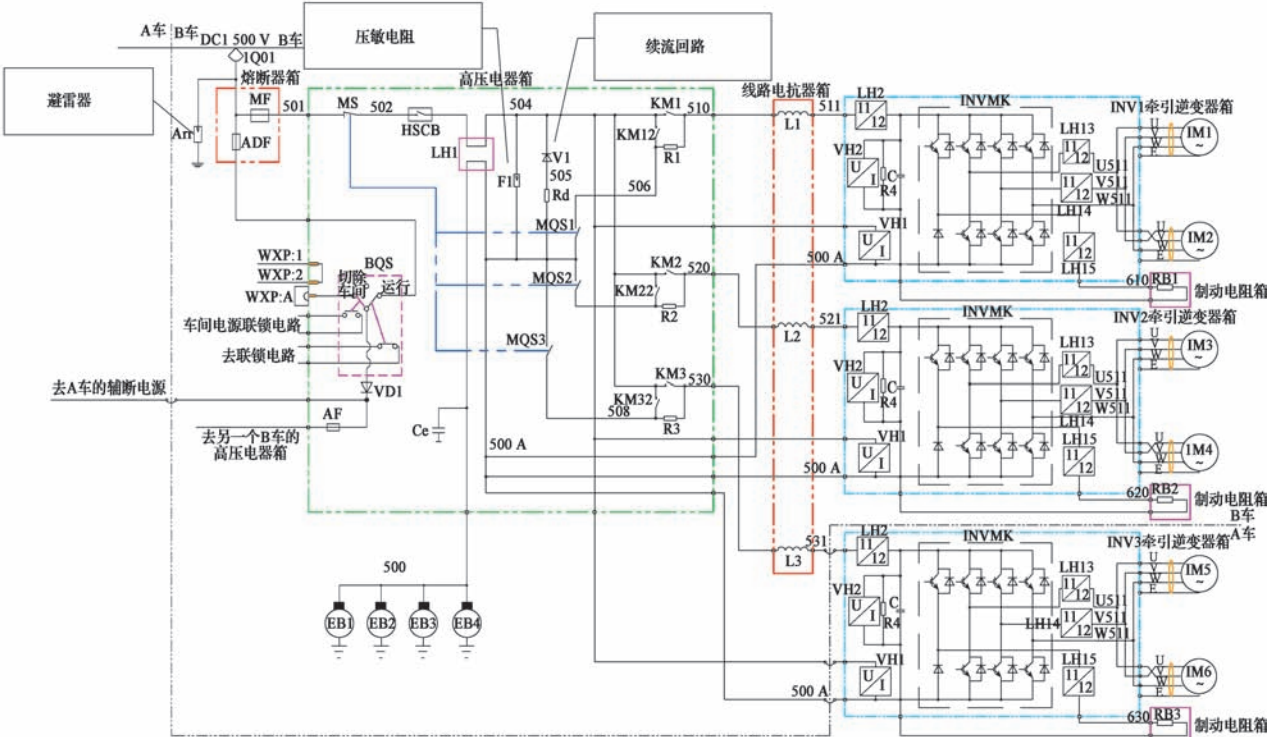


图 1 主电路原理图

击穿。故障发生后, 通过对压敏电阻、避雷器和续流回路元件检测以及雷电冲击试验验证, 最终确定压敏电阻烧损故障为压敏电阻本身质量问题导致, 续流回路烧损故障为雷击引起主回路过压导致。为避免类似故障再次发生, 需从压敏电阻和续流回路在高压回路中的保护原理以及故障数据分析两方面入手, 并通过高压试验验证手段来重新评估设置压敏电阻和续流回路的必要性, 从而提出整改措施。

1.1 设置压敏电阻和续流回路必要性分析和探讨

如图 1 所示, 牵引系统高压回路的直流环节设置有压敏电阻 F1、续流回路 (限流电阻  $R_d$ 、二极管  $V1$ )。设计的初衷是: 在线路电抗器 ( $L1\sim L3$ ) 之前设置压敏电阻, 对电抗器前端可能产生的浪涌尖峰电压进行吸收; 续流回路的作用是当主电路直流环节在牵引工况下突然异常断开 (如高速断路器大电流异常分断) 时, 将电抗器 ( $L1\sim L3$ ) 中的能量进行续流和转移, 从而有利于主电路器件的长期可靠工作。但在实际应用时, 压敏电阻因其对密封工艺要求较高, 当其密封性不好或者频繁动作后, 其内部电阻芯片会逐渐劣化并最终导致压敏电阻失效<sup>[1]</sup>炸裂, 并可能引发严重的次生故障。如图 1 中压敏电阻 F1 烧损导致 ADF、AF 熔断, 产生很高的过电压 (3 000 V, 如图 2 所示), 进而导致连接母排对地拉弧 (如图 3 所示), 而且压敏电阻炸裂会破坏附近的其他器件, 甚至把高压箱体的柜门冲开, 具有一定的危险性。

图 1 中压敏电阻 F1 烧损导致 ADF、AF 熔断, 产生很高的过电压 (3 000 V, 如图 2 所示), 进而导致连接母排对地拉弧 (如图 3 所示), 而且压敏电阻炸裂会破坏附近的其他器件, 甚至把高压箱体的柜门冲开, 具有一定的危险性。

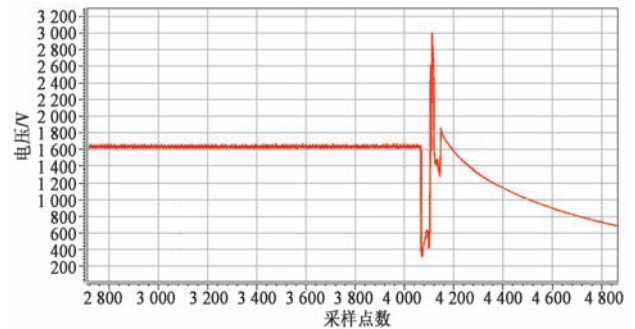


图 2 压敏电阻故障时中间直流电压波形

下面分别从外部过电压吸收、实际操作过电压吸收等方面对设置压敏电阻和续流回路的必要性进行分析和探讨。

1) 外部过电压吸收

图 4 为图 1 的简化原理图。正常工作时, 隔离开关 MS 和高速断路器 HSCB 闭合, 避雷器 Arr 与压敏



图 3 压敏电阻烧损

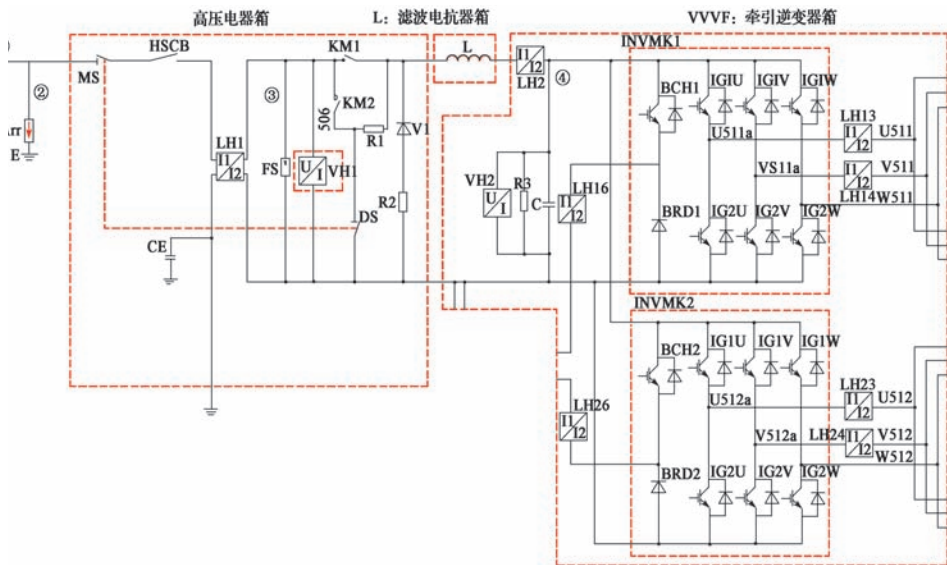


图 4 主电路简化原理图

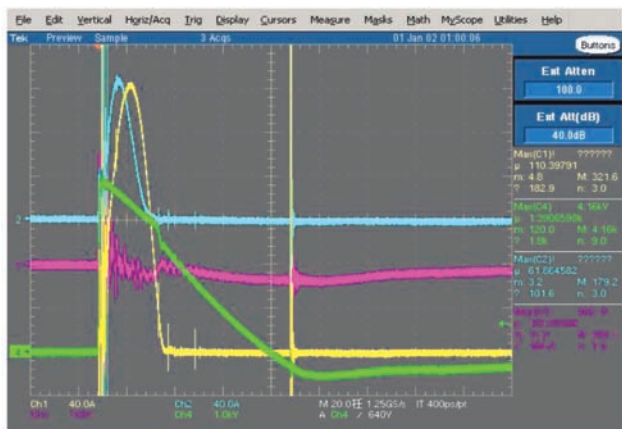
电阻  $F_s$  并联在直流回路中, 两者工作原理相同, 均为无间隙氧化锌 ( $ZnO$ ) 压敏电阻器, 对过电压有吸收作用。对比两者参数见表 1 所示。

表 1 避雷器与压敏电阻参数

| 避雷器主要参数                            | 压敏电阻主要参数                                |
|------------------------------------|-----------------------------------------|
| 额定电压: DC 2 000 V                   | 直流参考电流: $(1 \pm 0.2)$ mA                |
| 8/20 $\mu$ s 波形标称放电电流: 10 kA       | 标称动作电压 (直流参考电压、压敏电压): 2 600 V           |
| 2 ms 方波持续时间电流耐受: 1 200 A           | 动作电压允许偏差: $\pm 10\%$                    |
| 标称放电电流下的残压: $\leq 4.8$ kV          | 漏电流: $\leq 40 \mu$ A<br>(0.75 倍标称动作电压下) |
| 操作冲击电流 (500 A) 下的残压: $\leq 3.9$ kV | 通流量: 25 kJ (8/20 kA)                    |
| 额定短路电流 (0.2 s): 40 kA              | 残压比 ( $V1$ kA/ $V1$ mA): $\leq 1.3$     |
| 操作冲击试验前后残压变化 $\leq 5\%$            |                                         |
| 冲击能力释放能力: 3.9kJ/kVr                |                                         |

避雷器动作电压为 2 800 V 以上, 压敏电阻动作电压为 2 600 V, 线路中有浪涌过电压时, 压敏电阻会先动作, 吸收大部分的能量。为证明这一点, 按宁天线车辆实际接线长度、设备搭建图 4 所示的被试系统进

行雷电冲击电压试验,在图 4 的①位置处施加 1.2/50  $\mu\text{s}$  标准雷击冲击电压。图 5 为冲击电压 4 500 V 时的试验波形,压敏电阻电流远大于避雷器电流。即当发生雷击时,压敏电阻吸收大部分能量,虽然一定程度上起到了避雷器的作用,但是也可能因能量过大而炸裂,从而导致其他的次生故障。



通道1 (黄色: 40 A/格): 电流通道, 测量压敏电阻的电流;  
通道2 (蓝色: 40 A/格): 电流通道, 测量避雷器的电流;  
通道3 (粉色: 100 V/格): 电压通道, 电抗器输出端;  
通道4 (绿色: 1 000 V/格): 电压通道, 测量电抗器输入端或避雷器输入端

图5 冲击电压 4 500 V 时的试验波形

结合 DC1 500 V 接触网防雷设计考虑对压敏电阻的不利影响。南京宁天城际架空线结构如图 6 所示, 接触网的顶端设置有架空地线, 牵引变电所直流 1 500 V 正负极之间、直流 1 500 V 正母线对地、直流负母线对地设置有避雷器, 标称放电电流下残压 4.8 kV。如果设计合理, 理论上雷击发生时很大概率击中中线网, 接触网避雷器动作, 放电动作后的电压经过线路衰减后仍侵入车辆系统的高压回路, 在有压敏电阻的情况下, 此电压可能不会引起避雷器动作, 但是压敏电阻会动作。如果雷击频繁, 压敏电阻多次动作后将导致电阻芯片劣化, 漏电流增加, 最终导致热崩溃而发生故障。

续流回路上的二极管 V1 (反向重复峰值电压为 DC 6 500 V) 被击穿, 其原因为车辆在遇到 10 kA 以上的雷电冲击电流时, 尽管大部分冲击电流通过避雷器分流, 但是由于施加在续流回路两端的电压超过续流

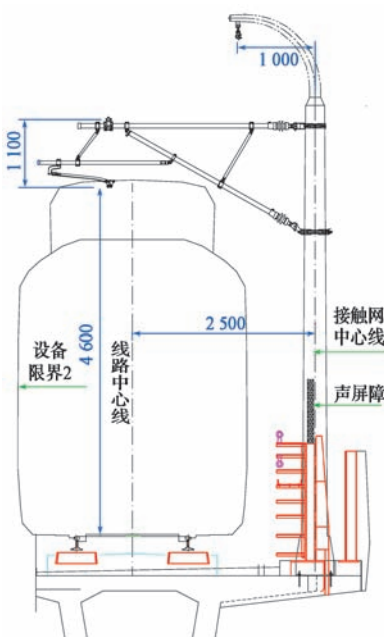


图6 架空线 DC1 500 V 接触网结构示意图

二极管 V1 的反向击穿电压 6.5 kV, 因此 V1 被击穿。如图 7 所示, 当在牵引系统输入回路施加 10 kA 8/20 标准雷电冲击电流时, 由于“行波反射”作用, 电抗器输入端冲击电压达到 7 kV 左右, 从而导致续流回路二极管 V1 被击穿。“行波反射”原理为<sup>[2]</sup>: 线路中均匀性开始遭到破坏的点称为节点, 当行波投射到节点时, 必然会出现电压、电流、能量重新调整分配的过程, 即在节点处将发生行波的折射和反射现象。线路电抗器相对于雷电冲击波来说就是个节点, 此时冲击波在遇到电抗器后就会发生反射从而与之前的电波叠加, 出现电抗器输入端电压抬高的现象。

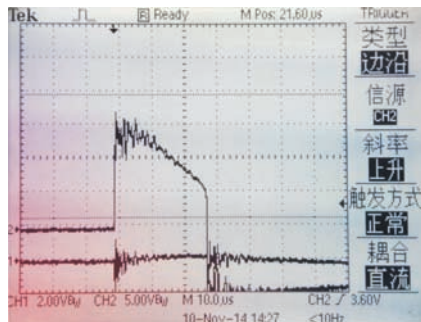
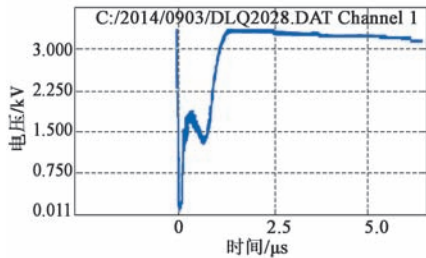


图7 遇到 10 kA 8/20 冲击电流时电抗器输入电压 (通道 2, 即续流回路两端电压)

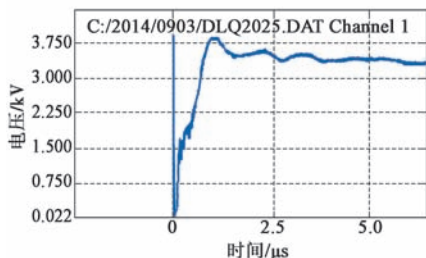
此外, 电子器件 (如二极管、电阻等) 原则上不直接与接触网相连, 而且前侧无电抗器等隔离保护器件, 易造成击穿和故障扩大, 尤其是在高架线路较长的地铁线路, 雷雨天气时列车遭遇雷击的概率较大, 并联在接触网上的电子器件很容易被雷电击穿。

为进一步评估设置或不设置压敏电阻和续流回路是否对牵引高压回路有影响, 通过雷电冲击电压试验进行验证。

首先对设置与不设置压敏电阻进行了对比试验。在主电路直流环节输入侧施加 12 kV 雷击冲击电压, 试验结果如图 8 所示。当设置压敏电阻时, 输入侧残压峰值约为 3.42 kV; 未设置压敏电阻时, 输入侧残压峰值约为 3.78 kV。两者相差不到 400 V, 两者的峰值电压都没有超过系统设计耐压值, 说明当主电路直流环节已设置避雷器时, 压敏电阻设置与否对主电路没影响。



(a) 设置压敏电阻



(b) 未设置压敏电阻

图8 施加 12 kV 雷击冲击电压时直流环节输入侧残压曲线

管被雷电冲击电压击穿的概率很大, 从而导致严重的次生故障; 不设置续流回路的车辆高压回路在遇到雷电冲击时, 即使冲击电流等级很高 (达到 90 kA 以上), 车辆高压回路及其各部件仍可以正常工作。此外, 该试验还验证了车辆高压回路在遇到雷击电流冲击时, 避雷器能正常动作, 而且绝大部分冲击电流通过避雷器回路分流, 避雷器选型合理。

综上所述, 在防止外部过电压方面, 压敏电阻不是必须的, 遭遇雷击时, 压敏电阻或续流回路可能会烧损或炸裂, 反而可能导致故障范围扩大。

2) 内部过电压吸收

如果从内部过电压吸收方面的保护考虑, 正常工作状态下, 故障发生时, 牵引控制单元 DCU 先封锁逆变脉冲, 再跳高速断路器。逆变器封锁后, 负载电流短时间内下降为 0, 但此时高速断路器并未分断 (从发出断高速断路器命令到高速断路器熄弧完全断开约 90 ms), 不管有无压敏电阻及续流回路, 线路电抗器可以通过线路、支撑电容和地面电源形成 LC 振荡, 由于线路阻抗的阻尼作用, 振荡很快衰减收敛。对于单个逆变器, 即使电抗器的全部能量转移至直流支撑电容, 电容上的电压升高也很小。

表 2 对比试验结果

| 试验内容           | 含压敏电阻及续流回路                                                                | 不含压敏电阻及续流回路                                                       |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 先跳高速断路器后封锁逆变脉冲 | 试验①<br>牵引工况:<br>续流回路未工作<br>制动工况:<br>续流回路未工作                               | 试验②<br>牵引工况: 中间电压略有偏高, 因振荡的初始参数不同, 中间电压比试验①略高 40V<br>制动工况: 未出现过压  |
|                | 试验③<br>牵引工况: 续流回路未工作, 产生 LC 振荡, 振荡很快收敛<br>制动工况: 续流回路未工作, 产生 LC 振荡, 振荡很快收敛 | 试验④<br>牵引工况: 产生 LC 振荡, 因振荡的初始参数不同, 中间电压比试验③略高<br>制动工况: 与试验 3 结果一致 |

在非正常情况下, 即高速断路器分断时 DCU 未封锁脉冲或同时封锁脉冲时, 为验证压敏电阻和续流回路的作用, 进行如表 2 所示的高压试验。

试验结果表明: 当发生先跳高速断路器再逆变封锁或逆变封锁同时跳高速断路器的非正常情况时, 有无压敏电阻及续流回路对高压主电路都没有影响。

1.2 分析结论

根据上述理论分析和试验验证表明: 压敏电阻及续流回路在车辆牵引系统高压直流环节中设置与否, 对主回路的运行并无影响, 而且, 一旦压敏电阻和续流回路出现故障 (一般表现为短路), 很可能会导致严重的次生故障, 南京宁天城际线车辆运营初期出现的因雷击引起压敏电阻及续流回路故障从而导致牵引高压回路多个元器件烧损就是一个很典型的实例。因此, 高压主电路设置压敏电阻及续流回路是多余的。

1.3 现场验证措施

基于上述分析结论, 为避免类似故障再次发生, 先拆除 2 列车上的压敏电阻和续流回路并进行了 3 个月的实际运营考核验证, 无相关故障发生。

2 结语

南京地铁宁天城际线 26 列车辆在取消压敏电阻和续流回路后, 已经安全可靠运行了一年半, 期间也经历了多次强雷电暴雨天气, 但均未出现类似故障或因取消压敏电阻和续流回路带来的其他未知故障, 列车运行状态正常。实践表明, 对于运营初期出现的压敏电阻和续流回路故障, 分析及试验结果准确可信, 采取的整改措施得当。建议取消压敏电阻和续流回路的高压主电路在其他地铁车辆上推广应用。

参考文献:

[1] 杜志航, 孙涌, 汪计昌, 等. 压敏电阻在配合使用时的老化和失效分析[J]. 电瓷避雷器, 2009(6).  
[2] 吴广宁. 高电压技术[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2014.

动态消息

马其顿动车组网络软件通过国际级安全认证

近日, 由中车时代电气研发的马其顿动车组网络控制系统软件通过 SIL2 级安全认证现场审核, 圆满收官软件认证冲刺阶段工作。SIL(safety integrity level) 是指安全完整性等级国际标准, 表示针对系统失效时某系统仍可满足指定

安全功能所要求的置信度等级的数值。

近几年来, 功能安全和安全完整性等级开始从概念阶段发展到应用阶段。国内轨道交通设备的复杂程度不断提高, 列车网络控制系统软件越来越多地参与到列车的安全控制中, 同时也带来了更多的安全风险。为了降低安全事故的发生概率, 越来越多的厂商开始重视轨道交通领域的功能安全, 并在招标文件中提出安全认证需求。

(朱一迪)