

超级电容储能式有轨电车充电装置 输出过电压分析及保护

邱 亮 王 晓 陶正华

(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 211106, 南京/第一作者, 工程师)

摘 要 海南三亚有轨电车示范线的有轨电车充电装置在恒压充电过程中频繁发生输出过电压故障。对输出电压进行实测,并对过电压原因展开分析。分析发现:在充电装置充电末期,一旦超级电容端电压超过 821 V 并持续 10 s,就会触发故障保护,高速断路器保护断开。通过分析定位过电压产生原因,最后提出解决建议。

关键词 储能式有轨电车;充电装置;过电压

中图分类号 TM862;U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.017

Analysis and Protection of Output Over-voltage for Energy Storage Tram Charging Device

QIU Liang, WANG Xiao, TAO Zhenghua

Abstract Since the over-voltage failure frequently occurred in constant voltage charging process of the charging device, which is installed in trams on Sanya Demonstration Line in Hainan Province, the output voltage is measured and the causes of over-voltage are analyzed. According to the analysis, at the charging end of the device, when the super capacitor terminal voltage is over 821 V for 10 s, the fault protection will be triggered and the high-speed breaker protection be disconnected. After detection of the over-voltage causes, solutions are proposed accordingly.

Key words energy storage tram; charging device; over-voltage

Author's address NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., 211106, Nanjing, China

储能式有轨电车常使用超级电容作为储能装置。广州市海珠区环岛新型有轨电车试验段线路是全球第一条采用超级电容作为储能电源的有轨电车线路,其列车最高运营时速为 70 km,每次充电时间小于 30 s,一次充电续航里程大于 2 km^[1]。由实际运营情况可知,超级电容具有功率密度大、充放电速度快、寿命长等优势,但其寿命受温度和过

电压影响比较大。因此,要严格控制超级电容的工作最高温度和工作电压,以满足其可靠性和安全性要求。

本文以海南三亚有轨电车示范线为例,对超级电容储能式有轨电车充电装置输出过电压故障情况进行分析,并提出电压保护建议,以解决充电装置的输出过电压故障问题。

1 储能有轨电车充电装置过电压分析

海南三亚有轨电车示范线车辆储能采用 1 290 F 车载超级电容。其最大充电电流为 1 700 A,工作电压为 616 ~ 820 V,上限电压为 850 V,有效储能达 47.6 kWh。车载超级电容充电先为恒流充阶段,采用 1 700 A 恒流充模式,当电压达到设定值时进入恒压充阶段,其充电模式转换为恒压充模式。有轨电车联调期间,在恒压充阶段即将结束时,充电装置曾频繁报输出过电压故障。

1.1 有轨电车充电回路拓扑结构

海南三亚有轨电车示范线车辆充电装置采用的多相交错 BUCK 拓扑结构如图 1 所示。

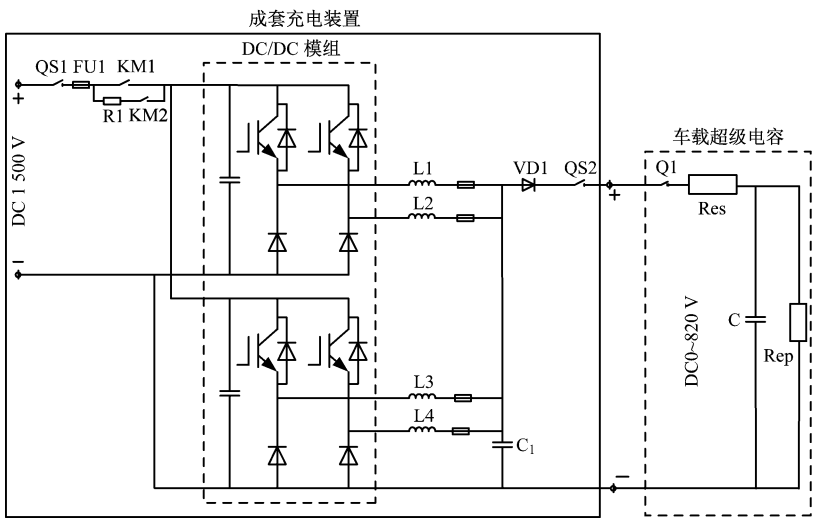
图 1 中:QS1 和 QS2 在正常运行时闭合,在维护时断开;R1 和 KM2 构成预充电回路,抑制直接并网时的冲击电流;滤波电抗器 L1 ~ L4,抑制输出电流纹波;滤波电容 C1 抑制输出电流纹波,并在超级电容切除时吸收电感上的能量。

车载电容等效模型采用 1 500 V 直流输入电压,并通过多相交错 BUCK 电路对车载超级电容进行充电。

1.2 充电装置输出过电压监测

图 2 和图 3 是通过后台监控软件录到的输出电压曲线和输出电流曲线。从图 3 可以看出,恒流充模式下充电装置的充电电流为 300 A。由图 2 可见,在输出电压 820 V 时充电模式转为恒压充模式,

并且在开始录波后 0.5 s 时出现了过电压,最高电 压约为 880 V。



注:KM 为主接触器;FU 为熔断器;QS 为主隔离开关;Res 为等效串联电阻;Rep 为介质损耗等效并联电阻;C 为理想电容器;L 为滤波电抗器;VD 为防反二极管;Q 为直流高速断路器

图 1 有轨电车充电回路拓扑结构

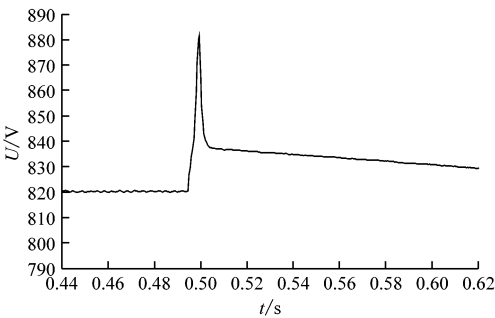


图 2 后台监控软件输出的电压曲线

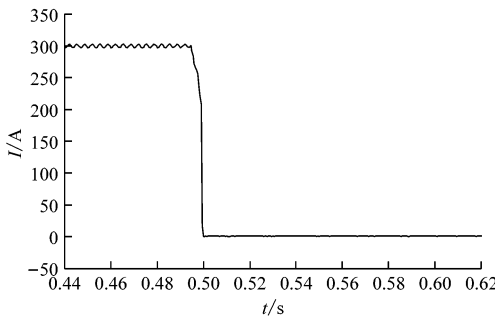


图 3 后台监控软件输出的电流曲线

图 4 是用示波器监测到的输出电压曲线。由图 4 可见,输出电压达 820 V 后出现了电压突升,电压峰值约为 900 V。这与后台监控软件录波的波形特征一致。当控制器发出“输出过电压故障”警报,则充电装置停止运行,等待复位指令。即使设定不同的恒流充电电流值,也仍然出现类似的故障。

1.3 充电装置输出过电压分析

经分析,可能导致输出过电压的情况有:① 桥

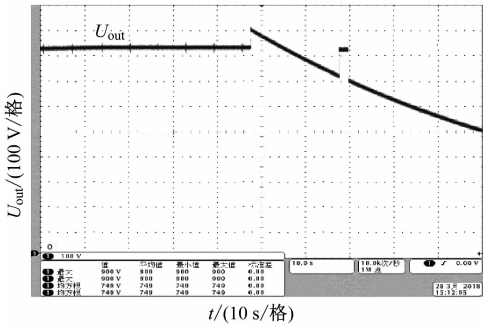


图 4 示波器监测的输出电压曲线截图

臂上管 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)因故障被击穿,进而发生直通;② 雷击导致过电压;③ 充电过程中负载突变或负载切除。

经调查,联调期间线路范围没有打雷,故排除了雷击的可能。进一步分析发现,发生过电压故障期间,输出电压 U 在 0.1 s 内由 820 V 升高到 880 V,输出电流 I 在此期间由 300 A 降为 0。输出电容 C 为:

$$C = \frac{\int I \times dt}{dU}$$

(1)

由式(1)计算可得, $C=0.25\text{ }\mu\text{F}$,与输出滤波电容容值接近,且远小于车载超级电容额定电容值 1 290 F。由此初步判断,充电过程中发生了负载突变或负载切除,从而导致输出过电压。

经调查,有轨电车在整个充电过程中没有运动或离站,输出回路也没有出现开路。观测有轨电车载超级电容状态发现,在充电过程中,车载超级

电容输入保护用高速断路器 Q1 发生了保护断开。由于高速断路器采用自动重合闸逻辑,其断开一定时间后会自动合闸,故超级电容再次充电时,在恒流充阶段可以正常充电,但在恒压充阶段,电压达到 820 V 左右时又会保护断开。这样就给故障定位造成了干扰。

经了解,在充电装置充电末期,一旦超级电容端电压超过 821 V 并持续 10 s,就会触发故障保护门限,高速断路器保护断开。

2 储能式有轨电车充电装置过电压保护措施

2.1 过电压保护常规措施

针对输出过电压产生的三种情况,可采取不同的过电压保护措施。对于雷击过电压,可通过配置输入输出防雷器进行抑制。对于桥臂直通产生的过电压,以及负载突变或切除产生的过电压,可通过图 5 或图 6 的过电压保护结构进行抑制。有源钳位型过电压保护结构(如图 5 所示),可通过钳位二极管把负载切除后滤波电感储存的能量回馈到输入直流母线,可有效地将输出端电压限制在 1 500 V 左右(忽略钳位二极管上的压降)。吸收电容型过电压保护结构(如图 6 所示),将滤波电容兼作吸收电容,以吸收负载切除后电感上储存的能量,其电压峰值跟电容值负相关。

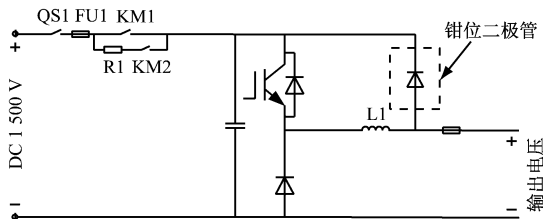


图5 有源钳位型过电压保护结构

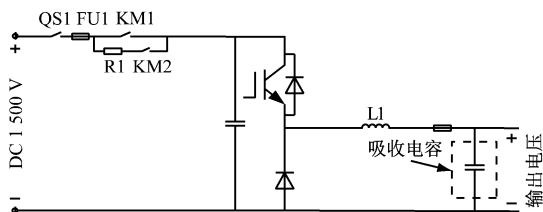


图6 吸收电容型过电压保护结构

2.2 联调问题解决措施及建议

根据车载超级电容厂家的相关资料,引起高速断路器保护断开的条件有:① 车载超级电容输入端

电压 ≥ 821 V,且持续时间不小于10 s;② 车载超级电容单体电压超过3.95 V;③ 车载超级电容温度超过55℃。

解决措施为:① 车载电容厂家修改高速断路器过压保护滤波参数,避免因为干扰导致高速断路器误动作;② 修改充电装置恒压充电持续时间 < 10 s。采用这2个解决措施后,多次充电过程验证,没有再报出输出过电压故障。

由于储能式有轨电车和充电装置之间没有信号交互,所以在后期投运后,有可能出现充电过程中有轨电车离站的情况。如充电装置在这种情况下,报出输出过电压故障,则充电装置会停止运行,需要手动复位才能重新运行。为避免这种情况,可以在控制逻辑上加入输出电压变化率 dU/dt 作为判据。当 $dU/dt < \text{门限值}$ 时,判断为输出过电压,充电装置发故障警报;当 $dU/dt \geq \text{门限值}$ 时,出现输出过电压充电装置不报故障。 dU/dt 的门限值需要作深入研究选择。

3 结语

海南三亚有轨电车示范线使用超级电容储能式有轨电车,在充电过程中其充电装置频繁报警输出过电压故障。本文分析了过电压产生的原因及定位问题,并给出解决措施。经现场应用实践,充电装置在1 700 A恒电流充电时,再也没有报出输出过电压故障,证明该解决措施是有效的。本文还针对有轨电车在充电时突然离站的情况,给出了后续整改建议,在控制逻辑上加入输出电压变化率 dU/dt 作为判据,以避免充电装置误报输出过电压。

参考文献

- [1] 赵军. 基于超级电容的新型有轨电车充电系统研究与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 20.
- [2] 戎琳, 田炜, 孙祖勇, 等. 超级电容有轨电车充电装置系统研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(10): 71.
- [3] 黄静. 超级电容有轨电车充电回路的保护[J]. 城市轨道交通研究, 2018(1): 113.
- [4] 张文波, 田炜, 孙祖勇, 等. 储能式有轨电车的新型充电系统研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(1): 58.
- [5] 朱青华, 冯宪瑞. 基于超级电容原理的车载储能装置的应用分析[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(3): 90.
- [6] 付裕博. 有轨电车超级电容储能系统参数研究及仿真[J]. 仪器仪表用户, 2017, 24(4): 27.

(收稿日期: 2018-05-03)