

上海轨道交通15号线供电系统综合联调方案及优化措施

唐文清

(上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 200070, 上海//工程师)

摘要 按照交通运输部颁布的交办运[2019]17号第四十条对城市轨道交通供电系统功能在初期运营前的检验要求,基于上海轨道交通15号线供电系统综合联调的实施情况,对相邻主变电所支援供电测试、牵引接触网越区供电测试、变电所0.4 kV低压备用进线自动投入装置测试等项目,分别阐述了其测试目的、测试内容及步骤、测试难点、评价标准及测试结果,并提出了有针对性的优化措施。

关键词 城市轨道交通; 供电系统; 综合联调; 供电测试

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.048

Comprehensive Joint Commissioning Plan and Optimization Measures for the Power Supply System of Shanghai Rail Transit Line 15

TANG Wenqing

Abstract Based on Article 40 of JBY [2019] No. 17 issued by the Ministry of Transport on the inspection requirements for the functions of the urban rail transit power supply system before initial operation, and based on the implementation of the comprehensive joint commissioning of the power supply system of Shanghai Rail Transit Line 15, in terms of the adjacent main substation supporting power supply test, traction catenary cross-region power supply test, substation 0.4 kV low-voltage backup self-switching device and other test items, the test purpose, test content and steps, difficulties, evaluation criteria and test results are expounded respectively, and targeted optimization measures are put forward.

Key words urban rail transit; power supply system; comprehensive joint commissioning; power supply test

Author's address Shanghai Shentong Rail Transit Research & Consultancy Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

上海轨道交通15号线(以下简称“15号线”)全长约42.3 km,共设30座地下车站,是国内首条开通即具备GoA4(无人干预列车运行)的大运量城市轨道交通线路。本文结合交通运输部交办运

[2019]17号《交通运输部办公厅关于印发〈城市轨道交通初期运行前安全评估技术规范 第1部分:地铁和轻轨〉的通知》第四十条对供电系统功能检验的要求,通过介绍15号线新线建设期间开展的供电系统综合联调工作实施情况,重点对相邻主变电所支援供电测试、牵引接触网越区供电测试及变电所0.4 kV低压备用进线自动投入装置测试等联调方案进行分析,针对性地提出相应的联调方案,并总结了实际操作中的难点及优化措施。

1 相邻主变电所支援供电测试

15号线全线共设3座主变电所、2座35 kV开关站。由于主变电所相互支援供电测试的内容及方案大致相同,下文以虹梅路主变电所支援元江路主变电所测试为例进行论述,其供电测试示意图如图1所示。

1.1 测试目的

1) 检验1座主变电所因故解列时,相邻主变电所能否同时负担解列主变电所牵引和动力照明的一、二级负荷。

2) 在支援供电期间,检验供电系统设备是否能够持续稳定、可靠地运行,如主变压器的负载率、环网联络电缆的负载电流、中压环网线路末端的电压损失等是否满足设计、标准要求。

3) 检验运营调度人员在1座主变电所解列时的应急处置能力,并测试从正常供电模式切换到支援供电模式的用时。

1.2 测试内容及步骤

1) 模拟元江路主变电所2#主变压器故障,对元江路主变电所的相关开关设备及继电保护作预定操作,使元江路主变电所的单台主变压器退出运行且其35 kV母线系统保持正常。

2) 操作环网联络开关,由相邻的虹梅路主变电

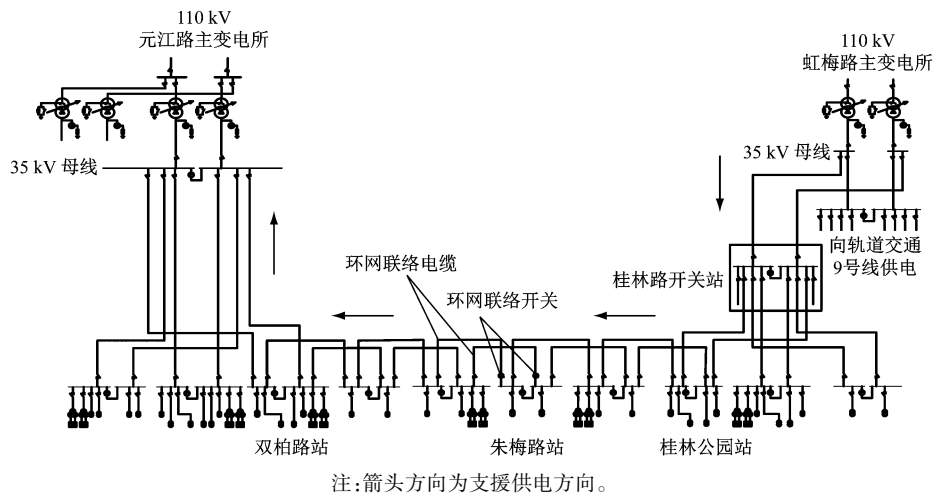


图1 虹梅路主变电所向元江路主变电所支援供电测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Hongmei Road main substation supporting power supply to Yuanjiang Road main substation

所向元江路主变电所支援供电,保持该运行方式1~3 d,记录支援供电期间测试区段的供电情况。

1.3 测试难点

1) 模拟解列的主变电所在清负荷过程中会导致下级车站变电所35 kV母排短时失电,进而造成所辖混合变电所牵引整流机组短时失电。此时该接触网供电区段将由相邻牵引变电所进行短时单边供电,单边供电期间该区段的牵引供电能力及供电可靠性将有所下降。

2) 倒闸过程中会导致下级变电所400 V母排瞬时失电,测试前需确认车站重要负荷的应急电源装置已投入使用且功能正常。相关专业人员应在测试期间进行设备保驾,以确保设备切换正常。

3) OCC(运营控制中心)电力监控系统遥控、遥信功能应完成测试并投入使用。若OCC电力监控系统不具备远程控制功能,将导致测试时长增加,不利于保障供电设备的可靠性。

1.4 评价标准

1) 供电系统的中压网络应按列车运行的远期通过能力设计。对互为备用的供电电力线路,当一路退出运行时,另一路应承担其一、二级负荷的供电,线路末端电压损失不宜超过5%。

2) 从正常供电方式调整为非正常供电方式后,所有环网变电所开关的继电保护定值组切换正常,整定值满足要求,开关未发生误动作。

3) 倒闸操作流程尽可能简化,以保证供电系统能够简单、快速地恢复正常供电。

1.5 测试结果

虹梅路主变电所支援供电期间,元江路主变电

所对应主变压器的负载率约为13%~17%,35 kV环网末端电压约为35.44~35.82 kV,中压环网线路末端的电压损失未超过5%。朱梅路站环网联络电缆的负载电流约为20.72~81.57 A。测试结果符合设计、标准要求。

1.6 优化措施

1) 建议在测试时正线接触网可采取越区供电方式,即相邻牵引变电所通过本所1500 V直流母排进行越区供电,以减少对正线列车牵引系统的影响。

2) 在试运行期间,因正线的行车对数较少,车站环控等设备也因调试等原因无法正常开启,设备运行状态很难达到初期运营条件。应尽可能在最大行车密度和低压满负荷运行方式下进行测试,以验证供电系统的能力和供电设备功能是否满足设计要求。

3) 在测试过程中,需要将解列主变电所所辖范围内的变电所下级负荷全部清除。相比一次性切断或恢复所有电源的方式,该方式带负荷分合闸产生的冲击电流较小,不易产生系统振荡或设备损坏。但在城市轨道交通正式运营后若发生此类突发供电故障,应最大限度缩短电源恢复时间。建议测试时不清除下级负荷,以减少操作步骤,保证测试方法更贴合开通后的实际运营需求。

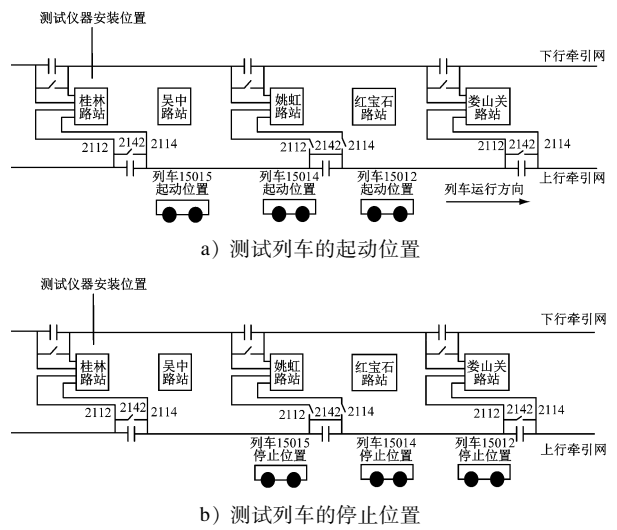
4) 在新线建设阶段,电力调度(以下简称“电调”)没有正式接管设备。在此期间若开展相关测试,电调人员出于对安全责任的考量,往往不会主动参与测试。而测试采用的操作方式及应急措施将作为以后此类突发故障处理的依据,因此,电调

有必要在调试阶段进行实际的操作。

2 牵引接触网越区供电测试

15 号线全线共设 18 座牵引变电所,其中:正线牵引变电所的平均间距为 2.783 km,最大间距为 3.530 km,大双边供电的最大距离为 6.607 km。

本次牵引接触网越区供电测试选择在桂林路站—娄山关路站的上行区间(距离约为 5.296 km)展开。测试使用了 3 列车,其车底号分别为 15012、15014、15015(以下简称“列车 15012”、“列车 15014”、“列车 15015”)。列车的行进路线如图 2 所示。



注:2112——上网隔离开关;2114——上网隔离开关;2142——越区隔离开关。

图 2 牵引接触网越区供电测试列车的启动及停止位置
Fig. 2 Starting and stopping position of traction catenary cross-region power supply test train

2.1 测试目的

- 1) 模拟多车运行工况,检验大双边供电运行方式下牵引电压和电流等是否符合设计要求。
- 2) 检验 DC 1 500 V 开关整定值设置的合理性。

2.2 测试内容及步骤

- 1) 模拟解列姚虹路站牵引变电所,由电调遥控操作测试区间相关变电所直流馈线开关。确认桂林路站—娄山关路路上行为大双边供电模式。
- 2) 牵引接触网越区供电测试前,由行车调度(以下简称“行调”)将列车 15012 停在红宝石路路上行站台、列车 15014 停在姚虹路路上行站台、列车 15015 停在吴中路路上行站台。

3) 在桂林路站安装并调试直流测试仪。该测试通过在 DC 1 500 V 上网电缆处加装直流互感器并外接直流电流测试仪的方式,记录列车运行的电流波形。直流测试仪的接线方式如图 3 所示。

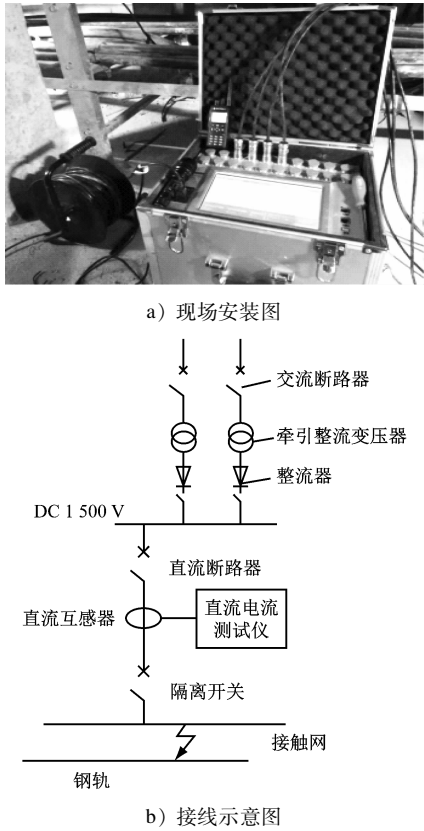


图 3 直流测试仪的现场安装及接线方式
Fig. 3 On-site installation and wiring of DC test instruments

5) 行调通过通信设备同时向 3 列测试列车的司机发出列车启动命令,司机受令后同时以全牵引力启动列车。运行过程中,列车车速升至正常运行规定的时速。列车 15012 运行至娄山关路上行站台停车待命,列车 15014 运行至红宝石路上行站台停车待命,列车 15015 运行至姚虹路路上行站台停车待命。列车就位后,司机通知行调。

6) 确认测试变电所内参数记录完毕后,测试人员拆除直流电流测试仪,并向电调汇报测试情况。由电调遥控操作相应开关,倒回正常供电方式,并通知行调供电方式已恢复正常。行调指挥试验列车有序回库。

2.3 测试难点

- 1) 要求测试列车统一布置在同一个大双边供电区域内。由于列车前后间距较短,所有参与测试的列车均应具备 ATP(列车自动防护)功能。

2) 当直流馈线距离较长且行车密度较大时,有可能出现最大负荷电流大于末端短路电流的情况,还有可能出现列车起动时最大电流变化率大于等于线路远端电流变化率的情况,进而导致直流开关跳闸。此时基于安全考虑,各列车应缓慢停车待命,并记录相关数据,以此作为调整电流增量保护、电流上升率保护的定值的依据。

3) 测试过程中 OCC 行调与电调须相互配合协作,变电所测试组人员与列车司机通过无线对讲机等通信设备保持良好沟通。列车司机根据调度指令将列车停在指定位置,待行调下达列车牵引起动命令后,测试列车必须同时起动,这样才能测得对应直流馈线开关的最大电流值,因此,测试时要求司机精神集中、操作娴熟。

2.4 评价标准

1) 当正线的中间牵引变电所退出运行时,应由相邻的两座牵引变电所依靠其两套牵引整流机组的过负荷能力实施大双边供电。在大双边供电情况下,牵引供电系统允许的电压波动范围为 1 000 ~ 1 800 V。

2) 直流保护系统应保证在列车正常运行时不会因误跳闸而影响列车的正常运行。

2.5 测试结果

当姚虹路站牵混所退出运行、桂林路站—娄山关路站上行接触网实行大双边供电时,模拟 3 列测试列车同时全牵引起动,得到的测速波形如图 4 所示。由图 4 可知:牵引网最低电压为 1 569 V,在允许的电压波动范围内(1 000 ~ 1 800 V);最大牵引电流为 3 520 A,未对直流设备造成影响(无保护跳闸)。牵引电压和电流均符合设计要求。

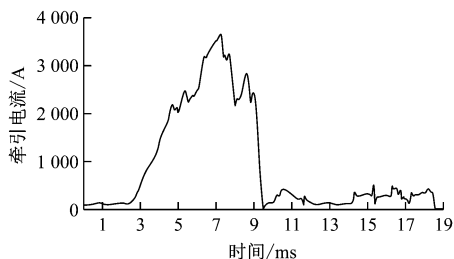


图 4 牵引接触网越区供电测试波形

Fig. 4 Traction catenary cross-region power supply test waveform

2.6 优化措施

应尽可能选取线路轨行区最大坡道处进行测试,列车应由坡底向坡顶方向行驶,且测试列车均

应在 AW3(满座 + 9 人/m² 超常载荷)工况下进行此项测试。

3 变电所 0.4 kV 低压备用进线自动投入装置功能测试

3.1 测试目的

1) 检验 0.4 kV 分段开关的备用进线自动投入装置(以下简称“备自投”)的功能是否满足设计、标准要求及运营需求。

2) 检验供电模式切换时是否会对其他系统的正常运行造成影响,其他系统包括信号、通信、FAS(火灾报警系统)、EMCS(机电设备监控系统)、AFC(自动售检票)系统、通风空调、给排水、动力照明、电扶梯、站台门等。

3.2 测试内容

1) 任选 1 座车站降压变电所,在正常运行状态下模拟 I 段动力变压器的温控跳闸继电器动作, I 段动力变压器的 35 kV 断路器跳闸失电,0.4 kV 的 I 段进线断路器跳闸,0.4 kV 的 I 段母线失电。同时,0.4 kV 母线三级负荷断路器自动分闸。

2) 经延时 2 ~ 3 s(延时依据设计要求确定)后,0.4 kV 母线联络断路器自动合闸,0.4 kV 的 I、II 段母线均通过 II 段动力变压器供电。

3) 合上 I 段动力变压器的 35 kV 断路器, I 段动力变压器送电,0.4 kV 母线联络断路器自动分闸。然后合上 0.4 kV 的 I 段进线断路器,0.4 kV 的 I 段母线由 I 段动力变压器供电。同时,0.4 kV 母线三级负荷断路器手动或自动合闸,系统恢复正常运行状态。

4) 记录测试操作过程和相关电能参数。

3.3 测试难点

1) 测试过程中需记录备自投切换过程的动作次序和间隔时间,其中对开关动作间隔时间的采集精度要求较高。

2) 若 0.4 kV 低压备自投切换失败,将导致 0.4 kV 的某段母线短时失电,因此,测试前需确保变电所 0.4 kV 出线的重要负荷双电源切换装置已完成调试并投入使用,必要时安排专业技术人员保驾。测试结束后,应确认下级用户设备状态是否正常。

3.4 评价标准

1) 当变电所 1[#]/2[#]进线断路器非故障失压时,该进线断路器可自动分闸,三级负荷分闸,母联断

路器合闸,由另一路进线电源为车站变电所内所有的一、二级负荷供电;当电源恢复时,系统可自动恢复至正常的供电状态。0.4 kV 低压备自投自动切换功能正常。

2) 0.4 kV 低压备自投切换过程的动作次序和时间符合设计要求。如图 5 所示,15 号线 0.4 kV 开关柜设备控制逻辑如下:①正常情况下,进线断路器均为合闸状态,母联断路器处于分闸状态,三

级负荷总开关为合闸状态;②当 1[#]/2[#]进线断路器发生失压,延时大于 $t+0.5\text{ s}$ (t 为该变电所 35 kV 母联柜检母线无压延时定值)时,此进线断路器分闸,三级负荷总开关自动分闸,母联断路器合闸;③当进线回路电压恢复时,母联断路器分闸,此进线断路器合闸,三级负荷总开关手动合闸;④当 2 个进线回路同时失电时,1[#]/2[#]进线断路器分闸,母联断路器分闸,三级负荷总开关自动分闸。

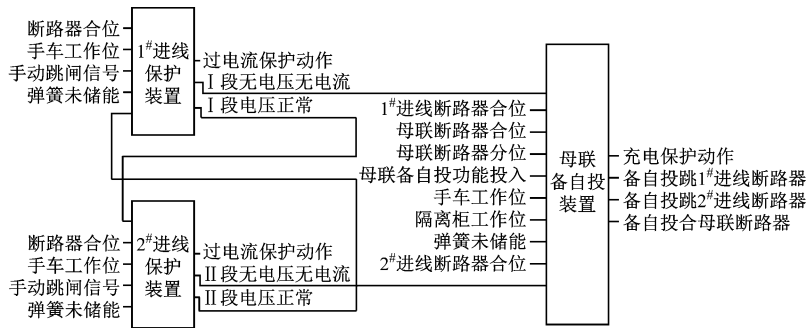


图 5 400 V 开关柜备自投装置逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of 400 V switchgear with automatic switching device

3.5 测试结果

在全线各降压变电所、混合变电所、跟随变电所 0.4 kV 低压备自投测试过程中,备自投的自动切换功能、切换过程动作次序、切换时间,以及切换过程中的电能参数、三级负荷回路的切除功能等,均符合设计、标准要求。

3.6 优化措施

1) 按常规继电保护整定原则,0.4 kV 母联备自投时间较本所 35 kV 母联备自投时间多 0.5 s,建议将 35 kV 分段备自投功能验证与 0.4 kV 低压备自投功能验证相结合,以验证 0.4 kV 母联备自投时间与 35 kV 备自投时间的匹配性。

2) 切换过程的时间通常采用变电所综合自动化或中央级综合监控系统的报文显示时间,但由于网络传输可能存在一定的延时,所以该时间计量方式并不十分准确,与实际开关动作间隔时间存在一定的误差。因此,建议使用专业的继电保护测试仪进行测试。

3) 0.4 kV 低压备自投功能是该设备的一项重要功能,因此在功能设计时需要综合考量,结合不同运营模式的需求,在保证功能可靠的前提下尽量优化联锁条件,设置合理的延时,以确保程序简洁高效,保证设备的稳定运行。

4 结语

城市轨道交通初期运营前安全评估对供电系统进行的功能核验,是检验供电系统稳定性、可靠性的必要措施,也是城市轨道交通线路开通后安全运营的重要保障。本文基于交运为[2019]17 号关于供电系统功能验证的相关要求,提出了相应的功能验证方案及优化建议。其他设备系统同样有必要进行类似的梳理和归纳,进而形成一套完整的适用于城市轨道交通各设备系统初期运营前的调试标准。

参考文献

- [1] 孙陈勇.城市轨道交通供电系统综合联调项目研究[J].城市轨道交通研究,2017(5):74.
SUN Chenyong. Research on the united test project of urban rail transit power supply system [J]. Urban Mass Transit, 2017 (5):74.
- [2] 唐文清.上海轨道交通 15 号线工程供电与相互关联系统联调联试报告[R].上海:上海申通轨道交通研究咨询有限公司,2020.
TANG Wenqing. Joint commissioning and test report of Shanghai rail transit line 15 project power supply and interrelated systems [R]. Shanghai: Shanghai Shentong Rail Transit Research & Consultancy, 2020.

(收稿日期:2021-09-18)