

突发灾害下城市轨道交通牵引供电系统的适用性分析

林 珊 王洪杰**

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 牵引供电系统及设备的完整性是列车正常运行的前提保障。以广州“5.22”突发特大暴雨灾害对广州地铁13号线牵引供电系统造成的损坏为例,对受损条件下恢复运营的系统及设备适用性和可行性进行了分析,提出了尽快恢复全线正常供电和牵引供电设备抢险复原的措施及方案,给出了突发灾害下城市轨道交通牵引供电系统保证运营适用性的应急处理思路。

关键词 城市轨道交通;牵引供电系统;突发灾害;适用性
中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.036

Adaptability Analysis of Traction Power Supply System in Urban Rail Transit under Sudden Disaster

LIN Shan, WANG Hongjie

Abstract The integrity of traction power supply system and its equipment are the prerequisite guarantee of train normal operation. Taking the damage of Guangzhou Metro Line 13 traction power supply system caused by sudden heavy rainstorm disaster on May 22 as an example, the adaptability and feasibility of the system and equipment to resume operation under such damaged conditions are analyzed, and emergency recovery measures and plans for traction power supply equipment to ensure the restoration of normal power supply across the line quickly are proposed. Emergency treatment ideas for urban rail transit traction power supply system to ensure operational adaptability under sudden disasters are presented.

Key words urban rail transit; traction power supply system; sudden disaster; adaptability

Author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

城市轨道交通作为大容量的公共交通工具,在突发灾害下其供电系统的适用性关系到列车的运行、人员的疏散和环境的安全等关键问题。目前,对城市轨道交通供电系统正常方式下的供电可靠

性的研究相对较多,如文献[1]通过仿真计算的方法对配电网进行可靠性评估,文献[2-3]给出了提高配电网可靠性的方法和措施。以上研究多关注城市轨道交通供电系统在正常运行方式下的可靠性分析,较少涉及在突发灾害下的适用性研究。

本文以广州地铁13号线为例,分析了“5.22”特大暴雨灾害对个别变电所牵引供电设备造成极其严重损坏情况下的供电系统供电能力和适用性,并结合后续恢复运营及抢险救灾的过程,对城市轨道交通运营牵引供电系统抗灾救灾给出相应的建议。

1 广州地铁13号线牵引供电系统概况

广州地铁13号线(首期工程)线路全长约27.03 km,共设置11座地下车站。其在官湖站南侧设置1座车辆段(含运营控制中心),设置2座主变电所(墩美和官湖);采用A型车8辆编组,最高运行速度为100 km/h。当前开通试运营期,行车对数为8对/h。供电系统采用110/33 kV两级电压制的集中供电方式,牵引供电系统采用直流1 500 V供电;全线所有车站及车辆段设置牵引降压混合变电所,采用架空接触网供电。

2 突发灾害下广州地铁13号线牵引供电系统的适用性分析

2.1 突发洪水灾害概况

2020年5月21日,广州市突降特大暴雨,新塘镇3 h最大降雨量达297 mm。大量水体聚集形成局部地区洪水,致地铁车站周边路面水深最大达1.85 m。受此影响,广州地铁13号线官湖站和新沙站等车站外出现区域性水淹,导致洪水倒灌至官湖站、新沙站及新塘站—官湖站、官湖站—新沙站区间隧道,短时间内淹没了官湖站、新沙站及部分

区间隧道。广州地铁 13 号线自 5 月 22 日起全线暂停运营。5 月 29 日起,鱼珠—沙村段恢复对外单一交路运营;6 月 13 日起,官湖—新沙段全线恢复对外运营。

2.2 受损牵引供电系统供电能力分析

由于广州地铁 13 号线客流量较大,在完成车站及区间抽水后应尽快恢复对外运营,以减小社会影响。鉴于官湖站、新沙站两站变电所供电设备受损严重,短时间内难以修复或更换,在对接触网完成清洁检修之后,暂不具备双边供电条件,仅存在大单边运行可能性,故按此方式对其供电能力进行核算并做适用性分析。

2.2.1 牵引供电能力核算原则

1) 直流牵引供电系统的电压及其波动范围应符合表 1 的规定^[4]。

表 1 直流牵引供电系统的电压及其波动范围		
电压标称值/V	电压最高值/V	电压最低值/V
750	900	500
1 500	1 800	1 000

2) 正常双边供电运行时,站台处走行轨对地电位不应大于 120 V,车辆基地库线走行轨对地电位不应大于 60 V。当走行轨对地电压超标时,应采取短时接地措施。

3) 非故障区段(鱼珠站—新塘站),按正常运行速度及发车间隔(高峰期 8 对/h)正常运行。

4) 故障区段(新塘站(不含)—新沙站)按以下临时供电运行方式分别进行核算:①新塘车辆段牵引变电所向线路末端大单边支援供电;②官湖车辆段牵引变电所向正线支援供电(出入线正线接入点位于官湖站),与新塘牵引变电所构成双边供电,同时向新沙站方向单边支援供电。

5) 在上述供电运行方式下,故障区段(新塘站(不含)—新沙站)按以下列车运行方式分别进行核算:①在无法满足水淹前正常运行高峰期 8 对/h 的行车间隔时,行车对数从 8 对/h 起逐级核减;②在无法满足正常运行列车最高运行速度 100 km/h 时,最高运行速度从 100 km/h 起逐级核减。

2.2.2 牵引供电能力核算结果

1) 广州地铁 13 号线列车采用 8 节 A 型车编组,最高运行速度为 100 km/h。根据车辆参数,单列车最大起动电流约为 5 700 A。新塘站—新沙站区段若按最高速度 100 km/h 运行,当该区段内只有

1 列车运行,并考虑该列车在最远端的新沙站启动且新塘站向新沙站单边(约 5 km)供电时,刚性接触网及钢轨上造成的电压损失约为 660 V。新塘车辆段牵引变电所整流机组的空载电压实际值为 1 630 V,即使以该电压值压降核算,亦无法满足列车在新沙站末端启动的需求;同时新塘站—白江站方向的牵引负荷将进一步压低新塘车辆段牵引变电所直流母线的电压,即新塘车辆段牵引变电所向线路末端单边支援供电无法支撑 1 列车以最高运行速度 100 km/h 运行。故列车运行只能采取从 100 km/h 起逐级核减最高运行速度的方式核算。

2) 为减小列车起动时的最大起动电流,应避免列车达到最大起动电流速度值。经与车辆厂家沟通得知,广州地铁 13 号线 8A 编组列车的最大起动电流出现在列车加速到约 45 km/h 时,在新塘向新沙大单边供电的工况下,车辆应限速在 45 km/h 以下。同时,由于新塘站—新沙站区段长约 5 km,为避免此区段内同时出现 2 列车在此供电臂内运行而导致牵引网网压进一步被拉低,应加大行车间隔使此区段在同一时刻内仅有 1 列车运行。按照最高限速值为 40 km/h 粗略估算,1 列车由新塘站匀速运行至新沙站并折返至新塘站约用时 15 min,因此核算此区段行车对数最大为 4 对/h,最高行车速度应不高于 40 km/h。

(1) 新塘站—新沙站区段按 4 对/h 的发车间隔并限速运行,仿真核算结果显示其末端牵引网网压可以得到大幅改观(具体结果见表 2)。由计算结果可知:限速 40 km/h 时,末端最低网压已跌至接近 1 000 V;同时考虑新塘站—白江站方向牵引负荷波动,限速 40 km/h 运行时存在牵引网网压跌至 1 000 V 以下的风险。通过以上计算分析,新塘车辆段牵引变电所向线路末端采用大单边支援供电时,在新塘站—新沙站区段车辆限速 35 km/h 的情况下,可保证 4 对/h 的行车需求。但此时钢轨电位高达 180 V,存在一定运行风险。

表 2 不考虑列车限功限流的计算结果		
限速值/(km/h)	牵引网最低电压/V	钢轨最高电位/V
25	1 237	122
30	1 144	157
35	1 083	180
40	1 021	199

图 1 为列车限流示意图。由图 1 可知,列车在

牵引网网压偏低时将自动限流或限功以降低加速度。结合车辆厂家有关数据可知,广州地铁 13 号线列车限流或限功的牵引网网压范围为 1 000 ~ 1 350 V。

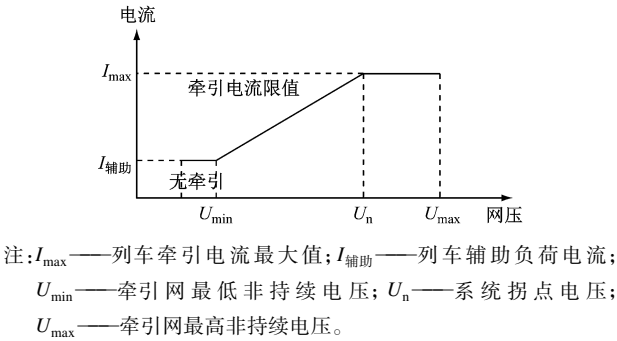


图 1 列车限流示意图

(2) 新塘站—新沙站区段按 4 对/h 发车间隔并限速运行,同时考虑列车在牵引网网压偏低时自动限流或限功。经进一步仿真计算,其结果如表 3 所示。由表 3 可知,采取降速措施后,牵引网网压得到了一定改善,基本可满足列车正常运行的要求。但在车辆限速 40 km/h 工况下,新沙站钢轨电位仍高达 139 V。考虑到官湖站和新沙站的钢轨电位泡水后无法正常工作,为保证乘客安全,列车运行最高速度宜取 35 km/h。广州地铁根据 13 号线区间抢险完成后动车试验结果显示,按照以上限速和行车对数测试时,牵引网压基本维持在 1 300 ~ 1 400 V,基本与仿真结果一致。

表 3 考虑列车低压限功限流的计算结果		
限速值/(km/h)	牵引网最低电压/V	钢轨最高电位/V
30	1 409	78
35	1 311	97
40	1 246	139

3) 官湖车辆段接入正线官湖站,当该车辆段向正线支援供电时,可在一定程度上改善牵引网电压及钢轨电位;但由于经出入段线供电时供电距离长约 2 km,对正线末端网压改善效果有限,同时会引起车辆段咽喉区的轨电位升高。本线在设计之初,由于正线供电质量良好,未考虑车辆段向正线支援供电能力的需求,因此官湖车辆段出入段线的载流能力未考虑支援正线的工况。官湖站右线连接出段线,出段线接触网为刚性接触网连接双承双导接触网,双承双导接触网直接架设至试车线上网电缆处,支援正线时的电流通路不会受到接触网载流量

的限制;官湖站左线接入段线,入段线接触网为刚性接触网连接双承双导接触网,双承双导在咽喉区处即转换为单接触线;单接触线连接上网电缆,车辆段支援正线工况下的接触网载流量需求在 650 A 以上,单接触线载流量无法满足要求,则需将车辆段入段线路径上的部分供电分区并联(即短接咽喉区部分分段绝缘器),以加大入段线至上网电缆处的接触网载流截面。由于此方案存在实施难度较大及扩大事故范围的问题,因此,不推荐采用官湖车辆段牵引变电所向正线支援供电的方式。

3 突发灾害后广州地铁 13 号线供电系统的供电恢复

“5.22”特大暴雨灾害发生后,广州地铁统筹各方物资及相关单位,秉承“先通后复”的原则,积极开展抢险恢复工作。供电专业根据运营恢复供电需求对供电设备按轻重缓急逐步恢复,主要抢险措施及方案如下。

3.1 变电设备恢复

根据各用电设备恢复供电的迫切性,结合备品备件和设备采购情况,排列出设备恢复优先等级:首先,组织完成恢复官湖站、新沙站 0.4 kV 供电系统,为车站内重要负荷(通信、信号、照明、风机等)供电,保障各专业抢险用电需求,保障第一阶段运营恢复;其次,恢复新沙站直流牵引供电系统,实现新塘站—新沙站大双边供电,确保牵引供电可靠,尽早恢复水淹前正常运行图的运营组织;最后,逐步实现各电压等级剩余设备的正常供电。

受损供电设备在线网库存有备品备件时,优先利用备件进行更换;对无备品备件的受损设备,则进行现场修复或采购新备件替换:新沙、官湖动力变压器利用既有备件及新线备件完成更换,新沙整流变压器使用备件替换,整流器使用挂网试验整流器替换,其余无备件设备逐级进行现场修复或采购到货后替换。

针对设备修复,根据厂家建议,若一次部分耐压试验合格,可不用更换,仅更换既有供电设备二次部分;一次高压电缆本身就具有防水功能,不用更换,电缆头清洁后进行耐压试验结果再确定是否更换;二次控制电缆及通信线缆全部更换。具体设备修复方案主要如下:

1) 33 kV GIS(气体绝缘开关柜)修复:①二次室内损坏元器件申购备件更换;②继保装置申购新

备件更换;③三工位操作机构驱动电机及二次端子重新更换,其余机械部分根据实际情况进行清理或更换零部件;④断路器操作机构的驱动电机及二次端子重新更换,其余机械部分根据实际情况进行清理或更换零部件;⑤带电显示装置使用新备件更换;⑥其余一次带电部分无需更换。

2) 干式变压器修复:①变压器铁芯现场清理;②现场更换铁芯夹件绝缘部件;③现场更换高、低压绕组。

3) DC 1 500 V 开关柜修复:仅保留一次母排,其余部分全部更换。

4) 整流器修复:整套采购新设备更换。

3.2 接触网设备恢复

接触网恢复方案相对简单:

1) 对上下行刚性接触网汇流排、接触线和绝缘部件等进行清扫、擦拭、烘干并进行绝缘测试;

2) 对隔离开关操作机构箱进行整体更换,隔离开关刀闸本体被水浸泡,先对其进行擦拭、烘干后,再进行绝缘测试;

3) 回流箱设备先进行擦拭、清扫和烘干,再做绝缘测试;

4) 杂散电流监测传感器及监测装置整体更换。

3.3 设备运维

供电设备恢复供电后,为保证设备安全可靠运行,应制定相应的加密检修标准并执行。变电专业检修周期由年检变为半年检,对电缆头等关键部位采取加密热成像监测等措施。接触网专业检修周期由半年检变为季检,对运行隐患较大的绝缘部件按要求进行绝缘性能抽样送检等。

4 结语

突发灾害下城市轨道交通牵引供电系统的适用性是实现列车应急运行的保证。突发灾害后快速的供电恢复是恢复运营能力、减小灾害影响的重要措施。通过对广州“5.22”突发暴雨灾害后受损的广州地铁 13 号线牵引供电系统适用性进行相关计算和分析,为受损状态下尽早恢复运营提出了降级运营及限速限流的应对方案。同时,针对供电系统及设备抢险恢复,本文介绍了在尽量短的时间内,供电专业充分调配既有设备资源,按照供电恢复优先级逐步进行设备恢复及修复的方案措施,为城市轨道交通在突发灾害下的应急处理提供参考思路 and 应对经验。

参考文献

- [1] 赵绪杰,吉兴全,李可军,等.基于 Paladin DesignBase 的配电网可靠性评估与分析[J].电气技术,2014(5):16.
- [2] 李北辰.提高配电网可靠性管理水平措施的研究[J].电气技术,2013(8):63.
- [3] 李东.提高输变电设施可靠性指标的策略[J].电气技术,2013(1):94.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [5] 于明,郭华,潘珍,等.基于提升供电能力的配电网协调规划探析[J].电气技术,2015(10):107.
- [6] 叶咏梅.城市电网供电安全“N-1”准则的实践[J].供用电,1999(4):17.
- [7] 龚晓冬.城市轨道交通主变电所资源共享问题研究[J].城市轨道交通研究,2016(9):87.

(收稿日期:2021-03-22)

(上接第 164 页)

- [4] 何川,封坤,方勇.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].西南交通大学学报,2015(50):97.
- [5] 罗世培.地铁盾构隧道扩挖车站方案初探[C]//中国土木工程学会,中国公路学会,中国岩石力学与工程学会.第五届中日盾构隧道技术交流会议论文集.成都:西南交通大学出版社,2009:383.
- [6] 管攀峰,郭振坤,陈鸿,等.结合盾构法修建地铁车站方案综述[J].公路交通技术,2018(增刊):139.
- [7] 李围,何川,张志强,等.地铁车站盾构法综合法技术在我国的应用前景探讨[C]//中国土木工程学会,中国土木工程学会快速轨道交通委员会学术交流会地下铁道专业委员会第十四届学术交流会论文集.北京:中国科学技术出版社,2001.:337.
- [8] 曾鹏.盾构法结合 CRD 法建造地铁车站方案研究[D].北

京:北京交通大学,2011.

- [9] 张新金.盾构法与浅埋暗挖法结合建造地铁车站关键技术研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [10] 路美丽,刘维宁,孙晓静.盾构法、暗挖法结合修建地铁车站在我国的应用前景[J].都市快轨交通,2004(2):30.
- [11] 吴京华.基于盾构法的地铁车站断面形式与建筑布局研究[J].城市轨道交通研究,2020(5):34.
- [12] 刘洪波,吴迪.饱和软土敏感环境地铁车站的盾构法施工方案[J].城市轨道交通研究,2020(5):118.
- [13] 高毅,于少辉,李洋,等.大型地下空间的结构分割转换工法研究[J].隧道建设,2019(3):480.
- [14] 高毅,冯超元,程鹏.结构分割转换工法在地下空间开发中的应用及设想[J].隧道建设,2019(3):398.

(收稿日期:2020-01-11)