

城市轨道交通供电系统线间联络环网应用研究

王洪杰¹ 林 珊¹ 潘家颖²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州;

2. 佛山轨道交通设计研究院有限公司, 528315, 佛山//第一作者, 工程师)

摘 要 城市轨道交通供电系统一般采用集中供电方式, 每条线路设置多个主变电所作为供电电源, 并互相支援, 以满足供电可靠性。但各城市轨道交通线路经常受土建或主变电所建设进度影响, 在开通试运营时存在因供电电源点不足需设置临时电源的问题; 同时, 随着线网进入网络化运行阶段, 亦存在灵活调整线网供电方式的需要。根据城市轨道交通供电系统中压网络一般采用环网接线方式的特点, 结合工程实例, 分析了在换乘站设置线间联络环网的必要性及可行性, 提出了不同建设时序线间联络环网实施建议, 分析了基于线网电力调度平台的线间联络环网应用前景。在换乘站设置线间联络环网, 为保证在建及后续建设线路按期开通提供了一种临时电源或备用电源的设置思路, 也为线网网络化运行提供了多种供电架构及供电方式选择。

关键词 城市轨道交通; 供电系统; 中压网络; 线间联络环网; 支援供电

中图分类号 U223.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.015

Application of Interconnection Ring Network among Lines in Urban Rail Transit Power Supply System

WANG Hongjie, LIN Shan, PAN Jiaying

Abstract Power supply systems for urban rail transit generally adopt centralized power supply mode, each line deploys multiple main substations as its power source and these main substations assist each other to guarantee the power supply reliability. However, being constantly influenced by construction process of civil engineering or main substations, urban rail transit lines sometimes have to build temporary power sources due to the insufficient power sources for trial operation. Meanwhile, as line networks stepping into the stage of networking operation, adjusting the power supply modes in a flexible way is needed. Considering the feature that medium-voltage network in urban rail transit power supply system usually adopts ring network connection mode, combined with practical engineering cases, the necessity and feasibility of deploying interconnection ring network among lines at the interchange stations

are analyzed. Suggestions for implementing interconnection ring network among lines in different construction time sequences are proposed. The application prospect of interconnection ring network based on line network power dispatching platform is also analyzed. To ensure lines to be launched on time either under construction or in future plans, setting interconnection ring network at interchange station provides an idea of establishing temporary power source or back-up power source, meanwhile, providing a variety of power supply architectures and power supply mode options for the networking operation of the line network.

Key words urban rail transit; power supply system; medium-voltage network; interconnection ring network among lines; assisting power supply

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

0 引言

我国各地城市轨道交通外部电源系统主要采用 110 kV/35 kV 两级电压集中供电方式^[2], 每条线路设置多座主变电所, 每座主变电所由城市电网引入两路 110 kV 电源, 通过主变压器降压为 35 kV 后向沿线各牵引变电所和降压变电所供电^[3-4]。根据 GB 50157—2013《地铁设计规范》规定, 城市轨道交通牵引负荷、消防负荷、应急照明负荷等为一类用电负荷, 相关设计规范及手册均将其可靠供电作为首要设计目标, 其供电必须采用非并列运行的双电源双回路供电。GB/T 30013—2013《城市轨道交通试运营基本条件》及交办运[2019]17 号《城市轨道交通初期运营前安全评估技术规范第 1 部分: 地铁和轻轨》亦规定, 城市轨道交通开通试运营前应进行相邻主变电所支援供电测试, 且相邻电源点跨区支援供电时, 应仍然能满足负载需求。

但根据我国各地城市轨道交通实际建设经验

来看,在线路开通试运营前经常存在由于土建滞后导致分段开通后全线主变电所间无法形成支援供电,或者主变电所建设滞后导致无法按期接入线路供电的情形,进而导致线路不满足开通运营供电需求。文献[8]提供了多种提高单一主变电所供电可靠性的方案,但这些方案对供电可靠性提高能力有限,仍然无法解决单一主变电所解列后全线供电需求。文献[9]提出了在换乘站设置联络环网的网络化支援供电方案,并建立了数学模型,给出了优化算法,但其基于分散式供电的城市轨道交通线路,这类线路在国内建设中已经越来越少,且文中更多基于理论计算,对工程实际实施缺少相关论证。

本文以近年多个采用线间联络环网的城市轨道交通工程为案例,结合线网级电力调度平台功能,分析线间联络环网应用的必要性及可行性,指出其工程应用中应重点考量的指标等相关问题,提出不同建设时序线间联络环网实施方案建议。可为新建线路可靠供电和网络化运营线网灵活供电提供网络架构保障。

1 线间联络环网设置的必要性

城市轨道交通供电系统设置线间联络环网的必要性主要基于以下3个需求:新建线路按期开通时保证电源点的需要,运维过程中灵活调整线路供电方式的需要,网络化运营时期降低网损的需要。

1.1 保证电源点

根据前述的相关设计及运营规范要求,为保证城市轨道交通供电系统可靠性,每座主变电所需有两路外部电源接入,单座主变电所解列后需由相邻主变电所支援供电且满足负载需要。但是,随着近几年国内各大中城市轨道交通建设的大规模展开,因线路供电电源点不足而导致影响开通试运营的情况越来越多,此类工程情况大致分为两种:

1) 主变电所建设进度滞后,无法按期投运。比如,2017年底开通的广州地铁9号线(以下简称“9号线”),原供电设计中的白鰲塘主变电所,由于本体建设及110 kV电源接入滞后,开通时无法建成投运;2017年底开通的广州地铁13号线一期工程,原供电设计中的官湖主变电所,因110 kV电源接入滞后,开通时无法建成投运。

2) 线路分段建设或受土建进度限制分段开通,原供电设计中的主变电所无法接入。比如,2017年开通的南昌地铁2号线一期及南延线工程,因分段

开通,导致原供电设计中的塘子河主变电所无法接入;预计2024年开通的广州地铁10号线,受制于地铁3号线支线拆解的工期需分段开通,原供电设计中的五山主变电所无法接入。

以上这些线路在开通时全线都仅有1座主变电所,供电可靠性不足,无法满足开通运营评估需求。这些线路均在换乘站设置线间联络环网,并将其作为后备电源或者临时电源,以保证电源点需求,从而使线路得以顺利开通。

1.2 灵活调整供电方式

根据广州地铁、深圳地铁供电部门反馈,线路运营中,受计划停电检修、主变压器扩容或单段35 kV出线回路故障影响,存在中压网络某个35 kV供电分区仅由1路35 kV电源长时间带载情况,此时,若供电的35 kV回路出现故障必将导致此供电分区所有负荷失电,进而出现线路停运清客的严重情况。此时,若此供电分区内存在换乘站并建设了线间联络环网,运营部门则可以通过联络环网灵活调整供电负荷分配,由联络线路主变电所对失电段进行支援供电,保证一级负荷的双电源双回路供电,大大增强了供电灵活性和可靠性。

1.3 降低网损

在我国城市轨道交通建设的前期阶段,各线路供电系统中压网络仅在资源共享主变电所35 kV母线上有联系,正线之间互相独立,每条线路供电分区调整及负荷分配仅存在本线主变电所间环网联络开关位置,负荷分配方式有限。随着城市轨道交通进入网络化运营时期,线网供电系统也进入网络化运行阶段,通过在换乘站设置线间联络环网,可为线网潮流流动提供更多通路。可根据各线路不同阶段负荷情况,突破以线路为单位的供电调度约束,通过潮流计算找出全线网中压系统附加损耗最小的网路结构,进而重构网络,降低全线网网损,提高供电效能,降低运行成本。

2 线间联络环网设置的可行性

从经济性角度考虑,为减少电缆敷设距离,一般考虑将线间联络环网设置于换乘站,其物理实现较为简单。在换乘站不同线路变电所35 kV开关柜室每段母线各增设1面35 kV出线开关柜,并敷设它们之间的35 kV联络电缆即可,只需保证设备房满足增设的35 kV开关柜布置、设备开孔及联络环网电缆敷设空间等需求。

除物理实现外,线间联络环网实施是否可行还在于其实施后的供电能力。GB/T 30013—2013 中第 8.1.3 条规定:“当有外电源点退出、相邻外电源点跨区供电时仍能满足负载需要。”交办运[2019]17 号文第 40 条规定:“具有相邻主变电所支援供电测试合格报告,支援供电的能力和功能符合设计要求。”因此,通过线间联络环网进行供电的重点是核算经线间联络环网重构网络后供电系统是否满足各项供电质量指标,以确定其适宜的供电范围及供电方式。考量指标主要为:① 主变压器安装容量满足最大负荷时供电需求。对于油浸式变压器,其最大过载能力一般取为额定容量的 130%。② 最大供电负荷情况下,中压网络各节点电压损失不宜超过 5%。③ 线网中压网络各支路最大负荷电流不超过电缆最大允许载流量。④ 线间联络环网涉及的供电分区继电保护方案及定值应能满足安全可靠供电需求。

同时,既有线增设线间联络环网时,还应同步升级改造 PSCADA(电力监控)系统,以保证对线间联络环网供电的可靠监控。

3 不同建设时序线间联络环网的设置原则

由于城市轨道交通是分期建设的,不同建设时序的线间联络环网设置条件及工期互不匹配,且早期建设的线路基本均未考虑线间联络环网的设置需求。因此线间联络环网实施应具体情况具体分析。结合不同线路建设时序,建议新线建设中按照以下原则进行线间联络环网实施或条件预留。

1) 新建线路与既有线路间,新建线路建设中预留联络环网开关柜柜位及联络环网电缆通道条件,后续根据线网运营需求,确定是否对既有线路变电所改造实施联络环网。

2) 同期建设新建线路间,除主变电所资源共享接入的换乘站外,其他换乘站均直接实施联络环网。

3) 新建线路与后期建设线路间,新建线路建设中,根据线网规划,在换乘站均预留后期线路建设时实施联络环网的开关柜柜位及电缆通道条件。

为避免因前期线路建设中预留不足导致后期线间联络环网无法实施的问题,建议各地在轨道交通建设中应提前布局,在前期线网规划阶段即从全局化角度考虑供电系统网络化运行需求,做好线间联络环网实施的相关预留工作。

4 工程实例

以 9 号线的线间联络环网为例,分析其设置的必要性及可行性。

4.1 工程概况及背景

9 号线由飞鹅岭站至高增站(见图 1),线路全长约 20 km,全线设岐山和白鳝塘 2 座主变电所。2017 年底开通试运营时,岐山主变电所仅建成 1 路 110 kV 外部电源,白鳝塘主变电所本体及 2 路外部电源均未建成,供电电源点严重不足,无法满足开通需求。



图1 广州地铁9号线线路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Guangzhou Metro Line 9

4.2 线间联络环网方案

9 号线在高增站与 3 号线换乘。3 号线高增站 35 kV 电源来自望岗主变电所,且所内已预留实施线间联络环网开关柜,故考虑在此站实施线间联络环网,利用望岗主变电所经 3 号线中压网络为 9 号线提供更多电源点,此情况下的 9 号线全线供电系统图如图 2 所示。

考虑岐山主变电所仅存在 1 路 110 kV 外部电源,为保证 9 号线各车站变电所均具备两回独立的 33 kV 电源供电,实施线间联络环网支援供电后,全线供电系统运行方式如下:

1) 正常运行方式:岐山主变电所 110 kV 内桥开关、II 段 33 kV 进线开关、33 kV 母联开关及花果山公园站 I 段所间环网联络开关打开,1 路外电源 + 1 台主变压器(I 段)运行,为 9 号线第一和第二供电分区 I 段所有负荷供电,望岗主变电所通过线间联络环网为 9 号线第三和第四供电分区 I 段及全线 II 段所有负荷供电。

2) 故障运行方式:① 岐山主变电所 I 段故障时,切除全线所有三级负荷,闭合花果山公园站 I 段所间环网联络开关,望岗主变电所为 9 号线全线所

表 3 望岗主变电所容量核算

Tab.3 Capacity accounting of Wanggang main substation

运行方式	项目	I 段母线	II 段母线
正常方式	9 号线牵引负荷/(kV·A)	3 862	7 915
	9 号线动力照明负荷/(kV·A)	5 643	11 819
	2 号、3 号线既有负荷/(kV·A)	8 125	8 503
	总计/(kV·A)	17 630	28 237
	负载率/%	53	83
岐山主变电所解列	9 号线牵引负荷/(kV·A)	6 805	7 915
	9 号线一级和二级动力照明负荷/(kV·A)	8 183	8 183
	2 号、3 号线既有负荷/(kV·A)	8 125	8 503
	总计/(kV·A)	23 113	24 601
	负载率/%	69	73

注:望岗主变电所主变压器安装容量为 $2\times31.5\text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

虑 0.8 校正系数后,最大允许载流量取为 448 A。

根据表 3 计算负荷,望岗主变电所通过高增站线间联络环网支援 9 号线供电时,最大负荷电流出现在正常运行方式下望岗主变电所供电 9 号线 II 段所有负荷时,供电电缆为望岗主变电所高增站出线电缆。经仿真计算,此时电流约为 $360\text{ A}<448\text{ A}$,电缆截面满足载流量需求。

4.3.4 继电保护定值调整

为保证线间联络环网两侧开关柜差动保护装置及流互匹配,9 号线高增站变电所联络环网开关柜采用与 3 号线既有开关柜相同的差动保护装置 GRL150 及流互变比。

同时,经查询 3 号线望岗主变电所高增站出线两侧开关柜综合保护装置定值,其过电流一次值仅为 410 A,对应通过高增站线间联络环网支援 9 号线供电时此支路最大负荷电流 360 A,其可靠系数仅为 1.13,低于通常的 1.2~1.3,因此需调大此出线两侧开关柜定值,以增强供电可靠性。

为尽可能防止保护误动作,考虑调整定值。以对应支路最大允许载流量 448 A 作为整定基准值,可靠系数取为 1.3。经计算,此段环网电缆在最小运行方式下非单相短路最小短路电流约 2 500 A,此时,继电保护仍具有足够灵敏性,调整方式可行。同时,为尽量避免 9 号线故障时对 3 号线运行造成误动作,在高增站线间联络环网两侧开关柜间设置时间级差。调整后保护定值见表 4。

表 4 广州地铁 9 号线和 3 号线间联络环网供电继电保护整定值调整表

Tab.4 Relay protection setting value adjustment for power supply of interconnection ring network between Guangzhou metro Line 9 and Line 3

开关柜	电流/A		延时/s	
	调整前	调整后	调整前	调整后
望岗主变电所 3 号线高增站出线柜	410	580	0.8	不调整
3 号线高增站进线柜	410	580	0.8	不调整
3 号线高增站线间联络环网出线柜	515	515	0.6	0.6
9 号线高增站线间联络环网进线柜	515	515	0.4	0.4

由上述分析可知,通过设置线间联络环网进行线间主变电所支援供电是完全可行的,只需在设计阶段完成相关供电指标校验及继电保护定值调整计算,确保线间联络环网供电范围及供电方式合理即可。9 号线自 2017 年底开通运行至今,白鰲塘主变电所仍未能投产,一直通过高增站线间联络环网支援供电,9 号线供电系统已稳定可靠运行 5 年之久。

5 基于线网级电力调度平台的线间联络环网应用

随着城市轨道交通网络化发展,供电系统也向着线网化运行发展,按线路进行电力调度的模式已经难以满足主变电所及中压环网快速灵活调整的需求,在支援供电、故障快速恢复供电、系统网络优化调度等方面,缺乏有效的分析手段。因此,城市轨道交通供电系统电力调度宜从线路供电调度模式向线网供电调度模式发展。目前,广州、长沙、上海、南京等城市的轨道交通已逐步开始建设线网级电力调度平台。

线网级电力调度平台建成后,通过在该平台建立全线网供电系统网络模型,可实现全线网供电系统的网络拓扑、潮流计算、短路电流计算、静态安全分析、供电系统优化调度等功能,从而实现全线网潮流最优化配置,解决传统电力调度模式下一座主变电所对多条线路供电时的调度复杂性难题。在计划调整线网运行方式或突发故障时,通过调度方案模拟和供电能力分析,可以快速恢复供电,实现全线网主变电所灵活供电。线网级电力调度平台

建成后,线间联络环网的可操作性和效益将进一步显现,其规模化设置将为线网灵活调度、潮流优化配置、最优潮流网络重构等需求提供坚强的网络架构基础。

6 结语

城市轨道交通线间联络环网不仅可以为建设中因各种原因导致供电电源点不足的线路顺利开通提供临时或后备电源点,亦可为网络化运营线网灵活调整供电方式提供网络架构基础。

本文以近几年采用线间联络环网顺利开通的多条线路为佐证,结合广州地铁 9 号线与 3 号线线间联络环网工程实例的具体分析,明确了线间联络环网实施的必要性和可行性;针对不同建设时序线路间联络环网,提出了合理的实施原则及建议。随着线网级电力调度平台的建设,线间联络环网将进一步显现其在线网供电系统网络结构灵活配置中的巨大作用。

参考文献

- [1] 王沛沛,刘炜,廖钧,等.城市轨道交通主变电所无功补偿装置容量评估[J].铁道科学与工程学报,2017(5):106.
WANG Peipei,LIU Wei,LIAO Jun, et al. Capacity evaluation of reactive power compensation device in the main substation of urban rail transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2017(5):106.
- [2] 贺威俊,高仕斌.轨道交通牵引供电变电技术[M].2 版.成都:西南交通大学出版社,2016.
HE Weijun,GAO Shibin. Power supply and substation techniques for electric traction of rail transit[M]. 2nd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press,2016.
- [3] 王靖满,黄书明.城市轨道交通供电系统技术[M].上海:上海科学普及出版社,2011.
WANG Jingman,HUANG Shuming. Urban rail transit power sup-

ply system technology[M]. Shanghai: Shanghai Science Spreading Publishing House,2011.

- [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.
Ministry of Housing and Urban-Rural development of the People's Republic of China,General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of metro:GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2013.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.城市轨道交通运营基本条件:GB/T 30013—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration of the People's Republic of China. Basic condition for trial operation of urban rail transit:GB/T 30013—2013[S]. Beijing: Standards Press of China,2013.
- [6] 中华人民共和国交通运输部.城市轨道交通初期运营前安全评估技术规范第 1 部分:地铁和轻轨:交办运[2019]17 号[Z].北京:中华人民共和国交通运输部,2019.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specifications for safety evaluation before urban rail transit initial operation[Z]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China,2019.
- [7] 陈飞,魏存祥.提高单一主变电所供电可靠性的方案探讨[J].电气化铁道,2011(6):21.
CHEN Fei,WEI Cunxiang. Discussion on improving power supply reliability of single main power substation[J]. Electric Railway, 2011(6):21.
- [8] 刘炜,谢文君,孙名刚,等.基于分层优化的分散式城轨供电系统网络化支援供电[J].电工技术学报,2021(11):2306.
LIU Wei, XIE Wenjun, SUN Minggang, et al. Research on networked support power supply of urban rail power supply system based on hierarchical optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021(11):2306.

(收稿日期:2022-07-21)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com