

上海轨道交通崇明线过江段区间供配电系统关键技术研究

魏 昕

(上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海//高级工程师)

摘 要 目的:为解决上海轨道交通崇明线过江段存在的区间动力照明设备供电距离远、土建条件受限等工程难点,需对其区间供配电方案作针对性分析和研究。方法:提出了采用 35 kV/6 kV/0.4 kV 二级降压供电方式,同时对区间变电所的设备选型与布置、接地装置设计、继电保护和电力监控数据传输等关键技术问题进行了重点分析。结果及结论:在该区间中设置 6 kV 中压网络及 6 kV/0.4 kV 区间变电所的设计方案,并对该方案配套的电气主接线方式、主要设备选型、区间变电所接地装置设计、6 kV 系统继电保护配置、变电所综合自动化系统数据上传等关键技术问题进行了深入研究。结果表明,该方案可有效解决上海轨道交通崇明线特长区间内动力照明设备的供电问题。

关键词 城市轨道交通;长区间;6 kV 配电系统;区间变电所;继电保护

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.018

Key Technologies of Shanghai Rail Transit Chongming Line River-crossing Interval Power Supply and Distribution System

WEI Xin

Abstract Objective: To address the engineering challenges faced by Shanghai Rail Transit Chongming Line river-crossing interval, such as the long distance between the interval power lighting equipment, and the limited civil engineering conditions, a targeted analysis and study of interval power supply and distribution scheme is required. Method: A two-stage voltage reduction power supply method of 35 kV/6 kV/0.4 kV is proposed, and key technical issues such as equipment model selection and layout, grounding device design, relay protection, and power monitoring data transmission for the interval substation are analyzed emphatically. Result and Conclusion: A design scheme for setting a 6 kV medium-voltage network and a 6 kV/0.4 kV interval substation in the interval is proposed, key technical issues such as electrical main wiring, main equipment model selection, interval substation grounding

device design, 6 kV system relay protection configuration, and data upload for substation comprehensive automation system are thoroughly studied. Results show that this scheme can effectively solve the power supply problem for the power lighting equipment in this super-long interval of Shanghai Rail Transit Chongming Line.

Key words urban rail transit; long interval; 6 kV power distribution system; interval substation; relay protection

Author's address Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, 200235, Shanghai, China

城市轨道交通区间长度通常在 2 km 以内。地下区间动力照明负荷主要为照明、检修电源、风机和水泵等,而地上区间基本只有照明和检修电源,这些低压负荷可由邻近车站降压变电所直接供电^[1];对于隧道内安装了机械通风和废水泵等设备的长大区间,当由邻近车站降压变电所提供低压电源不经济时,可在区间风井或盾构竖井内设置跟随式降压变电所。每座降压变电所的供电半径一般不超过 1 km。

上海轨道交通崇明线作为上海轨道交通线网规划中连接中心城和崇明两岛(长兴岛、崇明岛)的 1 条市域线,其过江段新建越江隧道跨越长江口南港和北港。崇明线过江段线路示意图如图 1 所示,其中,南港段隧道长约 7.85 km,北港段隧道长约 9.14 km。由于工程的特殊性,过江段隧道形式与常规地铁隧道存在较大差异,隧道长度也远超一般的盾构区间,因此,有必要对其区间供配电方案作针对性分析和研究。

1 工程特点

1.1 土建条件

崇明线过江段区间采用单洞双线和圆形隧道,盾构外径为 13.0 m(内径为 11.9 m),根据功能划

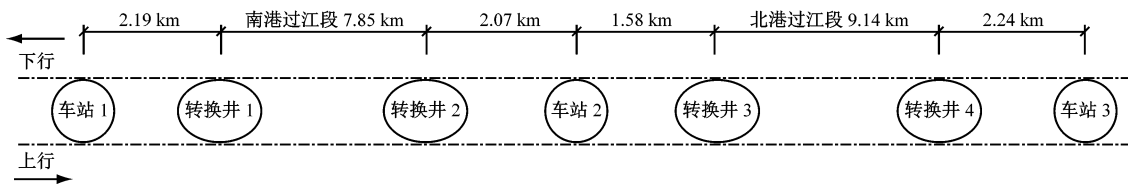
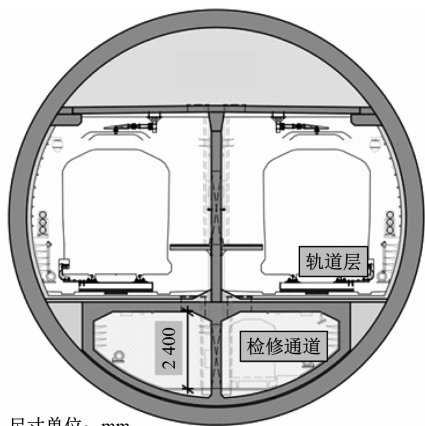


图1 崇明线过江段线路示意图

Fig. 1 Diagram of Chongming Line river-crossing interval

分,隧道断面由上至下分别为排烟通道、行车空间及检修通道,如图2所示。其中,检修通道层结构采用弓字型预制件,内部净高为2.4 m,一侧作为运营检修通道,另一侧用于布置区间泵房、机电管线等设施。过江段两端设置大小盾构转换井,作为越江大盾构区间隧道至陆域段小盾构区间的工况转换场所兼区间风井。



尺寸单位: mm

图2 崇明线过江段隧道典型断面图

Fig. 2 Tunnel typical profile diagram of Chongming Line river-crossing interval

从土建条件看,盾构转换井类似于区间风井,可设置常规降压变电所;越江隧道下部检修通道层虽然空间有限,但理论上仍存在放置变压器、开关柜等供电设备的可能性,还有待作深入研究。

1.2 动力照明负荷分析

与常规地下区间类似,过江隧道内动力照明负荷主要为照明、检修电源、区间废水泵及监控系统等低压负荷。此外,为实现长区间内的烟气控制,隧道两端转换井内各设有1~2台大功率的6 kV排烟风机,并在隧道各纵向通风区段集中排烟风口处设有电动组合风阀。隧道内信号设备等重要弱电负荷,由各自系统负责其内部配电,这里不作讨论。

从负荷分布看,除转换井内6 kV隧道排烟风机外,区间内总体负荷并不大,但相对分散,不利于长距离低压供电,特别是疏散照明采用额定输出电压

不大于DC 36 V的集中电源进行供电,供电距离过长将造成配线截面显著增加。

2 总体供电方案的提出

2.1 供电方式及电压等级的确定

崇明线供电系统采用常规的集中供电方式,经主变电所降压后,以35 kV电压向沿线车站及转换井内的牵引、降压变电所供电。针对过江段2个特长区间,低压负荷全部采用由两端转换井内降压变电所接引400 V电源,通过电缆引至隧道内的配电方式显然是不合理的。对此,拟采用中压传输网络结合区间变电所对隧道内低压负荷进行分区配电,可大大减少隧道内低压电缆数量及线缆损耗。

结合土建条件,隧道内可供设备安装的最大高度仅为2.4 m,而目前市场上适用于35 kV系统的小型化设备——40.5 kV GIS(气体绝缘开关柜)高度基本在2.2 m以上,加上35 kV电缆进出柜弯曲半径要求,主流厂家现有柜型在该空间内均无法实施。因此,在该断面条件下区间变电所采用常规35 kV电压等级供电基本不可行。且由于涉及6 kV排烟风机的供电问题,转换井内除设置常规低压配电系统外,还需增加35 kV/6 kV降压及6 kV配电系统的设计。考虑到转换井内可提供6 kV电源且6 kV供电设备对土建需求大大降低,初步提出隧道内区间变电所采用6 kV供电,即设置6 kV/0.4 kV配电变压器,对区间动力照明负荷采用35 kV/6 kV/0.4 kV两级降压供电方式。

根据隧道内负荷分布,区间变电所宜均匀设置,间距不超过2 km,并优先考虑邻近区间废水泵房设置,便于水泵的配电和集中管理。结合过江段线路条件,南港拟设区间变电所6处,北港拟设7处。

2.2 电气主接线

根据上文分析,转换井内设置1座35 kV/6 kV降压变电所,为6 kV排烟风机及过江隧道内6 kV/0.4 kV区间变电所供电。排烟风机属于一级(消

防)负荷,该变电所设置2台35 kV/6 kV风机变压器,电源分别引自转换井内共用的35 kV一、二段母线,6 kV侧则采用单母线分段接线方式,中间设母线分段开关,风机可由6 kV任一段母线直接供电。变压器低压侧中性点采用小电阻接地方式,有利于实现灵敏且有选择性的接地保护,最大接地短路电流取1 000 A。

隧道内6 kV配电系统可采用放射式、树干式或环网接线方式。结合区间变电所的容量、分布及对

供电可靠性的要求,本文推荐采用供电可靠性高、电缆投资较少的单侧供电、双回路树干式接线,同时为便于快速隔离故障,区间变电所进、出线开关均采用断路器。转换井6 kV供电系统主接线示意图如图3所示。由图3可知:区间变电所2台6 kV/0.4 kV配电变压器电源分别引自转换井6 kV一、二段母线,每段6 kV母线设置进线、出线及变压器馈线开关各1路(最末端变电所仅设置馈线开关),两端转换井供电范围以隧道中心为界。

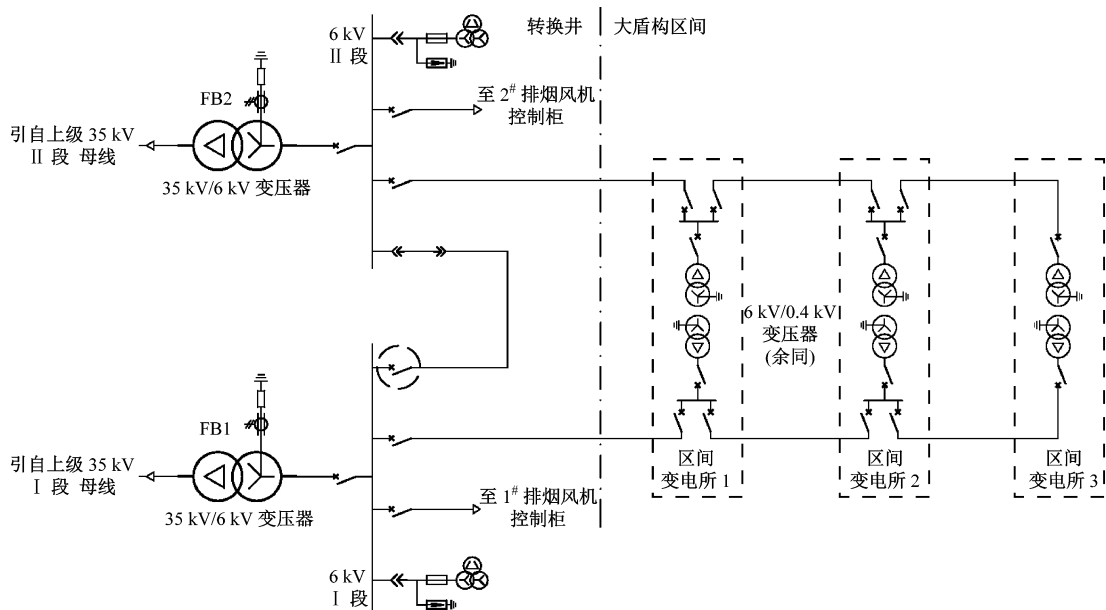


图3 转换井6 kV供电系统主接线示意图

Fig. 3 Main wiring diagram of 6 kV power supply system in the conversion well

与常规降压变电所类似,区间变电所0.4 kV侧采用单母线分段接线方式,以满足区间照明、区间废水泵等一级负荷的供电要求。当一段区间电缆故障时,对应的下级变压器因失压退出运行,0.4 kV母联断路器合闸,由所内另一台变压器负责其供电范围内的全部一、二级负荷。

2.3 变压器容量选择

区间配电变压器容量的选择与常规车站类似,这里主要讨论转换井内35 kV/6 kV风机变压器容量的确定,其设计主要考虑以下2个方面:

1) 以负荷统计计算结果为依据,正常运行时2台变压器分列运行,长期工作负载率不宜大于85%;当1台配电变压器退出运行时,另1台配电变压器应承担其供电范围内的全部一、二级负荷。

2) 为防止电动机启动时影响同一母线上其他用电设备的正常工作,变压器容量还应满足大功率

电动机启动时,各级配电母线上的电压要求:电动机不频繁启动时,不宜低于额定电压的85%。

以转换井1为例,通风专业设有2台6 kV排烟风机,初选功率630 kW/台,功率因数取值为0.8;正常采用软启动方式,软启动器故障时采用直接启动(全压启动倍数取7);风机电源线截面选择 $3 \times 95 \text{ mm}^2$,线路长度为50 m;其余接入负荷相对较小(主要为区间照明负荷),按80 kW估算。若仅按负荷计算结果,变压器容量选择1 600 kVA即可,但考虑到最恶劣启动工况,即一台变压器退出时,1台风机运行同时另1台风机全压启动,此时6 kV母线处计算电压仅为额定电压的80%^[2];直至变压器容量增加到3 150 kVA,6 kV母线处计算电压达到额定电压的85.2%,方可满足要求。考虑到隧道通风方案及风机选型的不确定性,本文给出了按不同变压器容量估算的允许全压启动的风机最大功率参考

值,详见表 1。

表 1 按变压器容量估算的允许全压启动的风机最大功率
Tab.1 Estimated maximum power of full-voltage start-up motor based on transformer capacity

35 kV/6 kV 变压器的 电容量/ kVA	允许的风机单台最大功率/kW	
	仅考虑单台风机运行	2 台风机同时运行
2 500	630	580
3 150	690	640
4 000	840	760

注:计算过程中变压器短路阻抗参照 GB/T 10228—2015《干式电力变压器技术参数和要求》中表 6 的数值。

3 区间变电所设备选型及布置

隧道内可供变电所设备集中布置的空间高度及宽度均限制在约 2.4 m 的范围内,即使采用 6 kV 电压等级供电,也需重点研究设备的合理选型和布置,以保证方案的顺利实施。

3.1 设备选型

区间变电所主要设备即中、低压开关柜及配电变压器,其设备选型基于市场上成熟产品。由于开关柜主流品牌无单独的 6 kV 系列产品,现统一选用 10 kV 设备,调研情况如表 2 所示。根据表 2 中数据,配电变压器选择常规产品即可;低压开关柜需按现场条件定制非标柜;而对于中压开关柜,除设

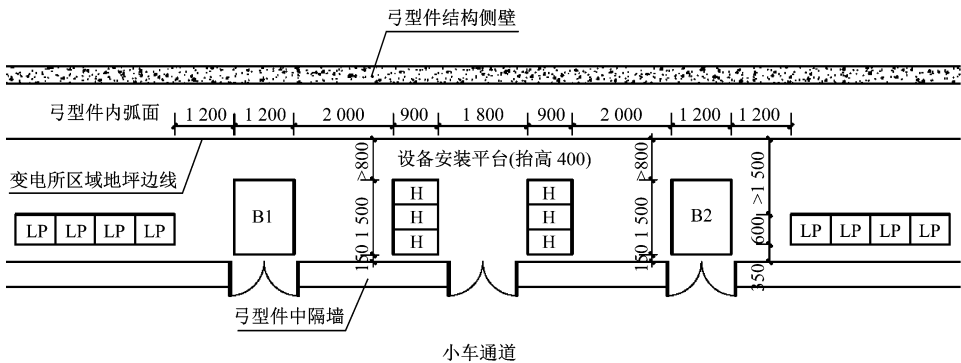
备本身高度外,柜底还要预留进出电缆的敷设空间(高度不宜小于 500 mm),只有气体绝缘环网柜等紧凑型开关设备符合安装条件,其 630 A 最大工作电流也完全能满足本工程的容量需求。

表 2 主要变电所设备典型尺寸
Tab.2 Typical dimensions of main substation equipment

设备名称	宽×深×高/ (mm×mm×mm)	备注
6 kV/0.4 kV 干式 变压器柜	1 500×1 200×1 400	≤200 kVA
10 kV GIS	6 00×1 300×2 250	
10 kV 气体绝缘环网柜	(350~500)×900×1 400	≤630 A
低压开关柜	(800~1 000)×1 000×2 200	可定制

3.2 设备布置

综合考虑设备尺寸、电缆敷设及设备运输、操作距离的要求,在空间利用上,对设备高度按 1 400 mm 进行限定,变电所区域地坪抬高 400 mm,柜底设置深度为 500~600 mm 的电缆沟用于电缆敷设,设备上方向留有约为 600 mm 的空间;在平面布置上,一、二段设备分开布置,中压柜与变压器采取垂直于线路方向、面对面布置,侧边留出不小于 800 mm 的维护通道,见图 4 所示。为方便设备运输,变压器、开关柜就近设置运输门,设备通过另一侧检修通道进行运输。



注: B—配电变压器柜; H—中压开关柜(环网柜); LP—低压开关柜; 图中尺寸单位均为 mm。

图 4 检修通道层区间变电所平面布置方案

Fig. 4 Planar layout scheme of interval substation at the maintenance passage level

4 区间变电所接地

4.1 接地电阻要求

区间变电所不同用途和不同电压的电气设备共用接地装置。根据文献[3]的第 6.1.2 条和第

7.2.6 条的规定,当配电变压器高压侧工作于低电阻接地系统,低压采用 TN 系统且电气装置采用总等电位联结时,共用接地装置的接地电阻 R 应符合下式的要求,且不应大于 $4\ \Omega$ 。

$$R \leq 2\ 000/I_G \tag{1}$$

式中:

I_G ——经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值,单位 A。

由于 6 kV 系统最大接地短路电流已通过变压器中性点接地电阻,将其限制在 1 000 A 以下,即使不考虑电缆铠装层对故障电流的分流, I_G 也不会超过 1 000 A,因此,接地电阻达到 $R \leq 2\ 000/1\ 000 = 2\ \Omega$ 即可满足区间变电所各类接地的要求。

4.2 接地装置设计

城市轨道交通变电所接地装置一般由自然接地极和人工接地网两部分组成,但越江隧道不具备外引人工接地网的实施条件。因此,最合理、简单的方案即利用盾构管片结构钢筋作为其自然接地装置,并达到接地电阻要求。

文献[4]给出了一种圆形隧道接地系统组成方案及其接地电阻计算公式,但过江段大盾构管片设计方案有所不同,管片连接采用斜螺栓连接件,螺母采用塑料材质,也就无法直接利用管片连接件实现隧道管片纵向及横向结构钢筋的自然连接。对此,选取区间变电所范围内紧邻的 4 环盾构管片作为接地环(管片环宽为 2 m),借助外部辅助连接线(镀锌扁钢),将其环向及纵向相邻管片内弧面上的外预埋钢板(连接管片结构钢筋)焊接连通,实现管片结构钢筋之间的电气贯通。接地环接地电阻 R 的计算式^[2]为:

$$R = \frac{0.2\rho}{\sqrt[3]{V}} \quad (2)$$

式中:

V ——混凝土基础所包围的体积,单位 m^3 ,要求在 $1\ 000\ \text{m}^3$ 左右;

ρ ——土壤电阻率,单位 Ωm 。

接地环管片包围的体积可看作一个圆柱体, $V \approx 3.14 \times 6.5^2 \times 2 \times 4 = 1\ 060\ \text{m}^3$;过江段盾构管片所在的土壤电阻率在 $15\ \Omega\text{m}$ 以内,按此计算 $R \approx 0.3\ \Omega$,满足规范要求。

此外,崇明线牵引供电系统采用负极专用轨回流(对地绝缘安装),利用管片结构钢筋作为接地装置也无需担心杂散电流腐蚀的问题。

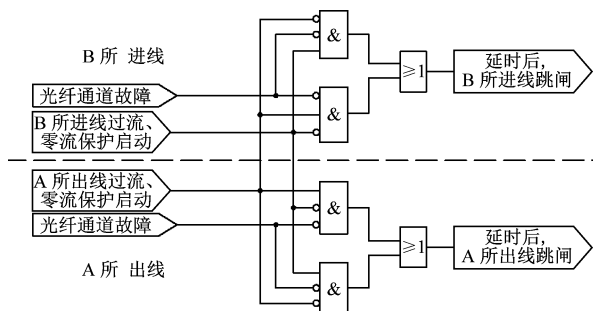
5 保护及控制

5.1 继电保护

针对该供电方式的特殊性,现重点讨论区间 6 kV 配电系统的继电保护方案。如图 3 所示,转换井

至隧道的每路 6 kV 出线对其供电范围内的 3~4 座区间变电所采用链接式供电,电流速断保护无法保证上下级开关的选择性,而传统过电流保护通过动作延时阶梯式递增的方法会造成第一级开关延时时间过长,不利于故障的快速切除,也给上级 35 kV 变压器馈线开关的过流保护整定增加了困难。

对此,在传统过电流保护、零序电流保护基础上叠加数字通信电流保护,通过逻辑闭锁实现区间故障和母线故障的可靠、快速动作。区间变电所之间采用光纤通信,当区间线路两侧只有一侧检测到故障电流(过流/零流保护启动)时,才会判断为区间故障,为此两侧开关同时跳闸,将故障隔离(进、出线保护逻辑如图 5 所示);与之类似,只有当同一变电所的进线开关过流保护启动而出线、馈线均未启动时,才会判断为母线故障,此时本所进、出线及馈线开关全部跳闸将故障隔离,同时联跳对侧出线开关(即使进线断路器失灵时故障也能切除)。



注: A 所为 B 所的上一级变电所。

图 5 6 kV 线路电流保护逻辑示意图

Fig. 5 Diagram of 6 kV line current protection logic

由于该方案每个开关仅向相邻的上一级开关发送闭锁信号,各开关的闭锁时间是相同的,线路及母线数字通信电流保护动作延时可统一设置为 0.3 s。进、出线开关另设置过电流保护、零序电流保护,作为光纤通道故障时的后备保护,兼作母线故障的后备保护,动作延时统一设置为 0.6 s;变压器馈线开关设置常规的电流速断保护、过电流保护、零序电流保护、过负荷保护、温度保护及失灵保护,过电流保护动作延时取 0.3 s。

5.2 电力监控

为方便运营管理,区间变电所也应设置完备的变电所综合自动化系统,以实现变电所设备监控、实时数据采集、故障快速判断等功能。原则上,电力监控数据传输可借助综合监控的传输通道,但过江段无论转换井还是区间变电所,均未设置综合监

控系统,这就需要自行建立通信网络,将该区段电力监控数据传输至邻近车站,再通过邻近车站的综合监控系统上传至控制中心。

若采用常规星型接线,各区间变电所单独敷设光缆接至邻近车站,将存在同一路径上光缆的重复敷设,不甚合理。对此,提出在南、北港区间内分别搭建以太环网(单环网),利用光纤和环网交换机将过江段区间变电所及其两端转换并跳接成环,最终

通过邻近车站变电所综合自动化通信交换机实现转换井及区间变电所监控数据的上传。南港过江段网络构架如图 6 所示,北港与其类似。该方案采用环网接线,有利于提高数据传输的可靠性,也增加了运营管理的灵活性,后期在环网任一节点上配置复示工作站,即可实现对过江段变电所运行状态的集中监视和管理。

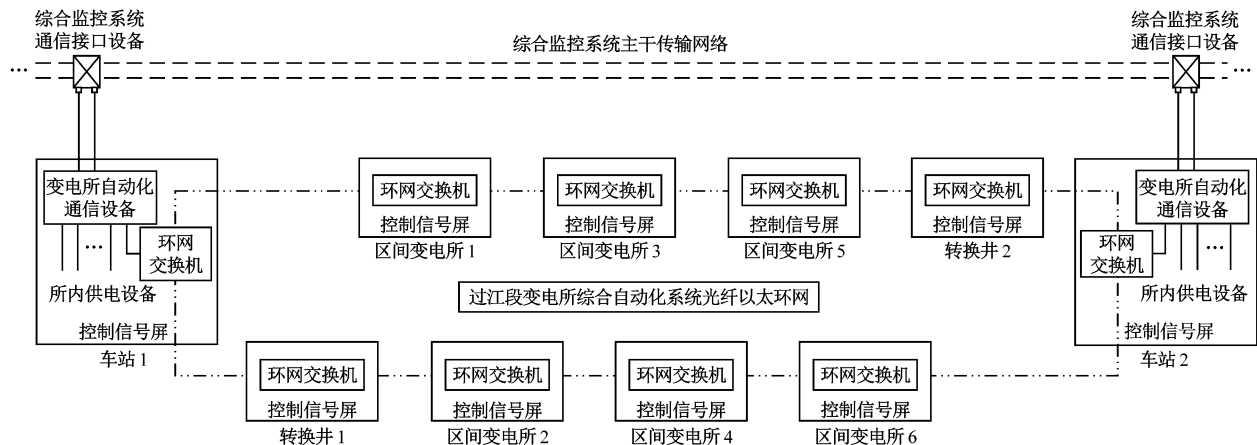


图6 南港过江段电力监控系统网络接线示意图

Fig. 6 Network wiring diagram of the South Port river-crossing interval power monitoring system

6 结语

针对上海崇明线过江段土建客观条件、动力照明负荷特点以及特长区间内低压负荷的长距离供电问题,本文提出了采用 35 kV/6 kV/0.4 kV 二级降压供电方式,过江段两端转换井内设置 35 kV/6 kV 降压变电所,区间设置 6 kV 中压网络及 6 kV / 0.4 kV 区间变电所的设计方案,并对该方案配套的电气主接线方式、主要设备选型、区间变电所接地装置设计、6 kV 系统继电保护配置、变电所综合自动化系统数据上传等关键技术问题进行了深入分析,并给出了具体实施方案,为工程实施提供了强有力的技术支撑,也可供类似项目设计作参考。

参考文献

- [1] 于松伟,杨兴山,韩连祥,等.城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M].成都:西南交通大学出版社,2008.
YU Songwei, YANG Xingshan, HAN Lianxiang, et al. Design

[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008.

- [2] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用供配电设计手册[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- China Aviation Planning and Design Research Institute Co., Ltd. Handbook of industrial and civil power supply and distribution design[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of AC electrical: GB/T 50065—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [4] 杜学龙, 仇天骄, 张晓颖, 等. 电缆隧道中盾构接地系统接地电阻简化计算公式[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(11): 44.
- DU Xuelong, QIU Tianjiao, ZHANG Xiaoying, et al. Simplified formula for calculating grounding resistance of grounding system using tunnel foundation in cable tunnel[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(11): 44.

(收稿日期:2022-03-30)