

浅谈卡鲁玛尾水隧洞项目 10 kV 高压进洞方法

刘 阳¹, 马 连 生²

(1. 徐州市水利建筑设计研究院有限公司, 江苏 徐州 221002;

2. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

摘 要:乌干达卡鲁玛水电站尾水隧洞划分为 8 号、9 号、尾水三个支洞施工段分区施工, 施工过程中隧洞内使用电气设备有混凝土泵车、多臂钻机、水泵排水系统、通风机以及照明和施工使用的各类小型电动工具, 由于作业面距离洞口较远, 电气设备功率较大, 必须把 10 kV 高压引入洞内降压为 400 V 才能满足电气设备的使用。因此如何选用适应的 10 kV 配电设备, 电气材料, 保障合格的电力电源以及配电系统的安全运行, 笔者以 8 号支洞施工区为例, 阐述了选用原则和计算方法, 可供类似工程参考借鉴。

关键词:10 kV 高压进洞; 洞内配电设备; 电气材料选用; 配电系统计算方法

中图分类号: TV7; TV52; TV554

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2023)增 2-0116-05

Discussion on 10 kV High Voltage Tunnel Entry Method for Karuma Tailrace Tunnel Project

LIU Yang¹, MA Liansheng²

(1. Xuzhou Water Conservancy Building Design and Research Institute Co., Ltd., Xuzhou Jiangsu 221002;

2. Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: The tailrace tunnel of Karuma Hydropower Station in Uganda is divided into three branch tunnel construction sections: N0. 8 and No. 9, and the tailrace. During the construction process, the electrical equipment used in the tunnel includes concrete pump trucks, multi-arm drilling machines, water pump drainage systems, ventilators, lighting and various types of small power tools used in construction. Due to the far distance between the working face and the tunnel opening and the high power of electrical equipment, it is necessary to introduce 10 kV high voltage into the tunnel and reduce the voltage to 400 V to meet the use of electrical equipment. Therefore, how to choose suitable 10 kV distribution equipment, electrical materials, ensure qualified power supply and safe operation of the distribution system. This article takes the construction area of the No. 8 adit as an example to organize the selection principles and calculation methods, which can provide reference for similar projects.

Key words: 10 kV high-voltage tunnel entry; Distribution equipment inside the tunnel; Selection of electrical materials; Calculation methods for distribution systems

1 概 述

卡鲁玛水电站共有 2 条尾水隧洞, 1 号隧洞长 8 697 m, 2 号隧洞长 8 601 m, 开挖断面为 13.5~15.0 m 的马蹄形; 8 号施工区支洞长度为 1 068.3 m, 8 m×7 m 城门洞型结构, 支洞口距离最远端设计开挖作业面 2 412 m(实际施工中延伸到了 2 572.1 m), 洞内施工需要合格且安全的 400 V 动力电源, 根据施工组织设计要求, 采用 10 kV 高压进洞经过变压器降压到 400 V 的配电方

案, 因此项目部电气技术人员按照经济节约, 符合规范, 安全可靠地设计并实施了方案, 满足了施工生产要求。

2 施工设备布置及负荷分析

10 kV 高压进洞应根据施工环境设计, 要确保洞内作业人员安全; 确保配电系统运行安全; 确保质量合格并可靠的供电电源。具体布置原则是按照施工环境和安全用电规范选择用电设备、材料类型、运行保护方案; 按设计分配的电压损失选择配电路材料参数; 按照实际使用的用电设备功率配

收稿日期: 2023-07-27

置变压器和配电设施。变压器在隧洞内的布置见图 1。

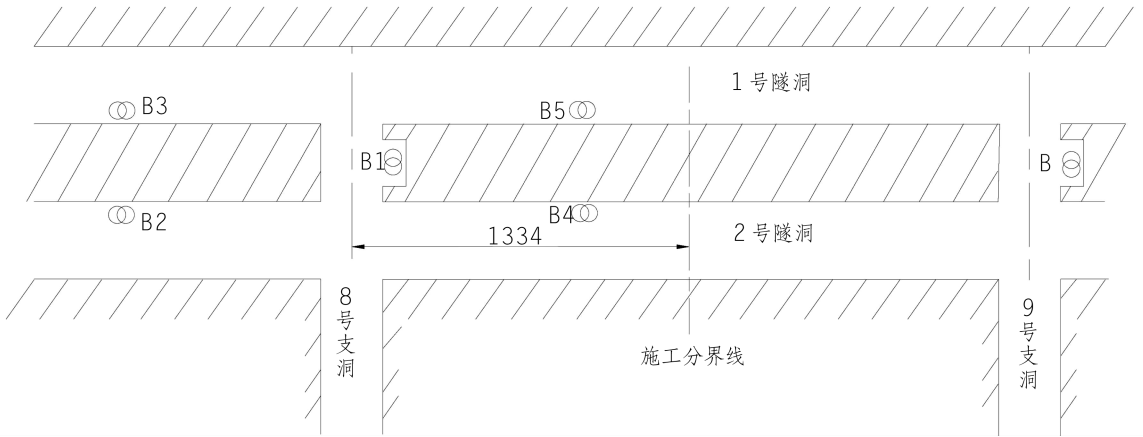


图 1 变压器在隧洞内的布置图(单位:m)

8号支洞长 1 068.3 m;支洞与隧洞交汇处间距 9号支洞交汇处 2 728 m;变压器按照 B1 距离 B2、B3、B4 和 B5 800 m 布置,保证变压器 400 V 配电网辐射 400 m 距离,据计算,排水泵电动机功率和施工场面所需用电功率配置 630 kVA 变压器 B1 可布置在 1、2 号隧洞连通洞处,400 V 动力电源保证支洞和主洞交汇处大流量排水用电电源,同时向 1、2 号隧洞上下游辐射 400 m 长,提供隧洞施工场面衬砌作业使用动力电源;超过 400 m 后的隧洞内衬砌每个作业面布置 1 台 315 kVA 变压器(变压器所带主要负荷有 2 台混凝土地泵,一台多臂钻机),400 V 低压配电网辐射上下游 400 m 距离,如图 1 中 B2、B3、B4 位置,根据衬砌作业进度逐步随着衬砌浇筑移设布置,如 B5 变压器是随着工程进度调整位置(B1 或 B2 移设);洞内供电采用 10 kV 铝芯轻质铠装电缆,沿

着洞壁挂高 6 m,电缆接头连接采用 10 kV 高压电缆分支箱(一进二出),安全接地系统采用洞内钻孔锚杆和嵌入地下的钢筋接地体^[1]。整体布置的特点是符合规范,变压器和电缆施工移设方便,电网辐射的施工作业面大,安全可靠,这些优点在后期衬砌施工调整多臂钻补打锚杆和钻排水孔中充分体现,315 kVA 变压器用电负荷和 630 kVA 变压器用电负荷见表 1、2。

2.1 高压配电设备和配电材料类型的选择

在图 1 中,隧洞施工环境条件差,主要表现在爆破粉尘浓度高,空气潮湿,空间狭小同时存在流动作业和交叉作业施工,选用封闭式电气设备和良好的安全防护是解决以上问题的办法^[2],因此选用封闭的箱式变压器,封闭的电缆分支箱,轻型铠装 10 kV 铝芯配电电缆,用以确保安全运行;箱式变压器高压侧采用高压负荷开关保护装置,

表 1 315 kVA 变压器用电负荷

| 序号 | 设备名称 | 单机功率 /kW | 数量 | 合计功率 /kW | 需求系数 /kd | 功率因素 /cosφ | 计算功率 /kW |
|----|----------|----------|----|----------|----------|------------|----------|
| 1 | 多臂钻 | 160.0 | 1 | 160.0 | 0.70 | 0.85 | 112.0 |
| 2 | 混凝土拖泵 | 110.0 | 2 | 220.0 | 0.35 | 0.80 | 77.0 |
| 3 | 液压钢模台车 | 60.0 | 1 | 60.0 | 0.20 | 0.80 | 12.0 |
| 4 | 多功能工作平台车 | 22.0 | 1 | 22.0 | 0.20 | 0.80 | 4.4 |
| 5 | 电焊机 | 15.0 | 4 | 60.0 | 0.30 | 0.50 | 18.0 |
| 6 | 潜水泵 | 11.0 | 4 | 44.0 | 0.80 | 0.80 | 35.2 |
| 7 | 注浆机 | 7.5 | 2 | 15.0 | 0.70 | 0.80 | 10.5 |
| 8 | 洞内照明 | 6.4 | 1 | 6.4 | 1.00 | 1.00 | 6.4 |
| 9 | 小型电动工具 | 8.0 | 1 | 8.0 | 0.30 | 0.70 | 2.4 |
| 10 | 总计 | — | — | — | — | — | 277.9 |

表 2 630 kVA 变压器用电负荷

| 序号 | 设备名称 | 单机功率 /kW | 数量 | 合计功率 /kW | 需求系数 /kd | 功率因素 / $\cos\phi$ | 计算功率 /kW |
|----|----------|----------|----|----------|----------|-------------------|----------|
| 1 | 排水泵 | 110.0 | 2 | 220.0 | 1.00 | 0.80 | 220.0 |
| 2 | 多臂钻 | 160.0 | 1 | 160.0 | 0.70 | 0.85 | 112.0 |
| 3 | 混凝土拖泵 | 110.0 | 2 | 220.0 | 0.35 | 0.80 | 77.0 |
| 4 | 液压钢模台车 | 60.0 | 1 | 60.0 | 0.20 | 0.80 | 12.0 |
| 5 | 多功能工作平台车 | 22.0 | 1 | 22.0 | 0.20 | 0.80 | 4.4 |
| 6 | 电焊机 | 15.0 | 4 | 60.0 | 0.30 | 0.50 | 18.0 |
| 7 | 潜水泵 | 11.0 | 4 | 44.0 | 0.80 | 0.80 | 35.2 |
| 8 | 注浆机 | 7.5 | 2 | 15.0 | 0.70 | 0.80 | 10.5 |
| 9 | 洞内照明 | 6.4 | 1 | 6.4 | 1.00 | 1.00 | 6.4 |
| 10 | 小型电动工具 | 8.0 | 1 | 8.0 | 0.30 | 0.70 | 2.4 |
| 11 | 总计 | — | — | — | — | — | 497.9 |

其优点是符合规范,分断快捷,安全可靠,简约经济,从而达到了施工作业移设方便以及运行中紧急情况快速分闸操作;10 kV 配电系统采用 TT 保护接地方式,现场箱式变压器都围挡安全防护栏杆和粘贴反光警示标识,起到现场防护作用;为

方便洞内电气停电作业,8 号支洞进口洞附近安装了 10 kV 断路器与隔离开关;发电厂 10 kV 高压出线柜设置零序电流监控和报警保护装置,微机综合保护器具有三段式电流保护^[3],8 号洞方向系统配电网单线见图 2。

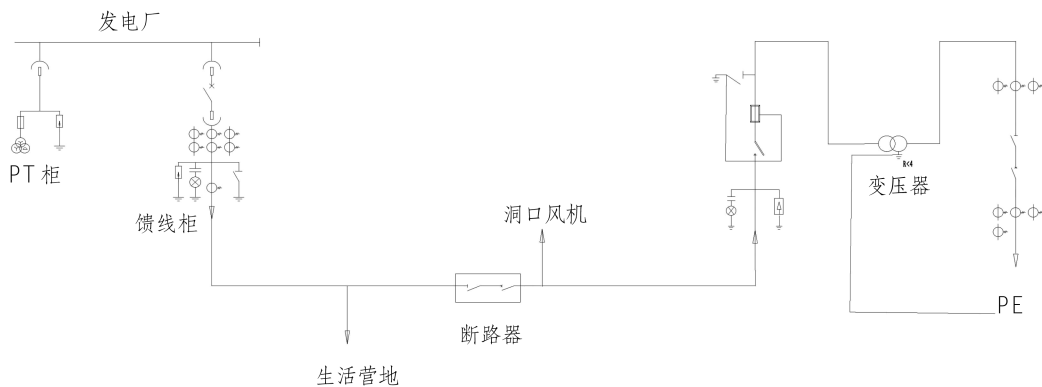


图 2 8 号洞方向系统配电网单线图

发电厂 PT 柜监察整个电网的运行状态,当 8 号支洞方向有接地故障时发出报警信号,同时馈线柜零序电流互感器也能发出报警信号,运行人员及时联系维护电工巡查排除故障,发电厂馈线柜内安装微机综合保护器,设有三段式电流保护,分别是电流速断、限时电流速断、过电流保护,有效地保障电网的安全运行;发电厂馈电柜到洞口断路器为 4 010 m、10 kV 架空线路,断路器到洞内箱式变压器为轻型铠装 10 kV 铝芯配电电缆敷设,箱式变压器 10 kV 侧采用高压负荷开关,洞内其它箱式变压器分支配电回路采用封闭的电缆分支箱作为电缆的连接^[4]。

2.2 供电范围和配电材料参数的选择

按照设计的电压损失计算 10 kV 进洞主配电缆线径,按照负荷性质和变压器合理供电范围半径计算 10 kV 箱式变压器配电缆参数(布置见图 2),自 8 号支洞口到主洞作业面高压进洞电缆设计分配电压损失 3%;功率因数 0.8,考虑 1、2 号隧洞同时衬砌作业情况存在可能性,设计隧洞内总计可使用功率 = $(1 \times 630 \text{ kVA} + 3 \times 315 \text{ kVA}) \times 0.9$ (负荷使用系数),额定工作电流 = $1\ 418 / \sqrt{3} \times 380 = 2\ 155 \text{ A}$;考虑至少同期启动设备的情况下线路上最大启动电流 $I_q = 160 \text{ kW}$ (水泵电机星三角启动电流) + 90 kW (混凝土拖泵星三角启动电流) = $7 \times 158 \text{ A} = 1\ 107.8 \text{ A}$;实际电缆最大承载电流 = $2\ 155 \text{ A} -$

379.8 A(启动水泵和地泵总的运行额定电流)
+1 107.8 A(启动电流)=2 883 A;箱变变比 10/
0.38,换算到高压侧为 109.55 A。

因此根据电压降计算公式:

$$\Delta U = \sqrt{3} I (\cos\phi + X \sin\phi) \approx \sqrt{3} IR \cos\phi$$

(忽略电抗)

$$R = 10 \text{ kV} \times 3\% \sqrt{3} I \cos\phi = 300 / 1.732 \times$$

$$109.55 \text{ A} \times 0.8 = 1.98 \Omega$$

尾水隧洞距离河床较近,考虑洞内出水的不可预见性,也就是全施工段面保证有足够容量的动力电源,所以按设计开挖最长距离计算 10 kV 电缆的线径,用于保证充足的排水设备布置在主洞内任何位置,最远点施工作业面距隧洞外电源点长 2 412 m,敷设施工补偿 200 m,所需电缆线径计算:

$$S = \rho L / R = 0.029 \times (2\ 412 + 200) / 1.98$$

$$= 38.26 \text{ mm}^2$$

通过计算选用 10 kV-YJLV22-3×50 mm² 电缆就可以满足以上条件的施工要求,但是考虑电缆电抗分量和洞内计划使用通风机冗余,最后选用 10 kV-YJLV22-3×70 mm² 规格作为 10 kV 高压进洞的主干线配电电缆。

主洞内 10 kV 高压分支电缆的选用不能仅考虑安全载流量,由于洞内环境复杂其分支不便于设置 10 kV 中段保护装置,更重要的是考虑短路电流冲击对电缆热稳定性的承受值和悬挂安装以及多次移设施工要保证足够的机械强度^[5]。影响因素还有发电厂到 8 号支洞供电线路还带有洞口的空压机、通风机和生活营地负荷,发电厂的过流保护整定按照线路总负荷的基础计算电流值为 110 A。所以,为保证主洞分支配电电缆的热稳定性电缆选用 10 kV-YJLV22-3×3.5 mm²,其额定工作电流 115 A,这样在隧洞内分支电缆短路或高阻接地或绝缘击穿短路的情况下是有足够的冗余电流值满足发电厂微机综合保护装置动作,提高了末段电缆的热稳定性,大大地保障了主洞洞内 10 kV 配电电缆安全和可靠性。

2.3 变压器的容量选择与最大启动电流以及短路电流计算

变压器容量的选择主要考虑的是所带负荷的总使用功率,同时要兼顾单台设备最大启动电流,在启动时满足系统运行电压降要求,400 V 电压

侧出线保护采用 DW-15 总断路器,起到过载、欠电压,短路保护作用,施工中使用的变压器采用 5 档位电压调节分接开关,满足对施工现场用电设备使用电压的优化调整要求,如施工现场普遍把电压变比调控在 10/0.4 kV,既能满足设备对电压的规范要求,同时补偿了设备大的启动电流造成的变压器内部损失压降;电气设计人员要根据变压器厂家提供的参数计算短路电流,作为策划采购断路器和电气材料的参照参数,从而保障配电网使用电气装置的可靠性和经济性。

例如容量为 630 kVA 的箱式变压器,变比为 10/0.4 kV,短路阻抗电压 4.48%,计算出低压侧三相短路电流为 $I = (630 / \sqrt{3} \times 0.4) / (0.0448) = 20.3 \text{ kA}$ 。所以变压器的低压侧保护断路器的选择计划采购中,表明 $I_{cs} = 25 \text{ kA}$ 就能满足配电系统要求,这个参数在工程实践中容易被忽略,购买大于这个参数的断路器,支出较高的采购费用。

3 配电系统的安全运行制度和现场作业供电保障

发电厂执行定期巡检制度,操作票制度,值班运行记录,维修保养运行记录,柴油消耗记录。充分利用信息技术的进步建立网络联动工作平台,把运行现场的参数传送到网络,这样有利于在工作平台上沟通及时查明异常运行参数的产生原因。例如,负荷电流的异常,零序电流接地的报警,短路保护动作时的发电厂运行工况,使电气维护人员分析故障原因更容易。乌干达卡鲁玛发电厂值班人员能做到从电厂的运行状态值分析每个隧洞工作面的施工状态并记录运行参数值在册,较为有利地保障了电网的安全可靠的运行。电网的维护做到表格化定期巡检制度,对架空外线,洞内电缆每周巡检并填报周记录,通过合理的安排洞内作业时间段保证洞内电气作业在 2 h 内完成,有力地保障了施工顺利进行。

卡鲁玛隧洞开挖和衬砌施工供电系统的突发应急预案,利用隧洞开挖前期的 500 kW 柴油发电机和平板运输车,用以保障配电系统故障和突发事件的应急使用,前期对供电网的细致策划设计最终也没有使用。

4 结 语

高压进洞配电系统是要按照实际施工情况统筹规划的,计算中要考虑多重因素,乌干达卡鲁玛

(下转第 129 页)

表1 柯拉光伏智能化建设方案表

| 柯拉智能应用 | 子任务 | 涉及软件系统 | 涉及硬件 | 建设时间 |
|---------|------------|----------------------|---|--------------------|
| 工程综合管理 | 无人机精度及质量监测 | 数字化勘测设计、无人机数据采集等 | 无人机采集和处理设备 | 建设期 |
| | 智能运营中心 | 运营可视 综合分析 智能诊断 | 总体态势、运营视图、运营报表、数字孪生系统 智能分析、运营分析、经营分析、售电辅助交易 组件清洗诊断、IV诊断、箱变温控诊断、组串阴影诊断 | 运营中心展示大屏 — — |
| 运维管理中心 | 智能诊断 | — | — | 运维期 |
| | 运维管理 | 工单管理、资产管理、运维分析等 | — | 运维期 |
| | 作业管控 | 作业流程安全环节记录、环境安全状态监测等 | 智能安全帽、智能手持终端等 | 运维期 |
| 运行控制中心 | 无人机巡检 | 无人机远程管理系统、光伏缺陷诊断算法等 | 无人机及图像采集设备、无人机库 | 运维期 |
| | 机器人巡检 | 机器人管理系统 | 巡检机器人 | 运维期 |
| | 运行监视 | 状态监测、监测视图 | — | 建设期 |
| 水风光互补调度 | 调度控制 | 功率预测、并网相关系统 | — | 建设期 |
| | 水风光互补调度 | 柯拉与两河口水光一体化控制系统 | — | 运维期 |
| 智能安防 | 智能监控管理 | 重点区域监控、AR全景监控、周界监控系统 | 智能摄像头、高点摄像头 | 建设期 |
| | 综合安防管理 | 综合安防管理系统 | — | 运维期 |
| 智能消防 | 智能火情识别 | 设备监控、高点监控、森林草原火情监测 | 可见光+红外热成像摄像头等 | 运维期 |
| | 消防应急处置 | 消防应急处置系统 | — | 运维期 |

为构建新型电力系统探索形成了可借鉴、可复制和可参考的模式。

参考文献:

[1] 中国科学院. 光伏行业研究报告[R]. 北京: 中国科学院, 2020.

[2] 周晨,魏杰. 光伏智能化管理技术发展现状及趋势分析[J]. 中国科技资讯, 2019, 33(11): 16-18.

[3] 范琳琳. 光伏智能化建设的优势与发展趋势[J]. 科技创新与应用, 2021, 26(2): 58-60.

[4] 王敏. 光伏智能化技术在新能源领域中的应用[J]. 电力电子技术, 2020, 54(7): 171-173.

[5] 周祥鸿,陈昌. 光伏智能化运维技术的应用现状[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 57-63.

作者简介:

邵欣(1988-),女,辽宁海城人,讲师,工学硕士,从事水利工程等教学;

汪彭生(1989-),男,安徽安庆人,高级工程师,工学硕士,从事水利水电项目管理相关工作;

杨志伟(1982-),男,四川绵阳人,柯拉光伏电站项目经理,硕士学位,从事新能源管理相关工作;

范智强(1992-),男,福建福州人,雅砻江流域水电开发有限公司工程师,工学士,从事水利水电项目管理相关工作;

吴智宇(1989-),男,朝鲜族,吉林桦甸人,雅砻江流域水电开发有限公司市场营销部主任,工学士,从事发电企业市场营销工作.

(责任编辑:廖益斌)

(上接第119页)

尾水隧洞项目受地质环境等影响造成施工中有很多不可预见性,施工作业使用的高压10 kV配电系统多次在洞内移设,由于选用了较好的箱式变压器,封闭的电缆分支箱和敷设方便的铝芯轻型铠装电缆,表现出移设方便快捷,运行安全可靠的良好性能,在每一个细节上做到了规范要求,为顺利履约提供了优质电源的保障。

参考文献:

[1] 交流电气装置的接地设计规范,GB/T 50065-2011[S].

[2] 建设工程施工现场供用电安全规范,GB/T 50194-2014

[S].

[3] 曹华. 微机综合保护监控系统在10 kV供电系统中的应用[J]. 科技前沿, 2008, 2(9): 106-108.

[4] 供配电系统设计规范,GB/T 50052-2021[S].

[5] 陈曼虹. 电力电缆金属屏蔽的截面积及其短路热稳定要求[J]. 电气技术, 2013, 14(12): 56-58.

作者简介:

刘阳(1991-),男,江苏徐州人,工程师,学士,从事水利水电工程设计工作;

马连生(1964-),男,河北新城人,高级技师,从事水电施工电气设计和施工管理工作.

(责任编辑:吴永红)