

废弃煤矿抽水蓄能发电新技术可行性分析

裴鹏,任天佑,李信,欧祥吉,李德宇,江雪,商大成

(贵州大学矿业学院,贵阳 550025)

摘要:为克服可再生能源天然的随机性和不稳定性,以及对电网蓄能设施越来越大的需求,提出了利用废弃煤矿的矿井空间建设地下抽水蓄能发电站的设想。通过以某废弃煤矿的实际布局为对象设计了地下蓄能电站,计算了电站主要参数,并分析了其经济技术和经济指标。研究结果表明,利用废弃煤矿改造建设蓄能电站具有可行性,为技术选址提供了参考,可有效降低建设成本,具有较好的社会经济和环境效益,也为类似条件下的废弃煤矿再利用提供了借鉴。

关键词:可再生能源;地下抽水蓄能;废弃煤矿再利用;可行性分析

中图分类号:TD989

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Feasibility Study on New Pumped Storage Power Generation Technology in Abandoned Coal Mine

PEI Peng, REN Tianyou, LI Xin, OU Xiangji, LI Deyu, JIANG Xue, SHANG Dacheng

(Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Renewable energy is an important strategy to achieve sustainable development, energy conservation and emission reduction in China. The renewable energy, such as wind power and solar power, accounts for an increasing proportion in the installed capacity of engine unit. However, due to its randomness and instability, the grid's demand for energy storage facilities is also increasing. In this study, it is proposed to use abandoned coal mines to construct underground pumped storage power generation facilities, which can effectively reduce construction costs and have good social, economic and environmental benefits. According to the actual layout of an abandoned coal mine, this study designed an underground storage power plant, calculated the main parameters, and analyzed its economic technology and economic indicators. The results show that it is feasible to use abandoned coal mines to transform and build storage power stations, which could provide a reference for the site selection and reuse of abandoned coal mines under the similar conditions.

Key words: renewable energy; underground pumped storage power; reuse of abandoned coal mines; feasibility analysis

抽水蓄能电站是通过水泵将下游水库的水经过管道输送到上游水库储存起来,由此将电能转换为

势能^[1]。在电网负荷大时,存储在上部水库中的水可以通过涡轮机返回到下游水库,势能重新转化电

* 收稿日期:2020-02-09

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础[2018]1039,黔科合 LH [2017] 7282), 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]117), 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字[2016]54 号)

作者简介:裴鹏(1982—)男,贵州贵阳人,博士,副教授,研究方向:能源类岩体力学、废弃矿井再利用,矿井新能源开发, E-mail: ppei@gzu.edu.com。

通讯作者:任天佑(1997—),男,内蒙古鄂尔多斯人,采矿工程专业, E-mail: 937594785@qq.com。

能。它可以将夜间多余的电能转变为白天的高价值电能。此外,抽水蓄能电站还具有调节电网频率、调节电网相位、黑启动等重要功能。同时因为火电站和核电站的起停周期较长,因此抽水蓄能电站还可减少电网中火电站和核电站的启停频率,提高发电效率。这样,既避免了火电机组自身运行的一些弊端,又增加了电力系统的供电能力,从而提高了电力系统运行的可靠性和经济性。抽水蓄能电站属于大型工程项目,其项目工程量巨大、建设周期长、建设资金投入多,且投资大部分用于上下游水库和水道的修建。此外,项目的选址还受山川河流等地形地貌条件的约束。利用废弃矿井改建为抽水蓄能电站可以减少地形地貌的限制,既便于施工,也可以实现废弃矿井的二次利用。

随着煤炭等矿产资源的不断开采以及我国不可再生能源的枯竭等多种原因,大量因资源开发而遗留下的矿洞随之废弃。矿藏开采后遗留下的矿洞具有巷道长、可利用空间大、结构简单、便于再次利用和水来源充足等特点,为利用废弃矿井建设地下抽水蓄能电站的设想提供了基础。从经济的角度上来说,利用开发过的矿井改建地下抽水蓄能电站,能明显减少电站建设的工程量和土地使用资源的费用,节约项目的投资资金^[2-5]。因此,利用废旧的矿井降低电站水库建设投资的效果显著。此外,相对于露天水库而言,矿井内的水资源蒸发小,且有地下水源作为补充。

从生态环境的角度看,利用废弃矿井对地表的沉降起到一定的控制作用,促进矿区自然生态环境的恢复,对建设绿色生态矿山具有更深远的意思^[6-8]。

义^[6-8]。

综上,利用地下废旧矿井资源改建为抽水蓄能电站的技术应用前景十分广阔,可以对废弃矿井进行再利用,由此对生态绿色矿山的建设迈出了崭新的一步。但是,目前对于利用地下废弃矿井建设抽水蓄能电站只停留在概念阶段,尚未见到有详细的研究设计和技术经济分析,对于利用地下矿井建设抽水蓄能电站是否真的具有技术经济上的可行性尚不明确。本研究以某实际废弃煤矿的井巷布局为依托,设计了地下抽水蓄能电站,提出了电站的布局,计算了主要设计参数,并且分析了技术经济特性^[9-12]。

1 研究方法

本文选择贵州某中小型废弃矿井作为研究对象,该矿井地质条件较好、巷道布置方式简单。基本计算流程分为抽水和输水两部分。抽水部分计算首先根据矿井基本参数计算上下游井巷(水库)容积、抽水流量,再由抽水流量选择适宜的水管管径,然后计算出抽水工况的水头损失,继而计算出抽水工况的平均扬程,根据扬程及流量选择合适的水泵,最后得出水泵每日工作的最大耗电量。输水部分因抽水与输水均用相同的上下游水库、同一条管路,所以输水流量、输水管管径部分的计算不再重复。首先由发电工况的水头损失继而计算出发电工况的平均水头,再根据矿井基本参数和计算结果选择合适的水轮发电机,最后根据建设抽水蓄能电站的成本和抽水蓄能电站运行 30 a 产生的经济效益进行经济技术分析。其详细计算流程如图 1 所示。

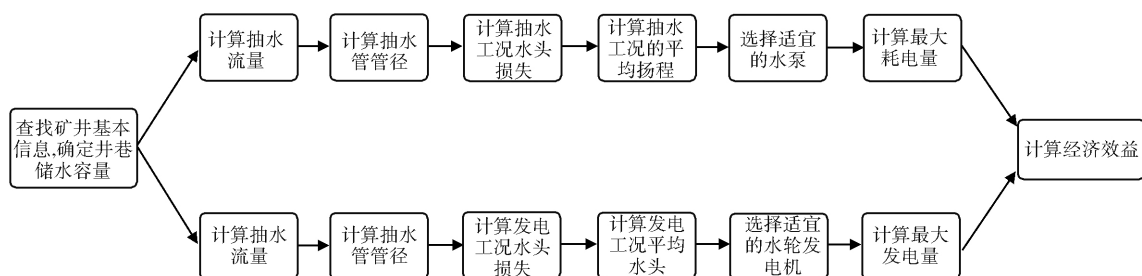


图 1 设计基本计算流程

Fig. 1 Basic calculation process

2 假设

设计过程中,在确定上、下游水仓蓄水库容时,以容积较小的上水仓最大容积为蓄水库容(且假设

上、下游水仓库容相等),每日发电时间设为 5 h,每日抽水时间设为 5 h;另外,设计中仅仅考虑技术因素,其他不可控及不确定的影响水头损失的因素不予考虑。本设计是以某矿现有废弃巷道作为研究原

型,通过技术分析来讨论抽水蓄能电站项目的可行性,不是指设计项目一定可行。废弃矿井改建为抽水蓄能电站示意图如图 2 所示。

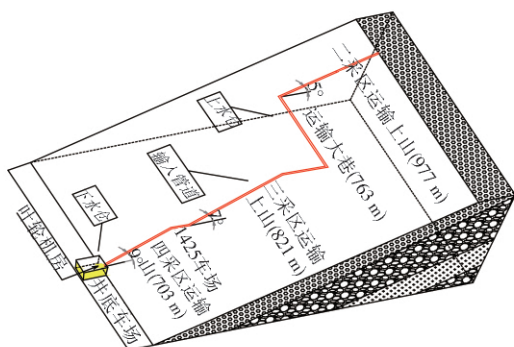


图 2 废弃矿井改建为抽水蓄能电站示意图
Fig. 2 Pumped storage power station reconstructed from the abandoned coal mine

3 计算过程

矿上游水仓选用二采区运输上山和运输大巷,二采区运输上山高差为 87 m,倾斜角度 5°,长度为 977 m,大巷长度为 763 m,二采区运输上山和运输大巷总容积为 25 233 m³。下游水仓为 +1 315 m 井底车场,其容积 31 541 m³,蓄水高度为 4.2 m。上游水仓正常蓄水位 +1 612 m,下游水仓正常蓄水位 +1 319.2 m。上游水仓与下游水仓容积之比为 4:5,因此定上游水仓为最大库容量。废弃矿井改建为抽水蓄能电站参数如表 1 所示。

表 1 废弃矿井改建为抽水蓄能电站参数
Table 1 Reconstruction parameters of pumped storage power station from the abandoned coal mine

参数项目	数值	参数项目	数值
上游水仓上水平标高/m	+1 612	下游水仓水平标高/m	+1 315
上游水仓下水平标高/m	+1 525	下游水仓蓄水位/m	4.2
上游水仓(斜巷)容积/m ³	14 170	下游水仓正常蓄水位/m	+1 319.2
上游水仓(斜巷)高差/m	87	下游水仓容积/m ³	31 541
上游水仓(斜巷)倾角/(°)	5	上游水仓与下游水仓容积之比	4:5
上游水仓(平巷)容积/m ³	11 064	输水巷道长度/m	1 524
上游水仓总容积/m ³	25 233		

3.1 计算耗电量

3.1.1 计算抽水流量

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

式中:V 为上水库蓄能库容,25 233 m³;t 为抽水时间,18 000 s。计算得 Q 为 1.4 m³/s,即 5 047 m³/h。

3.1.2 计算抽水管直径

$$D = \sqrt{\frac{4Q_c}{\pi v_j}} \quad (2)$$

式中:Q_c 为每条输水道最大引用流量,1.4 m³/s;v_j 为经济流速,取 2.4 m/s。计算得输水管直径 D 为 0.86 m,取公称直径为 900 mm(DN900)的铸铁管。

3.1.3 抽水工况水头损失

1)沿程水头损失:

$$H_f = \lambda \frac{lv^2}{2dg} \quad (3)$$

式中:H_f 为计算沿程水头损失,m;λ 为计算段粗率系数,0.02;l 为计算段长度,1 524 m;v 为计算流速,2.4 m/s;d 为输水管直径,0.9 m;g 为重力加速度,取 9.81 m/s²。计算可得水管沿程水头损失为 9.94 m。

2)局部水头损失:

$$H_j = (\xi_1 + 2\xi_2 + 2\xi_3) \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中:ξ₁ 为公称直径 900 mm 角度为 90°铸铁弯管局部水头损失系数,0.71;ξ₂ 为角度为 7°缓弯管局部水头损失系数,0.04;ξ₃ 为角度为 9°缓弯管局部水头损失系数,0.05。计算可得抽水局部水头损失 H_j 为 0.26 m。

3)抽水工况水头损失:

$$H_p = H_f + H_j = 10.2 \text{ m}$$

3.1.4 计算抽水工况的平均扬程

$$\bar{H} = Z_s - Z_x + H_p \quad (5)$$

式中:Z_s 为上游水库平均水位,1 568.5 m;Z_x 为下游水库平均水位,1 317.4 m;H_p 为发电工况水头损失,10.2 m;H̄ 为抽水工况的平均扬程,261.3 m。

3.1.5 确定水泵、电机型号

根据上式计算所得平均水头、抽水流量、输水管管径等参数,以及厂商提供水泵机组参数,选用 5 台型号为 MD1100-86×3 的水泵,其总扬程为 258 m,选用 3 级,轴功率 966 kW,配用电机功率 1 250 kW,该类型水泵机械效率为 87%。由水泵型号、级数、轴功率以及耗电量等参数,加上井下特殊的运行环境确定了相应匹配的电机型号,选型为 YB1250KW4P6KV 的防爆电机。

3.1.6 计算水泵最大耗电量

$$W_{ZH} = \frac{\bar{H}V\rho g}{\eta_b} \quad (6)$$

式中:H̄ 为平均水头,261.3 m;V 为上水库总容积,25 233 m³;ρ 为水的密度,1.0×10³ kg/m³;g 为重力加速度,取 9.81 m/s²;η_b 为泵的机械效率,取 87%;W_{ZH} 为泵的最大耗电量,20 651.7 kW·h。

3.2 计算发电部分

抽水蓄能电站输水发电时和抽水耗电时的流量、流速是一致的,所以输水发电和抽水耗电共用一条公称直径为 900 mm(DN900)的铸铁管。输水管直径、发电工况水头损失与抽水时的工况水头损失一致,均为 10.2 m,所以本文不作重复计算。

3.2.1 计算发电工况平均水头

$$\bar{H} = Z_s - Z_x - H_T \quad (7)$$

式中: Z_s 为上水库平均水位,1 568.5 m; Z_x 为下水库平均水位 1 317.4 m; H_T 为发电工况水头损失 10.2 m; \bar{H} 为平均水头 240.9 m。

3.2.2 计算最大可发电量

$$W_{ZF} = \bar{H}V\rho\eta_t \quad (8)$$

式中: \bar{H} 为平均水头,240.9 m; V 为上游水库总容积,25 233 m³; ρ 为水的密度,1.0×10³ kg/m³; g 为重力加速度,取 9.81 m/s²; η_t 为发电机的机械效率,取 92%。计算可得最大发电量 W_{ZF} 为 15 239.1 kW·h。

3.2.3 确定水轮机型号

根据上式计算所得平均水头、抽水流量以及输水管直径,初选型号为 SFW3000-10/1730 的水轮发电机;选用型号为 CJC601-W-110/2×11.5 的水轮机。

3.3 发电效率

$$\eta_{FL} = \frac{W_{ZF}}{W_{ZH}} = 74\% \quad (9)$$

4 讨论

抽水蓄能电站每日抽水 5 h,每天总耗电量为 20 651.7 kW·h,工业用电每度 0.425 元,因此每天抽水消耗的费用是 8 777 元。而电站每天能发电 15 239.1 kW·h,以每度 1.025 元的价格卖出,每日收入可得 15 620 元,每日净收益为 6 843 元,每年可收益约 246 万元。

抽水蓄能电站水轮机发电机单套机组出厂价格

约 300 万;输水管长度 1 524 m,直径 900 mm 的铸铁管道输水管道费用需 80.7 万元,安装、维护、加固等总需约 100 万元;购买所需的 5 台抽水水泵、防爆电机需花费 161.7 万元;运输费用及安装费用等需花费 14.6 万。此电站在建设初期设备总共需要花费 576.3 万元。

电站可正常工作 30 a,把总投资折算入每年的费用,由下式可得:

$$A = P \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

式中: P 为现值,约 576.3 万元; i 为年复利为 10% 的现值系数。计算可得年值 A 约为 61.1 万元。

计算年利润

$$L = S - A \quad (11)$$

式中: S 为年总收益,246 万元; A 为年费用,61.1 万元。计算可得年利润 L 为 184.9 万元。

由上述计算结果可知,如不考虑人员劳务费用和设备维修费,抽水蓄能电站每年能够盈利 184.9 万元,由此可见利用废弃煤矿地下井巷修建抽水蓄能电站成本和收入基本持平,所以修建抽水蓄能的方案具有一定的可行性。

5 结论

1) 本文依据贵州某废弃矿井建设抽水蓄能电站,经过理论计算和实地考察分析,认为该项目能降低建库成本,具有良好的经济、社会和环境效益。

2) 抽水蓄能电站的改建利用了贵州电费较低的有利条件,在夜晚用电谷时,电费较低,抽水将富裕的电量转化为水的势能储存起来;在白天用电峰时,将水的势能转化为电能,既可以维持用电的稳定性又可以为矿井用电节省很大一部分开支。通过技术经济分析,收益和成本基本持平,所以废弃矿井修建抽水蓄能电路的方案具有一定的可行性。

参考文献:

- [1] 张新伟. 抽水蓄能电站侧式进/出水口设计研究及 CFD 模拟[D]. 成都:西华大学,2008.
- [2] 史晓明. 基于可持续发展的矿地协同利用与管理[D]. 北京:中国地质大学,2013.
- [3] 朱训. 关于发展绿色矿业的几个问题[J]. 中国矿业,2013,22(10):1-6.
ZHU Xun. Several Issues of Green Mining Development[J]. China Mining Magazine,2013,22(10):1-6.
- [4] 刘明,李树志. 废弃煤矿资源再利用及生态修复现状问题及对策探讨[J]. 矿山测量,2016,44(3):70-72,127.
LIU Ming, LI Shuzhi. Study on Problems and Countermeasures of Present Situation of Abandoned Coal Mine Resource Reuse and Ecological Restoration[J]. Mine Surveying,2016,44(3):70-72,127.

(下转第 9 页)

度、是否存在落差大于 3 m 的断层。运用 BP 神经网络手段,建立矿压显现程度的预测模型,对整个采区矿压显现的剧烈程度进行划分,对于指导矿井生

产过程中矿压的预防、支护措施的制定及矿井的安全生产具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 侯博. 赵庄煤矿煤巷掘进冲击地压产生机理与测控技术研究[J]. 能源技术与管理, 2019, 44(5): 141-143.
HOU Bo. Research on the Mechanism and Measurement and Control Technology of Rockburst in Coal Roadway Driving in Zhaozhuang Coal Mine[J]. Energy Technology and Management, 2019, 44(5): 141-143.
- [2] 杨岁寒. 综采放顶煤工作面冲击地压微震事件分布规律研究[J]. 能源与环保, 2019(9): 52-56.
- [3] 张家乐. 小庄煤矿 40214 工作面冲击地压防治技术[J]. 煤炭技术, 2019, 38(7): 144-146.
ZHANG Jiale. Comprehensive Prevention and Control Technology of Impact Ground Pressure on 40214 Working Face in Xiaozhuang Coal Mine [J]. Coal Technology, 2019, 38(7): 144-146.
- [4] 宋红立. 特厚坚硬煤层分层放顶煤开采冲击机理及防治技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [5] 赵辉. 冲击地压煤层掘进巷道“卸-支”协同治理技术及应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(10): 75-78.
ZHAO Hui. Co-processing Technology and Application of “Unloading-support” for Roadway Driving in Coal Seam with Impact Pressure[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019(10): 75-78.
- [6] 代树红, 王晓晨, 潘一山, 等. 模量指数评价煤的冲击倾向性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1726-1731.
DAI Shuhong, WANG Xiaochen, PAN Yishan, et al. Experimental Study on the Evaluation of Coal's Impact Tendency by Modulus Index[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1726-1731.
- [7] 魏永启, 周芳, 魏效喆. 赵楼煤矿 5303 工作面冲击地压危险性分析[J]. 山东煤炭科技, 2019(5): 166-169.
WEI Yongqi, ZHOU Fang, WEI Xiaoshu. Risk Analysis of Impact Ground Pressure of 5303 Working Face in Zhaolou Coal Mine[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2019(5): 166-169.

(编辑: 樊 敏)

(上接第 4 页)

- [5] 张兴, 王凌云. 矿山地质环境保护与治理研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(8): 52-55.
ZHANG Xing, WANG Lingyun. Research on the Protection and Treatment of Subarea, Classification and Gradation for Mining Geological Environment[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(8): 52-55.
- [6] 陈乐. 新型煤化工产业发展规划研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [7] 王婷婷, 曹飞, 唐修波, 等. 利用矿洞建设抽水蓄能电站的技术可行性分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 195-200.
WANG Tingting, CAO Fei, TANG Xiubo, et al. Technical Feasibility Analysis of Utilizing Mine to Construct Pumped Storage Plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(1): 195-200.
- [8] 王斌. 我国绿色矿山评价研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [9] 鞠建华, 强海洋. 中国矿业绿色发展的趋势和方向[J]. 中国矿业, 2017, 26(2): 7-12.
JU Jianhua, QIANG Haiyang. The Trend and Direction of Green Development of the Mining Industry in China[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(2): 7-12.
- [10] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 965-972.
XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, et al. A New Technology of Pumped-storage Power in Underground Coal Mine: Principles, Present Situation and Future[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 965-972.
- [11] 高传昌. 抽水蓄能电站技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011.
- [12] 张景松, 杨春敏. 流体力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.

(编辑: 樊 敏)