

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.01.013

潮汐电站机组变速运行特性研究

门闯社^{1,2}, 南海鹏^{1,2}, 李国风², 罗兴铸^{1,2}, 郑小波^{1,2}, 刘东³

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对潮汐电站水头变化频繁且变幅大、水轮机长时间偏离设计工况运行造成的机组运行效率和发电量低的问题, 本文提出了一种变转速潮汐水轮发电机组, 阐明了机组变速运行特性, 分析了其效益。首先, 基于水轮机模型综合特性曲线获得了其变速运行最优特性, 在此基础上明确了机组在各水头和出力下最优转速的计算方法, 为机组变速运行的控制提供了依据。其次, 以江厦3号机组为例分析了机组变速运行的水轮机效率变化情况, 机组正向运行效率最大提高23.39%, 反向运行效率最大提高33.55%, 说明变速运行可提高运行效率并改善运行工况。最后, 比较了潮汐电站典型潮汐周期内机组变速运行发电量的变化情况, 江厦电站3号机组发电量提高约3.65%, 其中正向发电时长延长3 min, 发电量提高0.97%, 反向发电时长延长8 min, 发电量提高10.40%, 说明机组变速运行可延长发电时长、提高发电量。结果表明: 机组变速运行是提高潮汐电站机组综合效益的有效途径。

关键词: 潮汐电站; 发电量; 运行效率; 变速运行

中图分类号: TK79

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)01-0090-06

Study on characteristics of variable speed operation for tidal power unit

MEN Chuangshe^{1,2}, NAN Haipeng^{1,2}, LI Guofeng², LUO Xingqi^{1,2},
ZHENG Xiaobo^{1,2}, LIU Dong³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: Tidal power units have been operating under off-design conditions for a long time, which results in low operation efficiency and low power generation. In this paper, one of variable speed tidal power units is proposed for solving this problem. Firstly, the optimal operation characteristics of variable speed unit are obtained on the basis of hydro-turbine model synthetic characteristic curves. On this basis, the optimal speed calculation method is proposed for each head and power, which provides a reference for the control of variable speed unit. Secondly, the turbine operation efficiency changes are analyzed on the case of Jiangxia Power Plant 3# unit. The efficiency can be increased by a maximum 23.39% at forward and 33.55% at reverse. This phenomenon reveals that variable speed operation can improve operation efficiency and ameliorate operation conditions. Finally, the power generation of variable speed tidal power unit is compared with conventional tidal power unit in a typical tidal cycle. The Jiangxia Power Plant 3# unit power generation can be increased by about 3.65%, in which the generating power is increased by 0.97% at forward and by 10.40% at reverse. The generating time is extended 3 min at forward and 8 min at reverse. This phenomenon illustrates that variable speed operation can prolong generation time and increase power generation, with the result that variable speed operation is an ef-

收稿日期: 2020-09-10; 网络出版日期: 2020-12-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201228.0908.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1501900); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-742); 陕西省教育厅科研计划资助项目(19JK0570)

第一作者: 门闯社, 男, 博士, 讲师, 研究方向为水力机组控制。E-mail: menchuangshe@126.com

fective way to improve the comprehensive benefits for tidal power unit.

Key words: tidal power plant; power generation; operation efficiency; variable speed operation

我国海岸线漫长,潮汐能总蕴藏量为 1.9 亿 kW,可开发装机容量为 0.36 亿 kW,储量巨大。相比于其它新能源发电方式,潮汐发电运行规律性强,资源可准确预报^[1-2]。与常规水电相比,潮汐电站开发费用较低,还可兼顾围垦、养殖等项目,综合效益显著^[3],开发前景广阔。

水轮发电机组作为潮汐电站的主要动力设备,其效率和发电量直接关系到电站经济效益,潮汐电站水头低且随潮水涨落呈周期性变化,变化速率快、变幅大,水轮机定转速运行时绝大部分时间处于非最优工况,偏离设计水头时水轮机运行效率低下,由此引起部分潮汐电站发电量低,发电效益不高。因此,提高潮汐电站水轮机效率和机组发电量对大规模开发潮汐能有重要意义。

目前主要通过水轮机优化设计提高潮汐电站水轮机效率。王正伟等^[4]对江夏电站 6 号水轮机灯泡比、导叶和桨叶翼型进行了优化设计,优化后的水轮机水力效率和出力均有所提高。Choi 等^[5]分析了水轮机轮毂比对水力效率的影响,得出在一定范围内减小轮毂比可提高水轮机效率。导叶与桨叶间的合理匹配设计^[6]及桨叶参数的优化选取^[7]均可提高水轮机效率。采用双侧导叶贯流式水轮机可使反向发电工况最高效率提高约 10%^[8],却降低了正向发电工况的效率。采用桨叶自寻优方案对真机协联关系进行优化亦可提高水轮机运行效率^[9-11]。以上文献通过水力设计、结构优化和协联关系优化等手段提高了水轮机效率,但均未从根本上解决潮汐电站机组长时间偏离最优工况运行造成的水轮机运行效率急剧下降的问题。

提高潮汐电站机组发电量的研究主要集中于优化运行调度方式,应用动态规划法^[12-13]、粒子群算法^[14]、遗传算法^[15-18]等算法对发电量最大的目标函数进行求解,优化电站运行调度方案,该方法统筹了潮汐变化与水库水位变化的关系,可提高电站发电量。但此方式以发电量最大为目标,效率的降低通常由增大流量来补偿,没能从根本上提高机组运行效率,在一定程度上忽略了水轮机偏离最优工况后稳定性差的问题。

目前潮汐电站水轮发电机组常采用转速恒定的同步发电机。随着电力电子技术的飞速进步,采用双馈电机或通过全功率变流器并网的变速技术受到行业关注。目前,日本等国在抽水蓄能及常规电站机组中通过变速技术提高水轮机偏离最优工况运行

效率的技术较为成熟^[19-22],其主要目的在于提高机组调节响应速度及运行稳定性和灵活性,同时提高机组对水头变化的适应性^[23-26],但对于其在水头变化更频繁、变幅更剧烈的潮汐电站中的研究或应用尚未有所报道。因此,本文提出将变速运行方法用于潮汐发电机组,在水轮机变速运行最优特性的基础上确定了机组在各水头和出力下的最优转速,分析了潮汐发电机组变转速运行后水轮机效率及发电量的变化情况。

1 水轮机变速运行最优特性

水轮机定转速运行时,水头与出力确定后,效率随之确定。当水头偏离设计水头时水轮机运行工况点迅速偏离高效率区,造成效率急剧下降,水轮机变速运行则是通过改变转速使机组持续运行于较高效率区。

水轮机出力 P 为^[27]:

$$P = \gamma Q H \eta \quad (1)$$

式中: γ 为水的容重, N/m^3 ; Q 为水轮机流量, m^3/s ; H 为水轮机工作水头, m ; η 为水轮机效率。

水轮机单位出力 P_{11} 及单位流量 Q_{11} 为^[27]:

$$P_{11} = \gamma \eta Q_{11} \quad (2)$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} \quad (3)$$

式中: D_1 为水轮机标称直径, m 。

联立式(1)~(3)可得:

$$P_{11} = \frac{P}{D_1^2 H^{1.5}} \quad (4)$$

由式(2)可计算水轮机模型综合特性曲线上各工况点的单位出力,并将各单位出力相同的工况点依次连接即得各等单位出力线。

由式(4)可见,水轮机水头和出力为确定值时,水轮机单位出力亦为确定值,水轮机运行工况点位于该等单位出力线上。结合式(2)可知,机组水头和出力为确定值时单位流量 Q_{11} 与水轮机效率 η 成反比,即 Q_{11} 最小时 η 最高。

因此,在水轮机模型综合特性曲线上绘制等单位出力曲线,依次连接各等单位出力线上 Q_{11} 最小工况点所得曲线即为水轮机在给定水头与出力下变速运行的效率最高工况点集合,该曲线即为水轮机变速运行最优特性曲线,此时单位出力与单位转速、单位流量、效率以及导叶开度的关系随之确定。水轮机变速运行时通过调整机组转速控制水轮机工况

点落在最优特性曲线上,从而提高机组运行效率、改善运行工况,减轻机组振动和空蚀。

以 F03 贯流转桨可逆式水轮机为例,由其正、反向模型综合特性曲线所绘等单位出力线如图 1 中红色虚线所示,所得变速运行最优特性曲线如图 1 中蓝线所示。

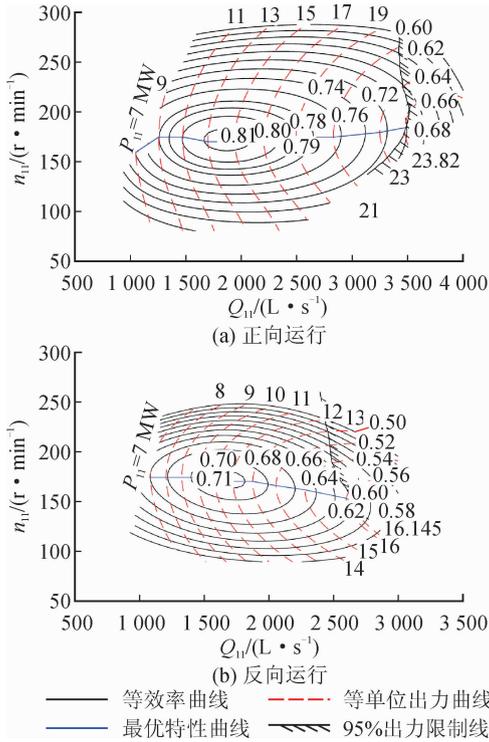


图 1 F03 水轮机变速运行模型综合特性曲线
Fig. 1 Variable speed operation combination characteristic curves of F03 turbine

由图 1 可见,变速运行最优特性曲线穿过模型综合特性最优工况点,且单位转速始终保持在最优单位转速附近。随单位流量增加,水轮机正向发电时单位转速先减小后增大且增大速度逐步加快、反向发电时单位转速持续减小且减小速度逐步变快。

2 机组变速运行转速及效率分析

以江夏电站 3 号机组为例,同步转速 n_r 为 125 r/min,水轮机型号为 GZN(F03)-WP-250,额定功率 P_r 为 761 kW,最大水头 H_{\max} 为 5.5 m,正向最小发电水头为 1.2 m,反向最小发电水头为 1.5 m,设计水头 H_r 为 3 m。

2.1 机组变速运行转速分析

机组在各水头和出力下的单位出力可由式(4)计算,根据水轮机变速运行最优特性曲线上单位出力与单位转速的关系可得各单位出力下的最优单位转速,由式(5)计算机组最优转速。

$$n = \frac{n_{11} \sqrt{H}}{D_1} \quad (5)$$

式中: n 为水轮机转速, r/min; n_{11} 为水轮机单位转速, r/min。

绘制出机组在各水头和出力下的最优转速曲面见图 2,可据此查询机组在当前水头和给定出力下的最优转速。

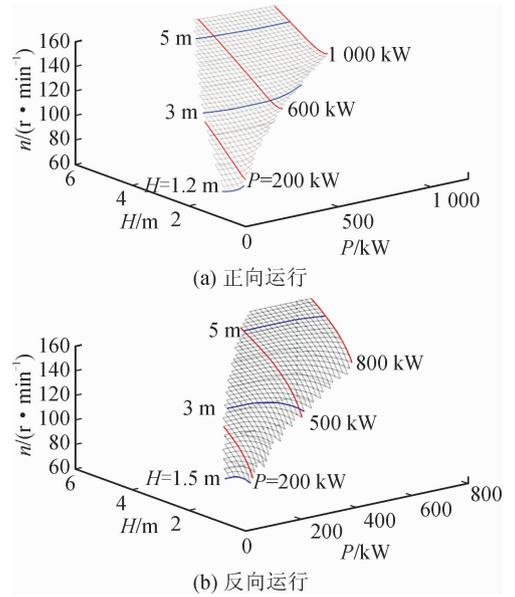


图 2 机组变速运行最优转速曲面

Fig. 2 Optimal speed surface of variable speed unit

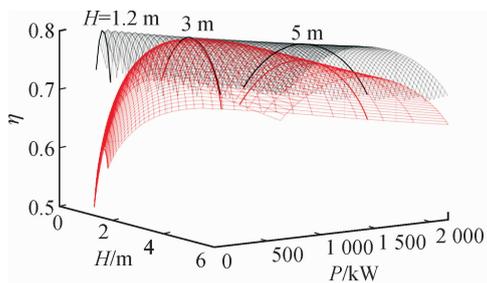
由图 2 可见,无论水轮机正向运行还是反向运行,在水轮机工作水头不变的情况下,最优转速随出力的变化幅值相对较小;在水轮机出力不变的情况下,最优转速随水轮机工作水头的变化幅值相对较大。

该水轮机正向发电时,最优转速随出力增加先减小后增加,且增加速度逐步变快,反向发电转速随出力增加持续减小且减小速度逐步变快。机组出力不变时,机组正向发电转速随水头增加先减小后增大,反向发电转速随水头增加持续增大且增大速度逐步变缓。

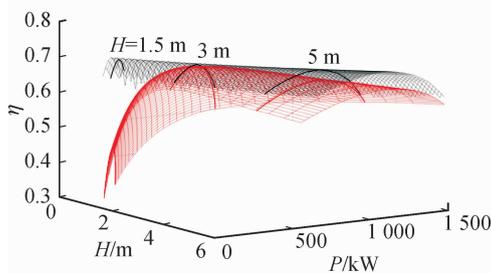
同时,由图 2 还可以看出,变转速机组运行在设计水头附近时,转速与同步转速相近;低于设计水头时,转速小于同步转速;高于设计水头时,转速大于同步转速。在运行水头范围内,机组正向发电时转速变化范围为 $60.30\% n_r \sim 131.38\% n_r$,反向发电时转速变化范围为 $58.74\% n_r \sim 131.62\% n_r$ 。实际使用中选用的机组转速变化范围应综合考虑机组轴承的承载能力及转子离心力的承受能力等约束条件。

2.2 机组变速运行时水轮机效率分析

机组定转速运行时,由式(5)可得各水头下的单位转速,由式(4)可得各水头及出力下的单位出力,由此可在水轮机模型综合特性曲线上确定工况点进而获得水轮机效率,所得机组在不同水头及出力下的效率曲面如图3中红色曲面所示。机组变速运行时,由式(4)可得各水头及出力下的单位出力,据此在水轮机变速运行最优特性曲线上确定水轮机运行工况点和效率,由此得机组在不同水头及出力下的效率曲面如图3中黑色曲面所示。



(a) 正向运行



(b) 反向运行

□ 机组定速运行 □ 机组变速运行

图3 机组变速及定速运行时水轮机效率比较
Fig.3 Efficiency comparison of turbines at variable and fixed speed

由图3可看出,机组偏离设计工况时,定转速运行的水轮机效率明显下降,且在低水头区域效率下降尤为明显,但变速运行的水轮机效率下降不明显,水头变化对机组效率的影响明显降低。

由图3还可以看出,无论机组正向还是反向发电,水轮机变速运行效率始终大于定速运行效率。设计工况附近,水轮机定速运行和变速运行效率相近,但偏离设计工况时,机组变速运行效率大于定速运行效率,且工况偏离越大变速运行效率提高越明显。水头低于设计水头时变速运行效率提高更显著。机组在最小水头下发最小出力时,变速运行效率提高最大,正向运行效率可提高23.39%,反向运行效率可提高33.55%。

3 潮汐电站机组变速运行发电量分析

仍以江夏电站3号机组为例,计算并分析一个

典型潮汐周期内机组定、变速运行时库水位和机组水头、效率、出力及发电量的变化。

电站库容曲线见图4^[28],由于水产养殖和围垦限制,水库水位 Z_k 允许范围为 $-1\sim 1.7\text{ m}$ ^[29],潮水位 Z_c 变化如图5中蓝线所示,3号水轮机模型综合特性曲线见图1。为方便计算和对比,本算例中机组定、变速运行时各水头下的出力按定转速运行时该水头下允许的最大出力计算,即额定水头以上时,机组出力按发电机出力限制线计算,额定水头以下时,机组出力按水轮机出力限制线计算。

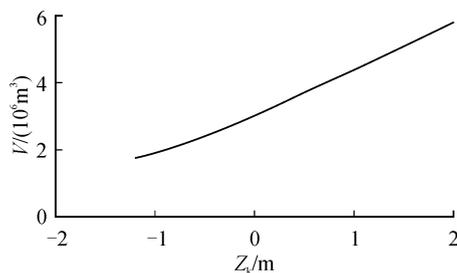


图4 库容曲线

Fig.4 Reservoir storage capacity curve

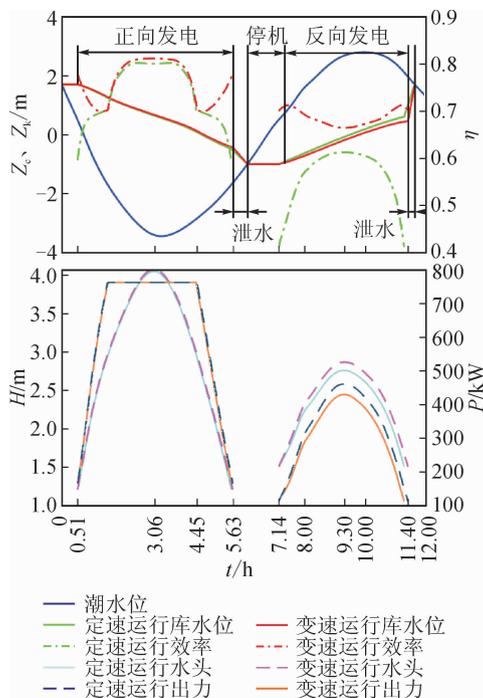


图5 机组定、变速运行时库水位和机组效率、水头及出力的变化

Fig.5 Changes of reservoir level, efficiency, head and power of unit at fixed and variable speed

在选取的潮汐周期内,计算所得机组定、变速运行时库水位 Z_k 和机组效率 η 、水头 H 及出力 P 随时间 t 的变化见图5。图5中机组各时刻出力的积分即为一个潮汐周期内机组发电量,机组定、变速运行时各时刻出力偏差的积分即为发电量差值,见表1。

表1 一个潮汐周期内一台机组定、变速运行时的发电量

Tab.1 Power generation of unit at fixed and variable speed in one tidal cycle

类别	正向发电	反向发电	合计
定速发电量/kWh	3 225.18	1 290.07	4 515.25
变速发电量/kWh	3 256.38	1 423.72	4 680.10
发电量差值/kWh	31.20	133.65	164.85
发电量提高率/%	0.97	10.40	3.65

由图5可见如下结论。

1) 无论机组正向还是反向发电,机组水头及出力随潮水位和库水位变化而变化。当机组水头在额定水头以上时,机组出力受发电机出力限制为额定出力。反向发电时机组水头始终小于额定水头,出力始终小于额定出力。

2) 机组效率随潮水位和库水位变化而变化,且变速运行效率始终不低于定速运行效率。正向发电时,机组定、变速运行效率曲线在额定水头处出现转折点,该工况点对应于水轮机出力限制线与发电机出力限制线的交点。反向发电时,机组水头始终小于额定水头,因此效率曲线未出现转折点。

3) 机组变速运行出力始终不低于定速运行出力。由于机组变速运行后效率提高,节约了发电流量,使得库水位变化速度变缓,可在一定程度上提高机组水头,继而提高机组出力。正向发电时的最大水头提高了 $1\% H_r$,反向发电时的最大水头提高了 $3.7\% H_r$,最大出力提高了 $4.1\% P_r$ 。

4) 变速运行时的机组发电时长大于定速运行。由于机组变速运行后水头提高,使得在机组定速运行发电结束时刻的水头仍大于最小发电水头,从而延长发电时长,正向发电时长延长了3 min,反向发电时长延长了8 min。

5) 水头大于设计水头时,机组变速运行效率提高不明显,对库水位线、机组水头和出力的影响较小。水头低于设计水头时,机组变速运行效率提高更为显著,对库水位线、机组水头和出力的影响更大。

由表1可见,机组变速运行时,发电量提高率约为3.65%,其中正向发电量提高了0.97%,反向发电量提高了10.40%。这主要是由于反向发电时水头低于设计水头较多,机组变速运行时效率提高更显著。

4 结 论

本文针对潮汐电站水头变幅大、非设计工况运行时间长等特点造成的机组运行效率和发电量低的问题,提出机组采用变速运行方法以提高其运行效

率和发电量。分析表明,机组变速运行是提高潮汐电站机组综合效益的有效途径,具体结论如下。

1) 基于水轮机模型综合特性曲线可获得水轮机变速运行最优特性和机组各水头和出力下的最优转速,为机组变速运行的控制提供依据。

2) 偏离设计水头时,机组变速运行效率大于定速运行效率,且水头偏差越大运行效率提高越明显,低于设计水头时效率提高尤为显著。江夏电站3号机组变速运行时,正向运行效率最大可提高23.39%,反向运行效率最大可提高33.55%。

3) 潮汐电站机组变速运行后,可延长发电时长、提高发电量。江夏电站机组变速运行后发电量可提高约3.65%。

4) 潮汐电站机组变速运行不仅可提高机组发电效益,还可改善运行工况。

参考文献:

- [1] 武贺,王鑫,李守宏. 中国潮汐能资源评估与开发利用研究进展[J]. 海洋通报, 2015, 34(4): 370-376.
WU He, WANG Xin, LI Shouhong. Advance in the study of assessment and utilization of tidal energy resource in China[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(4): 370-376.
- [2] 戴庆忠. 潮汐发电的发展和潮汐电站用水轮发电机组[J]. 东方电气评论, 2007, 21(4): 14-24.
DAI Qingzhong. Hydraulic generating sets of tidal power station[J]. Dongfang Electric Review, 2007, 21(4): 14-24.
- [3] 段宏江,张继成. 大型潮汐电站关键技术浅析[J]. 西北水电, 2012(增刊1): 28-33.
DUAN Hongjiang, ZHANG Jicheng. Study on key technology of large-sized tidal power station[J]. Northwest Hydropower, 2012(S1): 28-33.
- [4] 王正伟,杨校生,肖业祥. 新型双向潮汐发电水轮机机组性能优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 417-421.
WANG Zhengwei, YANG Xiaosheng, XIAO Yexiang. Hydraulic performance optimization of bidirectional tidal power turbine [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 417-421.
- [5] VU V L, CHEN Zhenmu, CHOI Y D. Effect of the hub to tip diameter ratio to the performance of a bulb hydro turbine model[J]. The KSFM Journal of Fluid Machinery, 2019, 22: 5-11.
- [6] 李凤超,樊红刚,王正伟,等. 贯流式机组桨叶与导叶全三维联合设计[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 206-209, 234.
LI Fengchao, FAN Honggang, WANG Zhengwei, et al. Three-dimensional coupled design for runner blades and guide vanes of tubular turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 206-209, 234.

- [7] YANG Wei, WU Yulin, LIU Shuhong. An optimization method on runner blades in bulb turbine based on CFD analysis[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(2): 338-344.
- [8] 杨春霞, 郑源. 潮汐机组双向发电性能数值模拟研究[J]. *海洋技术学报*, 2016, 35(5): 37-40.
YANG Chunxia, ZHENG Yuan. Research on the numerical simulation of a tidal unit's bidirectional power generating performance [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2016, 35(5): 37-40.
- [9] 王德意. 水轮机浆叶步长递减循环搜索自寻最优调节的研究[J]. *陕西水力发电*, 1991(2): 32-39.
- [10] 李正贵. 灯泡贯流式水轮机协联关系及性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2014.
LI Zhenggui. The research of combination relationship and performance of bulb tubular turbine[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [11] 庄瑞玉, 陈启明, 彭礼平, 等. 转桨式水轮机调速系统节水增效控制方法研究[J]. *水电与新能源*, 2018, 32(1): 38-40, 43.
ZHUANG Ruiyu, CHEN Qiming, PENG Liping, et al. Water saving and efficiency improving control of the governor in Kaplan hydro-turbines [J]. *Hydropower and New Energy*, 2018, 32(1): 38-40, 43.
- [12] 芮钧, 张兴珏, 陈守伦. 潮汐电站优化调度研究[J]. *水利科技与经济*, 2006, 12(11): 782-783.
RUI Jun, ZHANG Xinjue, CHEN Shoulun. Optimal operation for tide power stations[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2006, 12(11): 782-783.
- [13] 杨贵程, 郑源, 丁丽香, 等. 单库单向运行潮汐电站发电量最大化计算模型及应用[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(3): 213-216.
YANG Guicheng, ZHENG Yuan, DING Lixiang, et al. Maximum capacity calculation model for unidirectional single-reservoir tidal power station and its application[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(3): 213-216.
- [14] 阳洋. 潮汐电站短期预测及优化调度[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
YANG Yang. Short-term forecasting and optimal operation in tidal power station[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [15] NETO P B L, SAAVEDRA O R, RIBEIRO L A S. Optimization of electricity generation of a tidal power plant with reservoir constraints[J]. *Renewable Energy*, 2015, 81: 11-20.
- [16] 李晓英, 陈守伦, 徐丽娜. 基于改进浮点遗传算法的潮汐电站优化运行[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(14): 27-30.
LI Xiaoying, CHEN Shoulun, XU Lina. Optimum operation for tidal power station based on improved floating point genetic algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(14): 27-30.
- [17] NEILL S P, ANGELOUDIS A, ROBINS P E, et al. Tidal range energy resource and optimization-past perspectives and future challenges[J]. *Renewable Energy*, 2018, 127: 763-778.
- [18] ANGELOUDIS A, KRAMER S C, AVDIS A, et al. Optimising tidal range power plant operation[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 680-690.
- [19] ILIEV I, TRIVEDI C, DAHLHAUG O G. Variable-speed operation of Francis turbines: a review of the perspectives and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 103: 109-121.
- [20] SIVAKUMAR N, DAS D, PADHY N P. Variable speed operation of reversible pump-turbines at Kadamparai pumped storage plant-a case study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78: 96-104.
- [21] VON NESSEN-LAPP W. 变速水泵水轮机优势分析[J]. 孙颖译. *国外大电机*, 2005(4): 75-80.
- [22] KOKADO T. 大河内水电厂首台大型调速抽水蓄能系统[J]. 许善椿译. *国外大电机*, 1998(1): 34-42.
- [23] 刘宪林, 闫庆方, 崔召辉, 等. 交流励磁水轮发电机组变速运行效益分析[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(4): 235-239.
LIU Xianlin, YAN Qingfang, CUI Zhaohui, et al. Benefit analysis on variable speed operation of AC excitation hydrogenerator unit [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(4): 235-239.
- [24] KORITAROV V, GUZOWSKI L, FELTES J, et al. Modeling adjustable speed pumped storage hydro units employing doubly-fed induction machines[R]. Chicago: Argonne National Laboratory, 2013.
- [25] VALAVI M, NYSVEEN A. Variable-speed operation of hydropower plants: past, present, and future[J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2018, 24(5): 18-27.
- [26] 毛敏. 三河口电站大容量四象限变频调速方案研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
MAO Min. Research on the high-capacity and four-quadrant frequency conversion speed regulating scheme for the Sanhekou Hydropower Station [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [27] 刘大恺. 水轮机[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997.
- [28] 浙江省电力公司. 江厦潮汐试验电站[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [29] 叶凌飞, 王春辉, 陈刚. 潮汐电站能量计算[J]. *西北水力发电*, 2007, 23(1): 33-35.
YE Lingfei, WANG Chunhui, CHEN Gang. The energy balance computation of the tide power station[J]. *Journal of Northwest Hydroelectric Power*, 2007, 23(1): 33-35.