

导叶关闭规律对大小机组水电站 同时甩负荷工况的影响分析

王鹏,姚雄,陈兰

(陕西省水利电力勘测设计研究院,陕西西安710001)

摘要:针对两台大机组、两台小机组联合布置的一洞四机的水电站,基于特征线法,建立系统的过渡过程模型,模拟系统甩负荷工况,研究分析一段直线关闭规律及两段折线关闭规律对过渡过程的影响。结果表明:一段直线关闭规律时间越长、两段折线关闭第一段关闭时间越长、折点开度越大以及第二段关闭时间越长时,蜗壳最大压力越小,机组最大转速上升率越大;增加转动惯量有利于改善过渡过程参数,可通过调整大(小)机组的转动惯量使大小机组过渡过程极值接近。

关键词:水电站;导叶关闭规律;过渡过程;转动惯量

中图分类号:TV136.1

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2024)05-0106-06

Analysis of the Influence of Guide Vane Closure Law on the Hydraulic Transition Process of Hydropower Stations with Small and Large Units

WANG Peng, YAO Xiong, CHEN Lan

(Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: Based on the characteristic methods, a transient process model of the system was established for a hydropower station with two large units and two small units arranged in one tunnel and four units. The load rejection condition of the system was simulated, and the influence of the Guide vane closing law of one straight line and two broken lines on the transient process was studied and analyzed. The results show that the longer the straight line closing rule time, the longer the first closing time, the longer the break point opening time and the longer the second closing time, the smaller the maximum pressure of the volute and the higher the increase rate of the maximum speed of the unit. Increasing the moment of inertia is beneficial to improve the parameters of transient process, and the extreme values of transition process of large and small units can be made close by adjusting the moment of inertia of large and small units.

Keywords: hydropower station; guide vane closing law; transient process; moment of inertia

导叶关闭规律对整个输水系统水力过渡过程有着较大的影响,可通过优化机组导叶关闭规律来降低水道里产生的水锤压强以及限制转速上升过高,是一种经济且有效的措施。

针对水电站过渡过程以及导叶关闭规律的研究,国内外学者做了大量研究:杨建东^[1]提出导叶关闭规律的优化主要取决于水轮机的类型、有压管道系统的水击特性、调保参数的限制及调压室的布置与类型。张美琴等^[2]结合过流时特性曲线上的

运行轨迹,采用一段直线、延时直线及传统两段的三种导叶关闭规律对超高水头水泵水轮机进行大波动过渡过程的影响分析。储善鹏等^[3]分析了不同关闭规律对相继甩负荷工况时尾水进口最小压力产生影响的内在机理,并得到了针对尾水进口最小压力的最优关闭规律求解方法。周天驰等^[4]建立了一种可考虑各控制参数的权重进行水轮机导叶关闭规律非线性优化的模型,并应用模拟退火算法对该模型进行优化,寻找出满足调节保证计算要求的较优

关闭规律。李敏等^[5]研究发现先快后慢的导叶关闭规律适用于水锤极值和转速极值出现在不同工况的水电站。刘晓丽等^[6]针对可逆机组独特的过流特性问题,研究了可逆式机组甩负荷后导叶紧急关闭规律对抽水蓄能电站过渡过程的影响,对比延时关闭规律和折线关闭规律,发现了其可在确保机组转速在控制值内,并有效降低了输水系统里的水锤压力。万子豪^[7]构建了水电站导叶关闭规律多目标优化模型,应用布谷鸟耦合灰狼优化算法优化水轮机导叶关闭规律,考虑各环节约束并引入约束违反策略进行求解,结果证明了模型和方法的有效性。李火坤等^[8]提出导叶有效关闭时间对调节保证参数的影响相对较小,而拐点开度和拐点时间显著影响水锤压强和机组转速之间的平衡。徐敏杰等^[9]在导叶关闭过程中考虑了迟滞与缓冲过程,迟滞过程主要影响机组的转速上升率,迟滞时间越长,转速上升率越大,但对蜗壳压力和尾水管压力的时程及极值影响较小。王晶等^[10]开展的导叶关闭规律研究,明确了对于长引水系统水电站在不同初始开度下甩负荷时,可用三段折线关闭规律来保证转速上升率和水锤压力均满足要求。Lei等^[11]通过对抽水蓄能电站提出考虑非线性因素的PSHS精细数值模型,并分析导叶关闭规律和初始运行条件对甩负荷的影响,表明合适的两级导叶关闭规律有效地降低了甩负荷的风险。Chalise等^[12]使用Bentley-Hammer建立模型,并通过与甩负荷试验数据比较,进一步验证了数学模型的正确性,采用经验证的数学模型,求出了使水轮机最大水压和最大转速的非线性目标函数最小化的最优闭合方式参数。

上述研究多基于普通布置常规电站或抽蓄电站的导叶关闭规律研究,成果是否适用于含两大机、两小机的一洞四机常规电站尚未明确,故本文拟通过模拟某含两大机、两小机的一洞四机常规水电站,研究一段直线以及两段折线关闭规律对四台机同时甩工况参数的影响,同时结合转动惯量的优化,以期得到该电站关闭规律与机组转动惯量较优的组合,为后续相似电站的设计和安全运行提供参考。

1 数学模型

1.1 水锤计算方程

描述任意管道中的水流运动状态的基本方程^[13]为:

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \theta = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2gD} = 0 \quad (2)$$

式中: H 为测压管水头, m; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; x 为沿管轴线的距离, m; a 为水击波速, m/s; t 为时间变量, s; V 为管道中流速, m/s; f 为摩擦系数; θ 为管道纵坡, ($^\circ$); D 为管道直径, m。

上述式(1)、(2)可简化为标准的双曲型偏微分方程,从而可利用特征线法将其转化成同解的管道水击计算特征相容方程。

$$C^+ : H_{P_i} = C_M + B_M Q_{P_i} \quad (3)$$

$$C^- : H_{P_i} = C_P - B_P Q_{P_i} \quad (4)$$

式中: C^- 、 C^+ 为特征线符号; H_{P_i} 为 t 时刻计算断面 i 的未知水头, m; Q_{P_i} 为 t 时刻计算断面 i 的未知流量, m^3/s ; C_M 、 C_P 、为特征线相容性方程系数, m; B_M 、 B_P 为特征相容性方程系数, s/m^2 。

1.2 机组特征方程

水轮机的过流流量、转速、出力方程^[13]为:

$$Q = D_1^2 Q_{11} \sqrt{H} \quad (5)$$

$$n = n_{11} \sqrt{H}/D_1 \quad (6)$$

$$P = M_{11} D_1 H \times \frac{n\pi}{30} \quad (7)$$

式中: Q 为机组过流量, m^3/s ; H 为机组水头, m; P 为机组出力, MW; n 为机组转速, r/min; D_1 为机组转轮直径, m; Q_{11} 为机组的单位流量, m^3/s ; n_{11} 为机组的单位转速, r/min; M_{11} 为机组的单位力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

结合转轮的特性曲线以及机组转动方程等,可求解过渡过程中机组的参数。

2 实例分析

2.1 工程概况

文献[14]提到特征线法能够在适用条件下以可接受的精度水平还原水轮机及引水系统的瞬时水压变化情况,故本文基于特征线法并依据文献[15]建立过渡过程数值模型。水电站输水系统布置简图如图1所示,系统总长约为945 m,主要由上水库进水口、引水隧洞、引水钢岔管、尾水隧洞、下库出水口组成。根据本电站运行情况,该水电站尾水管进口最小压力容易满足,主要研究机组蜗壳压力和转速控制工况。机组最大转速上升率控制工况为:上游水位776.5 m,下游四台机尾水591.42 m,突甩全负荷,简称D1工况;蜗壳末端最大压力控制工况为:上游水位789 m,下游四台机尾水591.42 m,突甩全负荷;简称D2工况。机组最大转速上升率控制值

为 60%，蜗壳最大压力控制值为 273 m。

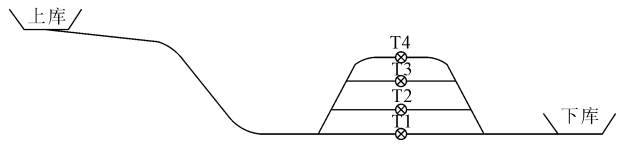


图 1 输水系统布置简图

表 1 机组参数表

机组	额定水头 H_t/m	额定流量 $(m^3 \cdot s^{-1})$	额定转速 $(r \cdot min^{-1})$	水轮机出力 $/MW$	安装高程 $/m$	发电机额定转速 $(r \cdot min^{-1})$
大机组	177	22.07	333.3	36.08	579.64	333.3
小机组	177	12.63	428.6	20.60	579.64	428.6

2.2 一段直线关闭规律

导叶关闭规律主要针对以上两种工况进行计算分析,研究其他边界参数相同的情况下,导叶关闭规律变化时,过渡过程计算结果的差异。根据厂家提供的资料,先选取机组最小转动惯量,即大机取为 $600 t \cdot m^2$,小机为 $240 t \cdot m^2$ 。计算结果见图 2。

由图 2 可以看出,导叶关闭规律将影响机组蜗

壳最大压力、最大转速上升率、尾水管进口最小压力。当转动惯量大机为 $600 t \cdot m^2$,小机为 $240 t \cdot m^2$ 时,采用一段直线关闭规律时,随着关闭时间的增加,额定水头与正常蓄水位工况下的机组蜗壳最大压力逐渐降低,机组转速最大上升率逐渐增加,尾水最小压力逐渐升高。机组最大转速上升率和蜗壳最大压力随着关闭时间变化规律呈现相反的趋势,即使关闭规律采用最快的 9 s 一段直线时(表示关闭规律以 $1/9 s^{-1}$ 的斜率从工况初始开度至 0 开度,下同),机组最大转速上升率为 63.46% 仍然大于 60% (控制值);当关闭规律采用 13 s 一段直线时,机组蜗壳最大压力也同样超过标准 272.17 m (30%) (控制值)较多,故在其他机组参数以及水道布置不变的情况下,一段直线关闭规律优化结束仍无法满足调保计算要求。下文将组合改变机组转动惯量与一段直线关闭规律进行计算结果差异分析。

以大机组转动惯量 $1\ 000 t \cdot m^2$,小机组 $315 t \cdot m^2$ 的暂定方案为基准,大机组和小机组同比例缩小,分别取 0.9、0.85、0.8 倍,并进行相应的导叶关闭规律优化,计算结果见图 3、图 4。

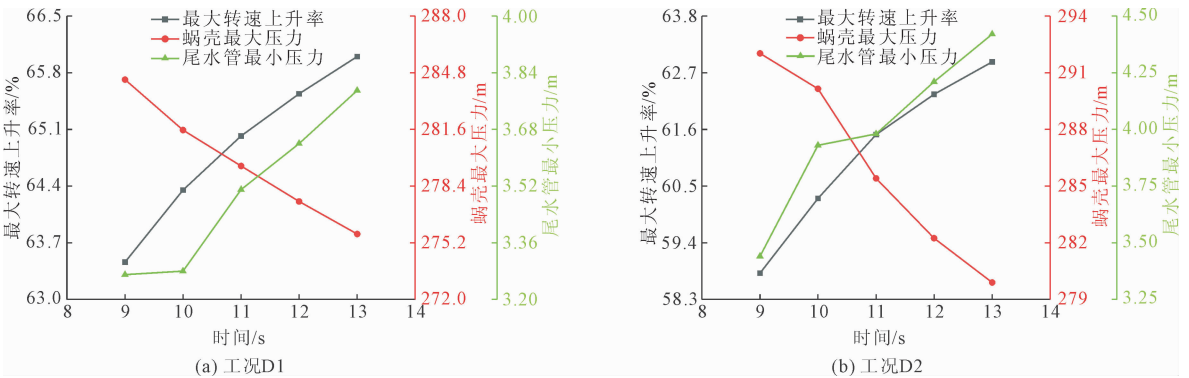


图 2 最小转动惯量下过渡过程参数随一段直线关闭规律变化过程线

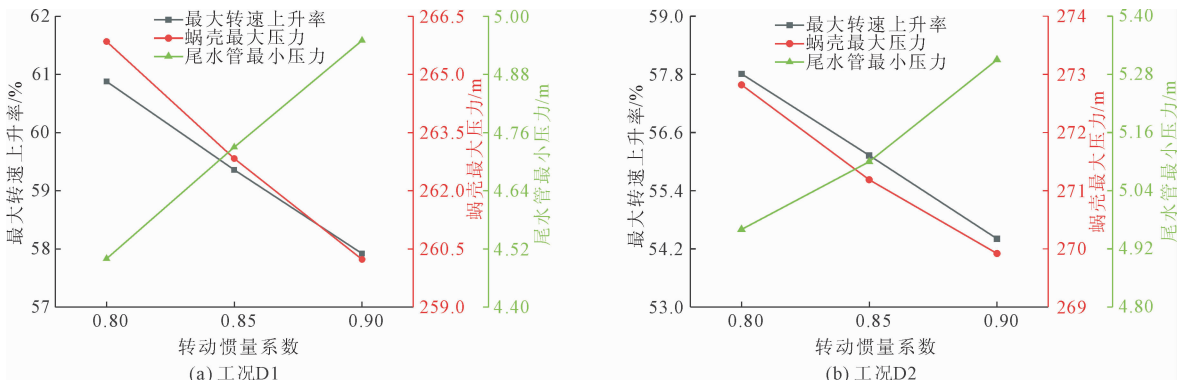


图 3 过渡过程参数随转动惯量系数变化过程线

由图 3、图 4 可以看出,当采用一段直线关闭规

律 13 s 时,转动惯量越大,蜗壳最大压力越小,机组

最大转速上升率越小,尾水管进口最小压力越大,其中转动惯量系数取 0.85 时,即大机为 $1000 \times 0.85 = 850 \text{ t} \cdot \text{m}^2$,小机为 $315 \times 0.85 = 267.75 \text{ t} \cdot \text{m}^2$,各指标参数较优且均有相对较多余量。随着关闭时间的减小,虽然机组最大转速上升率减小,但机组蜗壳最大压力增大,故一段直线关闭规律采用 13 s,机组最大转速上升率为 59.42%,机组蜗壳最大压力为 271.19 m,此时,转动惯量系数为 0.85,可以明显改

善过渡过程参数,使得经济效益最优。在采用一段关闭规律时,增大转动惯量对蜗壳最大压力、机组最大转速上升率以及尾水管进口最小压力均有不同程度的优化,并且上文中机组的关闭规律对调保参数的变化趋势并未改变,其中以机组最大转速上升率优化效果最为明显,说明在一段直线关闭规律优化无法满足要求时,且水道布置不变的情况下,可考虑在一定限度内增加机组的转动惯量。

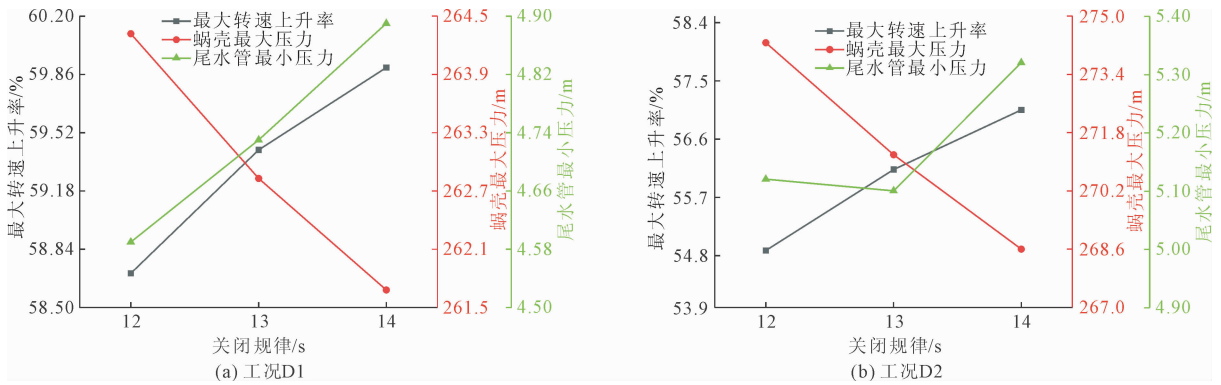


图 4 过渡过程参数随导叶关闭规律变化过程线

2.3 两段折线关闭规律

文献[1]提到对于中、高比转速水轮机,通常采用先快后慢的折线关闭规律,同时建议先快后慢的折点相对开度可大致取为 0.65。故本电站采用先快后慢的折线关闭规律,用于改善机组的调保计算结果。同时经过大量前期计算,折点选为 0.70。计算控制工况选择与一段直线关闭规律优化一致,选取最小转动惯量组合大机为 $600 \text{ t} \cdot \text{m}^2$,小机为 $240 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ 。计算结果见表 2 所示。

表 2 两段折线关闭规律大波动工况计算结果

两段折线 关闭规律	工况 D1			工况 D2		
	最大转 速上升 率/%	蜗壳末 端最大 压力/m	尾水最 低压力 /m	最大转 速上升 率/%	蜗壳末 端最大 压力/m	尾水最 低压力 /m
4/0.70/20	60.55	275.80	3.13	60.93	270.77	4.77
5/0.70/20	61.34	272.16	3.07	61.29	269.09	4.96
6/0.70/20	62.10	268.90	3.40	61.65	269.34	5.09
5/0.68/20	60.88	276.36	2.91	60.61	273.43	5.03
5/0.70/20	61.34	272.16	3.07	61.29	269.09	4.96
5/0.72/20	61.82	267.82	3.39	61.98	269.95	4.87
5/0.70/19	61.28	272.52	3.05	61.13	269.90	4.89
5/0.70/20	61.34	272.16	3.07	61.29	269.09	4.96
5/0.70/21	61.40	271.84	3.10	61.44	268.36	5.01

注:表中 4/0.70/20 表示初始开度至相对开度 0.7 之前的关闭规律斜率为 $1/4 \text{ s}^{-1}$,相对开度 0.7 至导叶全关闭的斜率为 $1/20 \text{ s}^{-1}$,下同。

由表 2 可以看出,D1 工况控制下的机组最大转速上升率主要受第一段关闭规律和导叶开度转折点的影响,第一段关闭时间越长、导叶开度转折点相对开度越大,则机组最大转速上升率越大,当导叶开度转折点为 0.70、第二段关闭规律选 20 s 时,若第一段关闭规律选择 4 s,机组蜗壳最大压力为 275.80 m,超过控制标准,故可以选择第一段最优关闭规律为 5 s;当保持第一段关闭规律和第二段关闭规律不变时,导叶开度转折点最低为 0.70,若降为 0.68,则机组蜗壳最大压力为 276.36 m,超过控制标准;当保持第一段关闭规律和导叶相对开度转折点不变的时候,第二段关闭规律最小可降低至 20 s,当降至 19 s 时,机组蜗壳最大压力为 272.52 m,超过控制标准;因此当机组转动惯量(GD^2)取最小组合值时,相对较优的两段折线关闭规律为 5/0.70/20,此时机组蜗壳最大压力为 272.16 m,满足控制标准 272.17 m,但机组最大转速上升率为 61.34% 仍不满足控制标准 60%,机组蜗壳最大压力余量也极小,因而当转动惯量大机为 $600 \text{ t} \cdot \text{m}^2$,小机为 $240 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ 时,两段折线关闭规律也难以满足调保计算要求。下文将研究不同机组转动惯量情况下,相同的两段折线规律对过渡过程的影响。

通常情况下,机组 GD^2 值增大,对于过渡过程计算结果是有利的。对于常规水轮机机组,如果导叶关机规律不变,流量变化主要源于导叶开度变化,

转速变化对其影响很小,故机组 GD² 值增大主要体现在转速最大上升值的减小,对压力控制值影响不大。由于转动惯量大机组 600 t·m²、小机组 240 t·m² 的组合下大机组的最大转速上升率比小机组大,因此选择增加大机组的转动惯量并对两段折线关闭规律进行优化,小机组转动惯量保持不变。同

时,考虑到调速器实际工作特性和安全裕度,控制折线关闭规律第一段最快速率为 1/8 s⁻¹。经前期大量优化,选取较优的折线关闭规律为 8/0.65/15,即第一段采用 1/8 s⁻¹ 的斜率关闭,折点位置 0.65,第二段采用 1/15 s⁻¹ 的斜率关闭,计算结果见图 5—图 7。

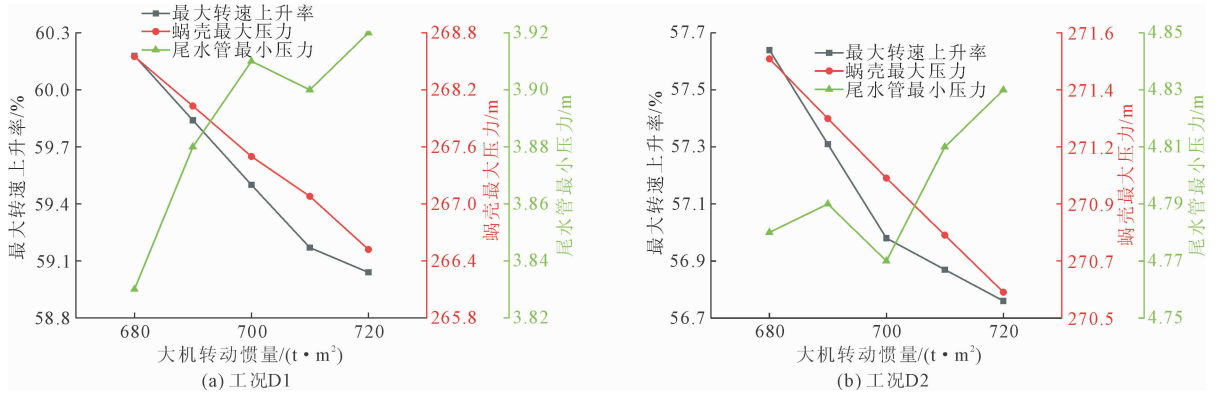


图 5 过渡过程参数随大机转动惯量变化过程线

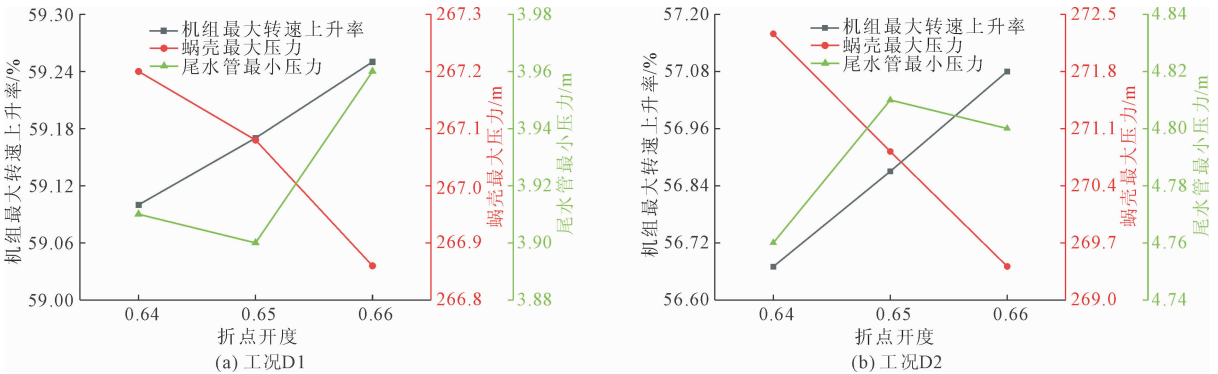


图 6 过渡过程参数随折点开度变化过程线

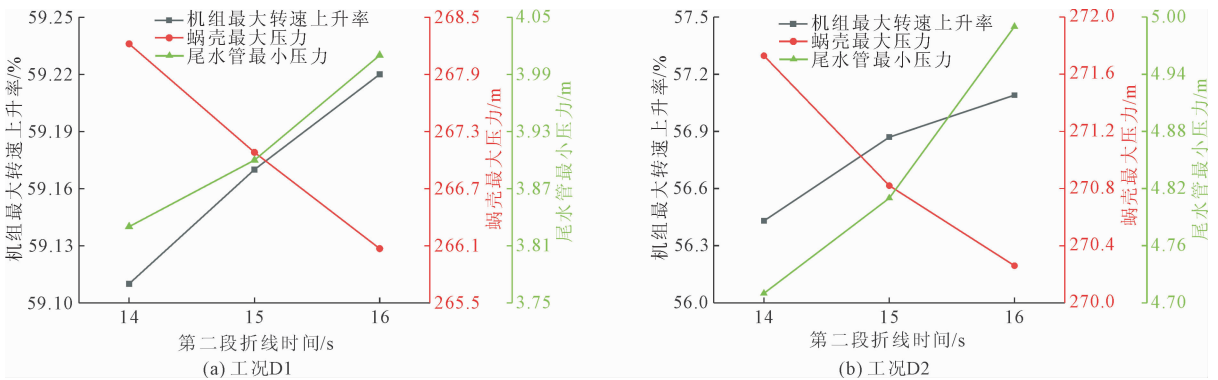


图 7 过渡过程参数随第二段折线关闭时间变化过程线

由图 5 可以看出,随着大机组的转动惯量的增加,蜗壳末端最大压力逐渐减小,机组最大转速上升率逐渐减小,当大机组的转动惯量增加到 710 t·m² 时,机组蜗壳最大压力为 270.82 m;机组最大转速

上升率为 59.17%。由此可说明仅调整大机组的转动惯量,同样可使过渡过程参数得到优化,最终大机组、小机组极值较为接近时为最优转动惯量搭配,若此时极值仍然无法满足控制要求,则需要优化其他

机组参数或者管道参数。

由图6、图7可以看出大机组转动惯量为 $710 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ 、小机组转动惯量为 $240 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ 时,折点开度越大以及第二段关闭时间越长时,蜗壳最大压力越小,机组最大转速上升率越大,说明机组转动惯量的不同时,两段折线关闭规律对过渡过程参数的影响规律是相同的。

3 结 论

(1) 针对含有两大机、两小机的一洞四机电站时,采用两段折线关闭规律时,在一定范围内,第一段关闭时间越长、折点开度越大以及第二段关闭时间越长时,蜗壳最大压力越小,机组最大转速上升率越大。

(2) 不同转动惯量下,一段直线以及两段折线关闭规律对过渡过程参数优化规律不变,且转动惯量越大调保参数越优。

(3) 当一条水力单元内采用两台大机组加两台小机组时,若组合改变大小机组转动惯量难以满足安全要求时,可考虑只调整大(小)机组的转动惯量,使得大小机组极值接近,从而达到改善整体调保参数的效果。

参考文献:

[1] 杨建东. 导叶关闭规律的优化及对水力过渡过程的影响[J]. 水力发电学报,1999(2):78-86.

[2] 张美琴,佟德利,张树邦,等. 超高水头水泵水轮机甩负荷导叶关闭规律分析[J]. 水电能源科学,2020,38(5):139-143.

[3] 储善鹏,张 健,陈 胜,等. 机组导叶关闭规律对相继甩工况的影响[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(1):31-37.

[4] 周天驰,张 健,俞晓东,等. 基于模拟退火算法的水

轮机导叶分段关闭规律优化[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(4):320-326.

- [5] 李 敏,张 健,俞晓东. 水轮机导叶“先快后慢”关闭规律适用性研究[J]. 水力发电学报,2019,38(3):101-107.
- [6] 刘晓丽,郑 源,高亚楠. 抽水蓄能电站可逆机组导叶关闭规律探析[J]. 水电能源科学,2011,29(6):151-153,189.
- [7] 万子豪. 水轮机导叶关闭规律优化及过渡过程反演预测分析[D]. 南昌:南昌大学,2023.
- [8] 李火坤,万子豪,黄 伟,等. 中高水头水电站水轮机导叶关闭规律鲁棒性综合评价[J]. 清华大学学报(自然科学版),2023,63(1):125-133.
- [9] 徐敏杰,陈 胜,杨 森,等. 考虑接力器特性的导叶关闭规律[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(6):563-569.
- [10] 王 晶,陈 胜,李向菊,等. 大水头变幅长引水系统水电站甩负荷导叶三段关闭规律[J]. 水电能源科学,2022,40(5):160-163,168.
- [11] Lei Liuwei, Chen Diyi, Ma Cheng, et al. Optimization and decision making of guide vane closing law for pumped storage hydropower system to improve adaptability under complex conditions [J]. Journal of Energy Storage,2023,73:109038.
- [12] Chalise S,Poudel L. Optimization of closure law of guide vanes for an operational hydropower plant of nepal[J]. International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR),2019,9(5):73-79.
- [13] 常近时. 水力机械装置过渡过程[M]. 北京:高等教育出版社,2005.
- [14] 郑 源,张 健. 水力机组过渡过程[M]. 北京:北京大学出版社,2008.
- [15] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.