

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230246

变一定速抽水蓄能机组混合式布置对甩负荷过渡过程的影响

胡超¹, 陈胜¹, 柏家串², 官亚茹¹, 张健¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 昆山市水务工程质量与安全监督站, 江苏 苏州 215300)

摘要: 目前尚缺少较复杂的多洞多机输水系统下变一定速机组混合式布置对甩负荷过渡过程影响的研究。基于一维管道瞬变流理论, 采用特征线法建立了“引水两洞四机、尾水四机一洞”的变一定速抽水蓄能机组水力过渡过程数学模型, 并结合实际工程算例探讨了甩负荷工况下变一定速机组混合式布置对调节保证参数的影响。结果表明, 相比于变速机组分布于不同引水主洞的布置方案, 两台变速机组布置于同一引水主洞方案下甩负荷过渡过程中的调节保证参数在发电效率较高区内更为安全。

关键词: 可变速抽水蓄能机组; 混合式布置; 甩负荷过渡过程; 发电效率; 调节保证参数

中图分类号: TV743

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0190-05

1 引言

相较于定速抽水蓄能机组, 可变速抽水蓄能机组更加灵活、快速、高效、稳定, 不局限于额定转速运行, 在不同的水头与发电工况下始终维持最优转速运行并保持发电效率最佳; 解决了定速机组在抽水工况下无法自动跟踪电网频率和调节水泵入力的问题, 实现了全时段电网功率与频率调节控制^[1], 因而是今后抽水蓄能领域的重要方向和研发热点, 在提高电力系统运行稳定性方面具有巨大的潜力。迄今为止, 针对可变速抽水蓄能机组已进行了大量研究^[2-6]。但相关研究大多基于输水系统一洞两机简单布置, 复杂输水系统如引水尾水均多洞多机的可变速与定速机组混合式布置下甩负荷水力过渡过程的研究较为匮乏, 不同变一定速机组布置型式对调保参数的影响有必要深入研究。鉴此, 本文基于一维管道瞬变流理论, 针对引水两洞四机、尾水四机一洞的复杂输水系统, 研究甩负荷过渡过程中不同变一定速机组混合式布置下的蜗壳最大压力、尾水最小压力和转速最大上升率等调保参数特性差异, 以及调保参数随初始转速的变化规律, 旨在为含多台变速机组的抽水蓄能电站变一定速机组混合式布置方

案的选取提供借鉴。

2 数学模型

构建可变速抽水蓄能电站数学模型见图 1。采用特征线法将运动方程和连续方程转化为特征方程求解压力管道上任一断面、任一时刻的瞬态水头和流量; 运用 Suter 变换法处理水泵水轮机全特性曲线, 联立转轮边界水头平衡方程和机组转动力矩平衡方程, 并根据导叶运动规律确定各工况下水泵水轮机节点的瞬态参数, 具体见文献[7]。

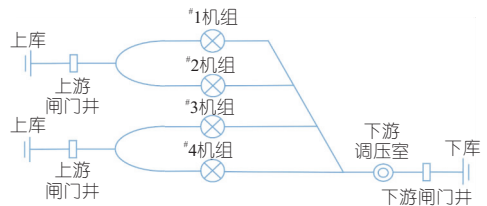


图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model

以可变速机组在任意水头、流量下运行的效率最高为落脚点, 在转速可调节区间内调节初始转速以寻找最优工况点, 机组在最优工况点运行时的初始转速最优且发电效率最高。在水力过渡过程中机组运行的水头不同, 相应的发电最佳效率有所差异, 可变速抽水蓄能机组根据效率寻优

收稿日期: 2023-02-23, 修回日期: 2023-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879087, 51839008)

作者简介: 胡超(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水电站及泵站水力学, E-mail: hc161819yjy@163.com

通讯作者: 陈胜(1987-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水电站及泵站水力学, E-mail: chensheng@hhu.edu.cn

准则确定不同水头下机组运行的最优初始转速以确保机组始终以最优效率运行发电。

3 工程算例分析

3.1 工程概况

国内某含可变速机组的抽水蓄能电站总装机容量 2 800 MW,共安装 8 台单机容量 350 MW 的可逆式水轮发电机组。该电站输水发电系统由两个水力单元组成,单个水力单元的引水系统布置方式为两洞四机,尾水系统为四机一洞,且尾水岔管采用卜型布置(图 1)。该电站基本参数见表 1,调节保证参数的计算控制值见表 2。

表 1 可变速抽水蓄能电站基本资料

Tab. 1 Basic data of variable speed pumped-storage plant

参数名称	参数值	参数名称	参数值
变一定速机组数/台	2/2	机组安装高程/m	2 355
转轮直径/m	2.6	机组转动惯量/(t·m ²)	8 000
额定转速/(r·min ⁻¹)	375	上库正常蓄水位/m	2 912.0
额定功率/MW	357.1	上库死水位/m	2 870.0
额定水头/m	428	下库正常蓄水位/m	2 452.0
额定流量/(m ³ ·s ⁻¹)	94	下库死水位/m	2 440.0
引水道长度/m	1 065.5	尾水道长度/m	1 284.6
引水道管径/m	7.0	尾水道管径/m	11.4

表 2 调节保证参数控制值

Tab. 2 Control value of regulation guarantee parameters

参数名称	参数控制值
蜗壳最大压力/m	<724.1
机组最大转速上升率/%	<45
尾水管最小压力/m	>22.7

3.2 变一定速机组混合式布置方案

在引水一洞四机的布置下,任一机组的启停都将对其他机组产生水力干扰,若上游设置两条引水主洞,即采用引水两洞四机布置,仅共用同一引水主洞的两台机组之间有较强的水力联系,其中某一机组的启停仅对另一台机组产生水力干扰,而对另一主洞的两台机组干扰较弱。因而引水两洞四机布置可大大削弱四台机组上游侧的水力联系,正常运行时机组之间的水力干扰弱于引水一洞四机的布置,且运行灵活性更高。区别于常规的一洞两机布置,该电站尾水岔管采用卜型布置,对于后甩机组类似增加了尾水主洞的长度,一定程度上缓解了尾水压力的骤降^[8]。

该电站共拟布置两台变速机组,其中一台变速机组布置在尾水支管长度最长的#1支线上,通过改变另一台变速机组位置确定 3 种变一定速机组混合式布置方案,见表 3。

表 3 布置方案

Tab. 3 Layout scheme

方案	变速机组编号	引水主洞	水力关联度
1	#1-#2	相同	方案 1>方案 2>方案 3
2	#1-#3	不同	
3	#1-#4	不同	

3.3 变一定速机组混合式布置对发电效率的影响

可变速机组具有灵活调节初始运行转速的特点,其转速调节范围为额定转速(375 r/min)±10%,即可调节区间为 337.5~412.5 r/min。由于不同水头下机组最优效率有所差异,根据建立的数值模拟计算模型,可得到不同发电水头、不同方案下机组发电效率随初始运行转速的变化规律,见图 2。图 2 中 n_0 为初始运行转速, η 为机组发电效率。

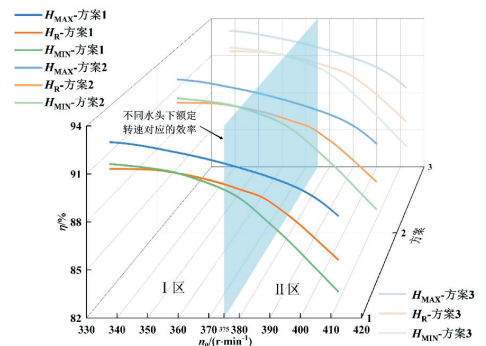


图 2 发电效率

Fig. 2 Power generation efficiency

在不同水头与初始转速下,不同布置方案对发电效率基本无影响,效率与初始转速呈负相关。从发电效率优化角度考虑,不同布置方案与不同水头下,最优效率均在初始转速最小时取得。对于最小发电水头情况,发电效率随转速变化振幅最显著,主要表现在 II 区,最大初始转速下的发电效率最低,相比于额定转速下降了 4.43%。对于额定发电水头条件下, I 区的效率变幅小于 II 区,当初始转速下降至最小值时,效率增幅为 0.93%,当初始运行转速增加至最大值时,发电效率下降 2.98%。在最大发电水头条件下,最小与最大初始运行转速对应的效率分别比额定转速下的效率上升了 1.12%、下降了 1.88%。

由于最大发电水头下变速机组在初始转速可调节区间内的发电效率均大于其他两种水头,因此针对最大发电水头下甩负荷工况 A(表 4)进行

表 4 典型工况及运行参数

Tab. 4 Typical condition and operating parameters

工况	说明	上库 水位/m	下库 水位/m	关闭 规律/s
A	最大发电水头,四台机 额定出力同时甩负荷	2 912.00	2 440.00	35

过渡过程计算,分析初始转速调节区间内变一定速机组混合式布置对调节保证参数的影响。

3.4 变一定速机组混合式布置对蜗壳最大压力的影响

图3为不同变一定速机组混合式布置下蜗壳最大压力随初始转速变化规律,图3中 H_{SM} 为蜗壳最大压力。不同初始运行转速下,方案1、2、3的蜗壳最大压力分别为694.14、698.81、699.85 m,小于724.1 m,均满足控制要求,且蜗壳最大压力满足方案1<方案2<方案3。随着初始转速的上升,三种方案下的蜗壳最大压力均呈“波形”变化,即当初始转速处于337.5~362.5 r/min区间时,蜗壳最大压力上升不显著,三种方案下的蜗壳最大压力均在初始转速取362.5 r/min时达到波峰,当变速机组在362.5~402.5 r/min区间内调节转速时,蜗壳最大压力随初始转速提升而下降,在402.5 r/min时达到波谷,随后在402.5~412.5 r/min内小幅增长。

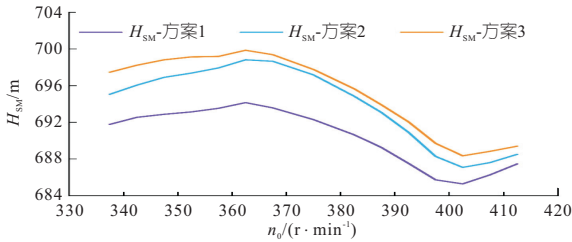


图3 蜗壳最大压力

Fig. 3 Maximum pressure at the volute

以蜗壳最大压力的极值工况为例,变速机组的初始转速设置为362.5 r/min,导叶关闭规律分别取25、30、35、40、45 s。表5列出了不同方案与导叶关闭规律下甩负荷过渡过程中机组蜗壳最大压力值,图4展示了不同方案下蜗壳压力的振荡

表5 蜗壳最大压力统计

Tab. 5 Statistics of maximum pressure at the volute

关闭 规律/s	蜗壳最大压力/m		
	方案1	方案2	方案3
25	707.834	709.862	710.134
30	699.353	700.832	701.063
35	692.721	694.726	697.451
40	686.432	688.587	688.278
45	680.808	683.135	682.858

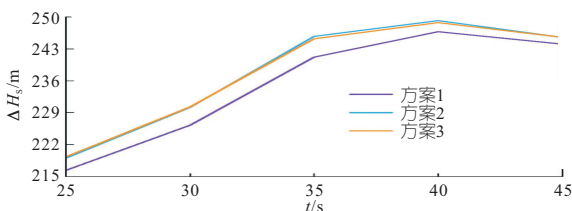


图4 蜗壳压力振荡幅值

Fig. 4 Pressure oscillation amplitude at the volute

荡幅值随导叶关闭规律的变化规律,图4中 ΔH_S 为蜗壳压力振荡幅值, t 为导叶关闭规律。

由表5可知,随着导叶关闭规律的延长,三种方案下蜗壳最大压力均呈近似直线的下降规律,且不同导叶关闭规律下,蜗壳最大压力均满足方案1<方案2<方案3。由图4可知,三种方案下蜗壳压力振荡幅值随关闭规律变化的规律基本一致,随着导叶关闭规律从25 s延长到40 s,蜗壳压力振幅持续上升,在40 s时达到峰值,40~45 s内出现小幅下降。不同导叶关闭规律下,方案1的蜗壳压力振幅比其他两种方案均有所下降。故变速机组分布于同一引水主洞的布置方案一定程度降低了蜗壳最大压力,减缓了蜗壳压力的振荡幅度,较好地缓解了蜗壳压力及压力脉动在甩负荷过渡过程中对机组过流部件的冲击^[9]。

以蜗壳最大压力的极值工况为例,研究初始转速为362.5 r/min时,不同方案下蜗壳压力与流速变化率随时间的变化规律,结果见图5。图5中 H_S 为蜗壳压力, dv/dt 为流速变化率, t 为时间。不同混合式布置下,蜗壳压力与流速变化率随时间变化趋势基本一致,且蜗壳压力与流速变化率具有同步变化时效性,即蜗壳最大压力对流速变化率的敏感度高;在6~10 s内三种方案下两者均达到峰值,但相应的峰值点时刻不同。以方案1为例,流速变化率最大值发生在6.73 s,而蜗壳压力最大值发生在7.71 s,即蜗壳压力最大值时刻相较于流速变化率最大值时刻延迟约1.0 s。故蜗壳压力与流速变化率随时间变化的整体规律基本吻合,但两者最大值出现时刻存在一定“迟滞效应”。

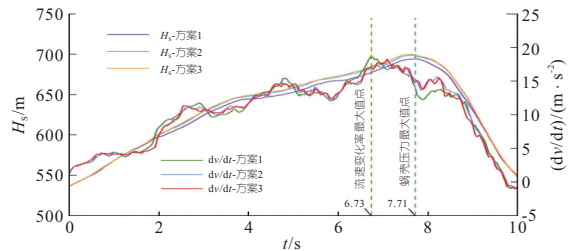


图5 蜗壳压力与流速变化率

Fig. 5 Volute pressure and flow rate

3.5 变一定速机组混合式布置对尾水最小压力的影响

图6为不同变一定速机组混合式布置下尾水最小压力随初始转速变化的规律。图6中 H_{WM} 为尾水最小压力。不同初始运行转速下,方案1、2、3的尾水最小压力分别为50.61、46.65、47.57 m,均大于22.7 m,满足尾水最小压力的控制标准。尾水最小压力在不同变一定速机组混合

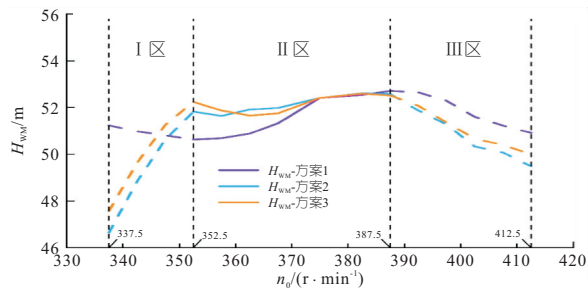


图 6 尾水最小压力

Fig. 6 Minimum pressure at draft tube

式布置下随初始转速变化规律不一致,对于方案 1,尾水最小压力呈“波形”变化规律,分别在初始转速为 352.5、387.5 r/min 时出现波谷与波峰;而方案 2、3 尾水最小压力随初始转速变化规律相近。

从效率优化的角度分析转速调节区间内三种方案下尾水最小压力变化过程的差异,见图 6。由图 6 可知,变速机组可调节转速区间由 3 个子区间组成,分别为 I、II、III 区。不同子区间内三种混合式布置的尾水最小压力表现出不同的变化规律。I 区初始转速调节范围为 337.5~352.5 r/min,对应机组较高发电效率区,随着初始转速的减小,发电效率提升,方案 1 的尾水最小压力一定程度上得到了改善,最小值由 50.61 m 提升至 51.23 m;而对于方案 2、3,初始转速下降引起尾水最小压力显著降低,从 51.82、52.24 m 分别下降至 46.65、47.57 m。II 区的转速调节范围为 352.5~387.5 r/min,该子区间内方案 1 的尾水最小压力呈缓慢上升趋势,最小值从 50.61 m 上升至 52.71 m;而方案 2、3 尾水最小压力无明显变化规律,主要原因是 II 区内变速机组可调节转速接近额定转速且两台变速机组分布于不同的引水主洞,转速变化削弱对机组尾水最小压力的影响。III 区内三种方案下的尾水最小压力均随初始转速的上升而下降,且转速 387.5~412.5 r/min 内尾水最小压力均满足方案 1>方案 3>方案 2,但由于该区为发电效率较低区,故不做具体分析。

3.6 变一定速机组混合式布置对转速最大上升率的影响

不同混合式布置下机组最大转速上升率随初始转速变化规律见图 7,其中 β_{\max} 为机组最大转速上升率。机组最大转速上升率在不同变一定速机组混合式布置方案下随初始转速变化规律基本一致,随着初始运行转速的上升,三种方案的机组最大转速上升率均呈近似直线的下降趋势。

可调节转速区间内方案 1、2、3 的机组最大转速上升率分别为 46.02%、46.81%、46.71%,均

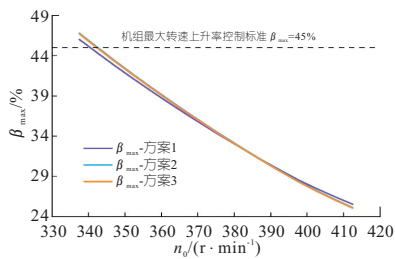


图 7 最大转速上升率

Fig. 7 Maximum speed rising rate

发生在最高发电效率对应的初始转速 337.5 r/min 情况下,计算值大于 45.0% 不满足机组最大转速上升率的控制标准,但在较高发电效率区间内方案 1 的转速最大上升率相较于另两种方案更小,满足转速最大上升率控制标准的可调节转速区间更广,故采用方案 1 在发电效率较高区内能一定程度上降低机组的转速最大上升率。

4 结论

a. 不同水头下,初始转速越小,变速机组发电效率越大,但发电效率仅与水头及初始转速有关,与混合式布置型式基本无关。

b. 在转速可调节区间内,两台变速机组布置于同一引水主洞方案下的蜗壳最大压力最小,且发电效率较高区内尾水最小压力和最大转速上升率相较于另两种变速机组分布于不同引水主洞的布置方案更安全。不同导叶关闭规律下,采用变速机组分布于同一引水主洞的布置方案能一定程度降低蜗壳最大压力及减缓蜗壳压力的振荡幅度,较好地缓解甩负荷过渡过程中压力脉动对机组过流部件的冲击;蜗壳压力与流速变化率具有时间同步性,但蜗壳压力出现峰值时刻相较于流速变化率具有迟滞性。

c. 当抽水蓄能电站拟设多台可变速机组且输水系统为复杂的多管多机布置时,应优先考虑将变速机组布置在同一引水主洞以优化过渡过程中调保参数。

参考文献:

- [1] 郭海峰. 交流励磁可变速抽水蓄能机组技术及其应用分析[J]. 水电站机电技术, 2011, 34(2): 1-4, 64.
- [2] 周喜军, 丁景焕, 黄一凡, 等. 可变速抽水蓄能机组大波动工况转速上升规律[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 57-64.
- [3] 张文科, 张健, 俞晓东, 等. 可变速抽水蓄能机组运行转速对甩负荷过渡过程的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(6): 570-575.
- [4] 刘德民, 许唯林, 赵永智, 等. 变速抽水蓄能机组空

