

含 MGV 装置的可逆机组过渡过程计算数学模型

刘德有¹ 孙华平² 游光华² 孔令华²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.华东天荒坪抽水蓄能有限责任公司,浙江 安吉 313302)

摘要 简要介绍了导叶不同步装置(MGV 装置)的基本原理和工作特性,提出了按“并联过流、同轴同特性的双转轮可逆机组”模拟的建模思路,建立了含 MGV 装置的可逆机组甩负荷过渡过程仿真计算数学模型。通过计算结果与真机试验实测结果的对比分析,验证了该数学模型的正确性,证实了 MGV 装置在机组甩负荷过渡过程中所发挥的良好作用。

关键词 天荒坪抽水蓄能电站;预开导叶;导叶不同步装置;全特性曲线;过渡过程

中图分类号 TM312 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2007)04-0448-04

导叶不同步(misaligned guide vanes,简称 MGV)装置是在常规导叶控制机构中加装的可使少数导叶(常为在圆周上对称分布的 2 或 4 片)产生附加启闭动作的装置。该少数导叶既受常规导叶控制机构的控制,又受 MGV 装置的控制,因此它们与其他导叶的动作是不同步的,故称之为不同步导叶。MGV 装置最初是为了解决高水头可逆机组在发电工况可能出现的并网困难和空载运行不稳定问题而研制的^[1-2]。因为高水头抽水蓄能电站的低比转速可逆机组全特性曲线在水轮机工况区内(特别是在导叶小开度时)存在明显的 S 形特征,当这种机组的空载附近工况点正好落在 S 形区域时,即会出现并网困难和空载运行不稳定问题。为此,人们提出了将少数导叶预开到一定开度然后再开启其他导叶的预开导叶法。这种方法曾成功地应用于卢森堡 Vianden 和比利时 COO II 抽水蓄能电站。挪威 KVAERNER 公司于 1999 年首次将预开导叶法的执行机构称之为 MGV 装置^[1-3],将该装置成功地应用于天荒坪抽水蓄能电站,使得该电站机组的并网时间大大缩短、空载运行稳定性明显改善、工况转换期间的能量消耗有所减少、旋转备用的可靠性显著提高,同时,机组由调相转发电及关机时的运行控制条件也得到明显改善^[1-4]。

由于投入 MGV 装置后的导叶不同步会使机组效率有所降低,当机组在导叶较大开度正常发电运行时,应将 MGV 装置退出,使所有导叶进入同步工作状态。但天荒坪抽水蓄能电站的机组甩负荷真机试验结果表明,在机组甩负荷时,投入 MGV 装置可有效降低蜗壳进口的最大水锤压力值^[4-7],其效果与投入方式有关。据挪威 KVAERNER 公司估计,投入 MGV 装置可使天荒坪机组甩负荷工况的蜗壳进口最大压力水头降低 25 ~ 30m。但 KVAERNER 公司没有提出含 MGV 装置的可逆机组过渡过程计算方法。为此,文献[5]提出了将 MGV 装置对少数导叶的预开开度折算为全部导叶的附加开度的处理方法。由于机组流量、力矩等性能参数与导叶开度呈非线性关系,将该处理方法用于机组不同甩负荷工况的过渡过程计算,可能存在较大的计算误差。文献[6]介绍了 MGV 装置的模拟计算方法,但未给出其具体数学模型。本文建立了含 MGV 装置的可逆机组过渡过程计算数学模型,并利用天荒坪机组的真机甩负荷试验结果,验证了该数学模型的正确性,分析了 MGV 装置对天荒坪机组甩负荷过渡过程的影响。

1 数学模型

对于含 MGV 装置的可逆机组,本文首先提出按“并联过流、同轴同特性的双转轮可逆机组”模拟的思路,然后按此思路建立其过渡过程计算数学模型。该数学模型的关键是解决 2 个同轴同特性转轮的瞬态参数如何组合计算的问题。这 2 个并联过流、同轴同特性的模拟转轮在过渡过程中的差异体现在(a)正常动作的导叶的个数不同;(b)动作导叶的启闭规律不同。

1.1 机组上下游管道边界节点的特征相容方程

设机组上下游管道边界节点(亦即机组进出口边界)的编号分别为 1、2,则其在 t 时刻的瞬态水头 $H_1(t)$, $H_2(t)$ 和瞬态流量 $Q_1(t)$, $Q_2(t)$ 可由下列特征相容方程给出^[7]:

$$H_1(t) = C_{P1} - R_{P1}Q_1(t) \quad H_2(t) = C_{M2} + R_{M2}Q_2(t) \quad (1)$$

式中 C_{P1} , R_{P1} , C_{M2} , R_{M2} 为逐时步过渡过程计算中的已知常数^[7]。

如忽略机组转轮区的水体可压缩性和水量漏损,根据连续性方程,得

$$Q_1(t) = Q_2(t) = Q_{\text{sum}}(t) \quad (2)$$

式中 $Q_{\text{sum}}(t)$ 是机组上、下游管道的过流量,即模拟计算的双转轮的总过流量。

1.2 可逆机组的水头、力矩平衡方程

对于并联过流、同轴同特性的多转轮可逆机组,无论其转轮个数是多少,均有下列水头、转动力矩的平衡方程成立。

a. 机组上下游边界的水头平衡方程.由式(1)(2)可导出

$$h = (C_{P1} - C_{M2})/H_r - q_{\text{sum}}(R_{P1} + R_{M2})Q_r/H_r \quad (3)$$

式中 h , q_{sum} ——机组水头和总流量的相对值, $h = (H_1 - H_2)/H_r$, $q_{\text{sum}} = Q_{\text{sum}}/Q_r$; H_r , Q_r ——机组额定工况的工作水头和流量。

b. 机组转动力矩的平衡方程

$$\alpha = \alpha_0 + [(\beta_{\text{sum}} + \beta_{\text{sum}0}) - (\beta_g + \beta_{g0})] \Delta t / (2T_a) \quad (4)$$

当机组甩负荷时,式(4)可简化为 $\alpha = \alpha_0 + (\beta_{\text{sum}} + \beta_{\text{sum}0}) \Delta t / (2T_a)$ (5)

式中 Δt ——过渡过程计算的时间步长; α , β_{sum} , β_g ——机组转速、总动力矩、负荷阻力矩的相对值; α_0 , $\beta_{\text{sum}0}$, β_{g0} —— α , β , β_g 的前一计算时步的值; T_a ——机组惯性时间常数, $T_a = GD^2 / n_r \times 374.7 M_r \times GD^2$ 为机组转动惯性力矩; n_r 和 M_r 分别为机组额定工况的转速和动力矩。

1.3 同轴双转轮可逆机组的流量、力矩计算公式

为叙述方便,以下将 2 个模拟转轮分别称为 (a) COM 转轮,即导叶启闭规律仅受主接力器控制的转轮; (b) MGv 转轮,即导叶启闭规律受主接力器和 MGv 装置组合控制的转轮.并联过流、同轴双转轮机组的总流量、总动力矩相对值 q_{sum} , β_{sum} 可由下式求出:

$$q_{\text{sum}} = q_{\text{MGV}} + q_{\text{COM}} = k_1 \left(\frac{Z_{\text{MGV}}}{Z_{\text{total}}} \right) q_{\text{mgv}} + k_2 \left(1 - \frac{Z_{\text{MGV}}}{Z_{\text{total}}} \right) q_{\text{com}} \quad (6)$$

$$\beta_{\text{sum}} = \beta_{\text{MGV}} + \beta_{\text{COM}} = k_3 \left(\frac{Z_{\text{MGV}}}{Z_{\text{total}}} \right) \beta_{\text{mgv}} + k_4 \left(1 - \frac{Z_{\text{MGV}}}{Z_{\text{total}}} \right) \beta_{\text{com}} \quad (7)$$

式中 q_{MGV} , β_{MGV} , q_{COM} , β_{COM} ——MGv 转轮和 COM 转轮的实际流量、实际动力矩相对值; q_{mgv} , β_{mgv} , q_{com} , β_{com} ——MGv 转轮和 COM 转轮的计算流量、计算动力矩相对值,即在不考虑实际动作导叶个数的情况下,根据转轮全特性曲线计算得到的 MGv 转轮和 COM 转轮的流量、动力矩相对值; Z_{MGV} , Z_{total} ——MGv 转轮的实际动作导叶的个数和机组导叶的总个数; $k_1, \dots, k_4$ ——待定的并联权重系数,可暂均取为 1.0 (此时的计算结果一般能满足工程设计要求),当有过渡过程实测资料时,可通过试算和拟合分析确定其更精确的取值。

1.4 同轴双转轮可逆机组的全特性曲线数据回代计算公式

设可逆机组的全特性曲线按 Suter 方法^[8-9]处理(如按其他方法处理,下述公式类同)成 WH , WB 的周期曲线,则可得:

a. 对于 COM 转轮的回代计算公式为

$$h = WH(x_{\text{com}}, y_{\text{com}}) (\alpha^2 + q_{\text{com}}^2) \quad \beta_{\text{com}} = WB(x_{\text{com}}, y_{\text{com}}) (\alpha^2 + q_{\text{com}}^2) \quad (8)$$

其中 $x_{\text{com}} = \arctan q_{\text{com}} / \alpha \quad (\alpha \geq 0)$

$$x_{\text{com}} = \pi + \arctan q_{\text{com}} / \alpha \quad (\alpha < 0)$$

式中 y_{com} 为 COM 转轮的导叶相对开度,既可根据已知的导叶启闭规律 $y_{\text{com}}(t)$ 插值求出,也可根据已知的导叶主接力器行程变化规律 $S_{\text{com}}(t)$ 以及已知的 $y_{\text{com}} \sim S_{\text{com}}$ 关系曲线求出。

b. MGv 转轮的回代计算公式为

$$h = WH(x_{\text{mgv}} + y_{\text{mgv}})(\alpha^2 + q_{\text{mgv}}^2) \quad \beta_{\text{mgv}} = WB(x_{\text{mgv}} + y_{\text{mgv}})(\alpha^2 + q_{\text{mgv}}^2) \quad (9)$$
$$x_{\text{mgv}} = \arctan q_{\text{mgv}}/\alpha \quad (\alpha \geq 0)$$
$$x_{\text{mgv}} = \pi + \arctan q_{\text{mgv}}/\alpha \quad (\alpha < 0)$$
$$y_{\text{mgv}} = y_{\text{com}} + y_{\text{mgv}}^* \quad (y_{\text{mgv}} \leq y_{\text{max}})$$

其中

式中: y_{mgv} ——MGV 转轮的导叶相对开度, $y_{\text{mgv}} \leq y_{\text{max}}$ (y_{max} 是导叶最大开度相对值,一般计算中取 $y_{\text{max}} = 1$);
 y_{com} ——上述 COM 转轮的导叶相对开度; y_{mgv}^* ——由 MGV 装置的小接力器动作产生的叠加导叶相对开度,
可根据已知的 MGV 小接力器行程变化规律 $S_{\text{mgv}}(t)$ 以及已知的 $y_{\text{mgv}}^* \sim S_{\text{mgv}}$ 关系曲线求出。

联立式(1)~(3)和式(5)~式(9)即可求出各种甩负荷过渡工况的含 MGV 装置可逆机组的有关瞬态参数 h 、 α 、 q_{sum} 、 β_{sum} 、 q_{mgv} 、 q_{MGV} 、 q_{com} 、 q_{COM} 、 β_{mgv} 、 β_{MGV} 、 β_{com} 和 β_{COM} 等。

2 实例计算分析

天荒坪抽水蓄能电站共安装 6 台 300 MW 的含 MGV 装置的可逆式水轮发电机组,其引水道采用一管三机布置形式,尾水道采用一管一机布置形式。自 1998 年首台机组投运以来,该电站曾做过大量的一管一机和一管二机的真机甩负荷试验。根据已有的试验实测资料,经计算拟合分析,即可校准上述模拟计算数学模型,进行其他各种甩负荷工况的数值仿真计算^[6]。

天荒坪抽水蓄能电站机组的总导叶个数 $Z_{\text{total}} = 26$,不同步导叶个数 $Z_{\text{MGV}} = 2$ 。为验证上述含 MGV 装置可逆机组过渡过程计算数学模型的正确性,表 1 列出了典型甩负荷工况(均投入 MGV 装置)的计算和试验结果以及相对计算误差(表 1 还给出了对应工况的不投 MGV 时的计算结果)。计算中,所有机组 MGV 小接力器的行程变化规律均为:10 s 内,行程由 0→217 mm(即 MGV 开启);10~15 s 内,行程不变;15~28.6 s 内,行程由 217 mm→0(即 MGV 回复)。

表 1 典型甩负荷工况计算结果与实测结果的比较

Table 1 Comparison of calculated result with measured data for typical cases of load rejection

工 况		H_{Cmax}			$t_{H_{\text{C}}}/\text{s}$		H_{Wmin}			$t_{H_{\text{W}}}/\text{s}$	
		计算值/m	实测值/m	误差/%	计算值	实测值	计算值/m	实测值/m	误差/%	计算值	实测值
一管 一机	1 号机甩 300 MW	820.59	822.14	- 0.19	4.55	4.50	69.15	71.30	- 3.02	4.51	4.60
	2 号机甩 300 MW	815.43	819.97	- 0.55	4.50	4.50	58.53	61.16	- 4.46	4.51	4.60
	3 号机甩 300 MW	806.42	804.59	0.23	4.52	4.65	72.76	76.50	- 4.89	4.47	4.63
	4 号机甩 225 MW	766.24	767.13	- 0.16	5.12	5.40	77.92	77.50	0.54	4.85	2.60 ~ 5.10
	5 号机甩 300 MW	786.26	785.20	0.13	4.71	4.62	58.66	60.65	- 3.30	4.50	4.61
	6 号机甩 300 MW	788.14	792.19	- 0.51	4.59	4.75	59.39	59.12	0.46	4.38	4.62
一管 二机	5 号机甩 300 MW	805.29	798.73	0.83	4.63	4.70	60.38	64.40	- 6.24	4.30	2.50 ~ 4.50
	6 号机甩 300 MW	788.24	795.80	- 0.95	5.88	5.40	57.06	62.18	- 8.23	5.36	2.80 ~ 5.20

工 况		$\beta_{\text{max}}/\%$			t_{β}/s		不投入 MGV 时的计算结果					
		计算值	实测值	误差	计算值	实测值	H_{Cmax}/m	$t_{H_{\text{C}}}/\text{s}$	H_{Wmin}/m	$t_{H_{\text{W}}}/\text{s}$	$\beta_{\text{max}}/\%$	t_{β}/s
一管 一机	1 号机甩 300 MW	25.71	25.46	0.25	3.83	3.85	829.10	4.49	64.33	4.50	25.22	3.82
	2 号机甩 300 MW	24.51			3.89		825.86	4.50	52.62	4.53	24.14	3.80
	3 号机甩 300 MW	24.74	24.24	0.50	3.82	4.18	813.87	4.48	66.23	4.46	23.85	3.78
	4 号机甩 225 MW	16.37	16.26	0.11	3.63	3.83	774.31	4.92	70.92	4.85	15.78	3.52
	5 号机甩 300 MW	24.93	24.64	0.29	3.89	3.85	795.12	4.27	49.46	4.30	23.32	3.66
	6 号机甩 300 MW	23.80	23.42	0.38	3.89	4.35	799.56	4.25	51.29	4.28	22.51	3.59
一管 二机	5 号机甩 300 MW	25.76	24.96	0.80	3.92	4.00	818.82	3.93	50.62	4.27	23.81	3.52
	6 号机甩 300 MW	28.40	27.52	0.88	4.52	4.70	812.43	5.03	52.48	4.82	26.20	4.04

注: H_{Cmax} 表示蜗壳进口最大内水压力水头; H_{Wmin} 表示尾水管进口最小内水压力水头; β_{max} 表示机组最大转速上升率; $t_{H_{\text{C}}}$ 、 $t_{H_{\text{W}}}$ 、 t_{β} 分别表示 H_{Cmax} 、 H_{Wmin} 、 β_{max} 的发生时间。

经对天荒坪抽水蓄能电站可逆机组 30 多个不同甩负荷工况的计算结果与实测结果(其典型工况结果如表 1 所示)的验证对比分析,得到如下结论:

a. 本文建立的含 MGV 装置可逆机组过渡过程的计算数学模型是合理、有效的,其计算结果精度能够满足工程应用要求。其中,蜗壳进口最大内水压力和机组最大转速上升率的计算误差均在 $\pm 1.0\%$ 以内,尾水管

进口最小内水压力的计算误差均在 $\pm 8.3\%$ 以内(且大多偏小,即对于 H_{Wmin} 的设计控制值来说,计算结果偏安全)。该误差虽然偏大,但由于尾水管进口内水压力脉动较大,真机试验实测数据本身存在较大误差(与滤波模型有关),上述计算结果是可以接受的。

b. 在机组甩负荷时,投入 MGV 对减小蜗壳进口和尾水管进口的正负水锤压力波动幅值有明显的效果,但会使机组最大转速上升率有所增大。另外,如果 MGV 延时投入,则其上述作用的效果急剧降低。当延时大于 5 s 时,大波动过渡过程中 MGV 对各设计参数控制值的影响作用基本消失。因此,当机组发生大波动过渡过程时,MGV 应立即投入,以达到预期效果。

c. 投入 MGV 对一管一机甩负荷过渡过程的各设计参数控制值的影响作用较小,对一管二机甩负荷过渡过程的各设计参数控制值的影响作用明显增大。由预测计算分析可知,投入 MGV 对一管三机甩负荷过渡过程的各设计参数控制值的作用效果更大。一管一机、一管二机和一管三机 3 种情况投入 MGV 的影响作用接近于 1:2:3 的关系。

3 结 语

本文提出了采用“并联过流、同轴同特性的双转轮机组”模拟含 MGV 装置可逆机组的建模思路,并据此建立了含 MGV 装置可逆机组甩负荷过渡过程的仿真计算数学模型。模拟计算结果与真机试验实测结果的验证对比分析表明,该计算数学模型是合理、有效的,其计算结果能够满足工程应用要求。此外,将该数学模型与机组调节系统数学模型联立求解,即可仿真分析 MGV 不同预开值对于机组空载运行稳定性的影响关系,也可通过计算重构 MGV 不同预开值情况的机组全特性曲线,分析 MGV 不同预开值对机组 S 形特性的改善效果。

天荒坪抽水蓄能电站多年来的应用实践表明,对于高水头低比转速可逆机组,MGV 装置不但能够提高其发电并网和空载运行的稳定性,还能够减小其甩负荷工况的蜗壳进口和尾水管进口的正负水锤压力波动幅值。但对于不同的抽水蓄能电站,MGV 装置的动作规律、投入时间、不同步导叶个数和其预开值大小等,需要进行仿真计算分析和试验研究,以使其发挥最佳功效。

参考文献:

- [1] 何少润.导叶不同步装置在天荒坪电站的应用[J].水力发电学报,2002,21(3):88-100.
- [2] 孙洁民,朱玉祥,韩增祥.天荒坪抽水蓄能电站 1 号机组低水头空载稳定性的改善[J].水力发电,2001(6):60-63.
- [3] 马明刚.机组低水头并网不成功分析及解决[J].水电站机电技术,2002(2):37-39.
- [4] 游光华.天荒坪机组甩负荷试验压力钢管压力上升分析[J].水电站机电技术,2002(2):76-78.
- [5] 邵卫云,毛根海.导叶不同步装置降低蜗壳进口压力的机理研究[J].水力发电学报,2005,24(2):40-45.
- [6] 游光华,刘德有,王丰,等.天荒坪抽水蓄能电站甩负荷过渡过程实测成果仿真分析[J].水电能源科学,2005,23(1):24-27.
- [7] 游光华,孔令华,刘德有.天荒坪抽水蓄能电站水泵水轮机“S”特性及其对策[J].水力发电学报,2006,25(6):136-139.
- [8] 陆佑楣,潘家铮.抽水蓄能电站[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [9] 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.

Transient process analysis model for reversible turbine units with MGV device

LIU De-you¹, SUN Hua-ping², YOU Guang-hua², KONG Ling-hua²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. East China Tianhuangping Pumped Storage Co., Ltd., Anji 313302, China)

Abstract A brief introduction was given to the basic principle and operation characteristics of misaligned guide vanes (MGV). The thought for modeling of double runner reversible turbine units in parallel flowing mode with the same axis and same characteristics was proposed, and a mathematic model for load rejection transient process of reversible turbine units with MGV was developed. The mathematic model was verified by comparative analysis of calculated results with field test data. It is also demonstrated that MGV device plays an effective role in load rejection transient processes.

Key words: Tianhuangping Pumped Storage Power Station; pre-opened guide vane; misaligned guide vane; full characteristic curve; transient