

# 水平轴潮流能装置变桨启动控制特性研究

王兵振, 张 巍, 段云棋, 郭 毅

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

**摘 要:** 针对水平轴潮流发电装置的变桨启动问题, 建立基于叶素-动量理论的动力特性仿真模型, 利用小比例模型试验对仿真模型进行检验; 在此基础上, 对水平轴潮流发电装置的启动特性进行研究, 梳理启动阶段变桨控制的关键技术参量及其影响。研究结果表明: 初始桨距角和变桨速度是影响水平轴潮流发电装置启动性能的关键因素, 合理设置2个参量, 能有效改善装置的启动性能。

**关键词:** 潮流能; 发电装置; 启动; 变桨控制

**中图分类号:** TK73

**文献标识码:** A

## 0 引 言

由于潮流的规律性、可预测性, 近年来潮流能发电技术发展迅猛, 国内外开展大量研究工作, 研制了多种海上示范试验装置。

启动流速是水平轴潮流能发电装置的一个重要技术指标。降低发电机组的启动流速是研究重点。中国在水平轴潮流发电装置的低流速启动方面开展的研究工作, 如采用增大叶轮实度和增加叶片数量的方法降低启动流速<sup>[1]</sup>, 或采用较低额定设计流速<sup>[2,3]</sup>。这些研究适用于小型潮流发电机组, 并不是大型发电装置理想的技术方案。以“Seagen”为代表的国外大型潮流发电机组参考风力发电领域成熟技术, 采用变桨控制的方案<sup>[4]</sup>, 有效降低水平轴潮流发电机组的启动流速。近年来, 中国也开展了潮流发电变桨控制技术的相关研究工作, 主要集中在变桨传动机构的设计和试验等方面, 在传动机构的形式方面有液压传动形式<sup>[5,6]</sup>和电机驱动形式<sup>[7]</sup>。但有关变桨启动控制机理和控制特性等方面的深入研究少见报道。

针对水平轴潮流发电装置的变桨控制启动问题, 以正在研制的水平轴潮流发电装置为对象, 开展水平轴潮流发电装置启动特性研究和分析工作, 分析变桨控制的机理以及对启动特性的影响, 确定最佳的变桨启动控制关键技术参数。

## 1 潮流发电装置

本文研究对象为正在研制的水平轴潮流能发电装置。发电装置的叶轮直径为 10 m, 叶片数量为 2, 设计最佳尖速比为 6.5。为减小机组的体积和重量, 装置的传动形式采用大速比增速方案。增速器采用行星齿轮增速形式, 增速比为 60.884; 增速器低速轴为空心轴, 用于测控信号线的通过。发电机采用永磁交流发电机, 额定功率为 150 kW, 额定转速为 1500 r/min, 额定电压为 690 V。发电装置的设计额定工作流速为 2.15 m/s, 设计最大工作流速为 2.5 m/s, 启动工作流速设定为 0.65 m/s。在额定工况下, 叶轮的额定转速为 24.637 r/min。

叶片的翼型为 NACA63424 翼型, 叶片各截面的弦长和扭角的分布如图 1 所示, 图中横轴为叶素的相对半径  $r$ , 纵轴分别为叶素的弦长或安装扭角。

装置采用变桨控制技术方案, 变桨驱动系统的机械结构如图 2 所示。变桨采用电机驱动的方式, 每个叶片配置单独的驱动电机。电机采用摆线针轮减速电机, 额定输出转速为 0.29 r/min。叶片的固定轴承采用四点接触球轴承, 轴承内圈为一个内齿轮。变桨电机输出端小齿轮与叶片固定轴承的内齿轮啮合, 组成传动比为 5.2:1 的齿轮传动结构, 带动叶片做变桨调整。

收稿日期: 2017-03-16

基金项目: 海洋公益性行业项目(201205019-3)

通信作者: 王兵振(1972—), 男, 博士、副研究员, 主要从事海洋能技术方面的研究。wang\_bingzhen@163.com

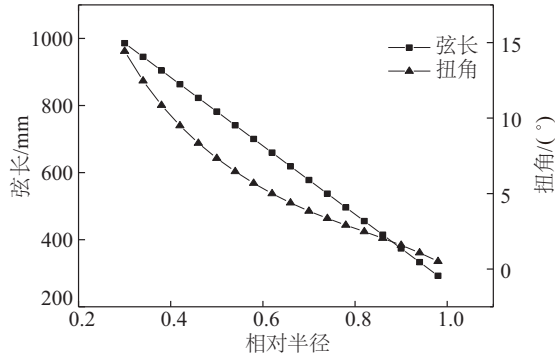


图1 叶片弦长和扭角分布

Fig. 1 Chord and twist angle of blade

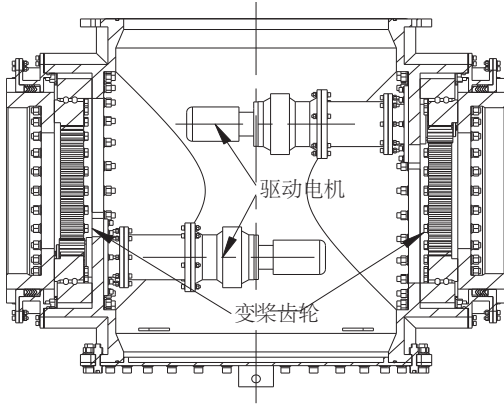


图2 变桨机构

Fig. 2 Pitch mechanism

## 2 变桨控制特性仿真模型

### 2.1 仿真模型

基于叶素-动量理论,建立发电装置变桨控制性能仿真模型,主要计算公式为:

$$\phi = \arctan \left[ \frac{V \cdot (1-a)}{nr \cdot (1+b)} \right] \quad (1)$$

$$F_{\text{tip}} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left( -\frac{B}{2 \sin \phi} \cdot \frac{1-x}{x} \right) \right] \quad (2)$$

$$F_{\text{hub}} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left( -\frac{B}{2 \sin \phi} \cdot \frac{x-x_{\text{hub}}}{x} \right) \right] \quad (3)$$

$$F = F_{\text{tip}} \cdot F_{\text{hub}} \quad (4)$$

$$\frac{aF}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} \left( C_x - \frac{\sigma_r C_y^2}{4 \sin^2 \phi} \right) \quad (5)$$

$$\frac{bF}{1+b} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \quad (6)$$

$$x = \frac{r}{R} \quad (7)$$

$$\sigma_r = \frac{Bc}{2\pi \cdot r} \quad (8)$$

$$C_x = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (9)$$

$$C_y = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (10)$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_0}^{\lambda} [b(1-a)F\lambda_r^3] d\lambda_r \quad (11)$$

$$T = B \sum_{j=1}^m \frac{1}{2} \rho V^2 (1-a)^2 s_j C_y \frac{1}{\sin^2 \phi} \quad (12)$$

式中,  $a$ ——轴向诱导系数;  $b$ ——切向诱导系数;  $\phi$ ——入流角;  $V$ ——远方流速速度;  $n$ ——叶轮旋转角速度;  $F$ ——损失系数;  $F_{\text{tip}}$ ——叶尖损失系数;  $F_{\text{hub}}$ ——轮毂损失系数;  $B$ ——叶片数量;  $x$ ——叶素相对半径;  $r$ ——叶素距离叶轮回转轴的距离;  $R$ ——叶轮半径;  $\sigma_r$ ——局部 solidity;  $c$ ——叶素的弦长;  $C_x$ ——轴向力系数;  $C_y$ ——切向力系数;  $C_L$ ——叶素的升力系数;  $C_D$ ——叶素的阻力系数;  $C_p$ ——叶轮的功率系数;  $\lambda$ ——叶轮尖速比;  $\lambda_r$ ——叶素当地尖速比;  $\rho$ ——海水密度;  $s_j$ ——叶素的面积;  $j$ ——叶素序号;  $T$ ——叶轮输出转矩。

仿真模型的输入参量为来流流速、叶轮的转速和桨距角。计算过程中,首先根据输入参量,利用迭代的方法计算诱导系数  $a$ 、 $b$ : 分别假定  $a$ 、 $b$  的值,利用式(1)计算入流角;根据入流角计算实际攻角,并得出对应的升阻力系数;根据式(2)~式(10)计算出新的诱导系数  $a'$ 、 $b'$ ;反复迭代,直至  $a$ 、 $b$  满足精度要求。然后,利用式(11)、式(12)计算叶轮的功率系数  $C_p$  和输出转矩  $T$ 。

### 2.2 仿真模型验证

为检验仿真模型的合理性,对其进行模型试验验证。模型叶片按上述 10 m 直径叶轮的叶片以 12.5:1 的比例进行缩小,模型叶轮的直径为 800 mm。试验在拖曳水池中进行,模型的拖曳速度为 2 m/s,试验装置如图 3 所示。在发电机和叶轮间设置一个扭矩/转速仪;发电机的额定功率 800 W,额定转速 400 r/min;扭矩/转速仪为 ZH07-50B,转矩测量最大值为 50 N·m;发电机输出端接三相整流桥,整流桥的直流端连接滑动变阻器,最大阻值 50  $\Omega$ 。

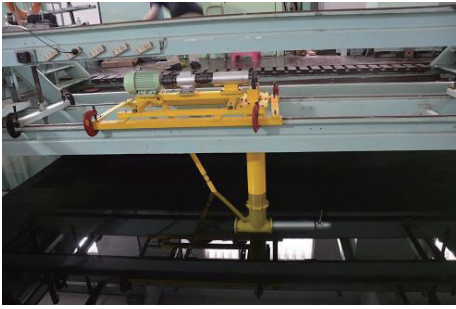


图3 模型试验装置

Fig. 3 Experiment model device

模型试验测得的叶轮功率系数如图4所示。由图4可知,尖速比5.5~8.0之间,仿真模型计算的功率系数与试验结果较为吻合;在设计尖速比6.5处,仿真模型计算的功率系数为0.405,而试验功率系数为0.396,两者的相对误差为2.3%;当尖速比超过8后,仿真结果与试验结果出现较大的偏差。总体来说,建立的计算模型较为合理,能进行动力特性的仿真计算。

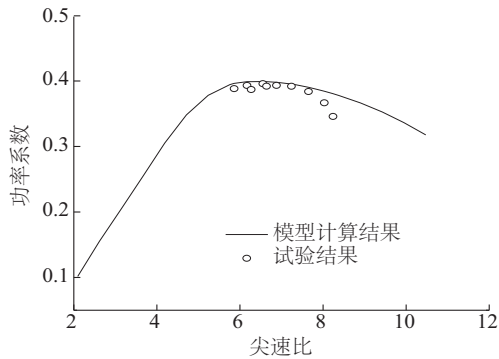


图4 仿真结果与试验结果对比

Fig. 4 Simulation results vs experiment results

### 3 潮流流速变化特性

对机组启动特性的研究需结合启动阶段潮流流速变化的情况,重点考察达到启动流速条件后一小段时间内机组的启动转矩和转速变化情况。一般机组应该在数分钟内完成启动,转速由零达到最佳尖速比对应的转速以上。本机组的启动流速的设计值为0.65 m/s,结合潮流计算模型,假定机组启动阶段的时间长度为2.5 min,分析启动阶段潮流流速的变化情况。

中国大部分近岸海域的潮流为正规半日潮,其潮流速度变化率可简化表示为<sup>[8]</sup>:

$$V = V_m \left[ 1 + k \sin \left( \frac{2\pi}{T_d} \cdot t \right) \right] \sin \left( \frac{2\pi}{T_c} \cdot t \right) \quad (13)$$

$$V_m = \frac{V_{md} + V_{mx}}{2} \quad (14)$$

$$k = \frac{V_{md} - V_{mx}}{V_{md} + V_{mx}} \quad (15)$$

式中,  $V$ ——潮流流速;  $V_m$ ——平均流速幅值;  $T_c$ ——潮流往复变化一周的周期,在此取12 h 25 min 14.1 s;  $T_d$ ——大小潮周期,在此取354 h 22 min 1.4 s;  $k$ ——赋值波动系数;  $V_{md}$ ——大潮最大流速,  $V_{mx}$ ——小潮最大流速;  $t$ ——时间。

利用潮流模型计算15 d内每次潮流流速增大过程中,在启动流速达到0.65 m/s之后2.5 min内潮流流速的变化情况。计算以中国潮流资源丰富的舟山地区为参考对象,假定大潮最大潮流流速为2.5 m/s,小潮最大流速为1.5 m/s<sup>[9]</sup>。根据计算结果,小潮启动阶段潮流流速变化范围为0.65~0.68 m/s,大潮启动阶段潮流流速变化范围在0.65~0.70 m/s,其他启动阶段潮流流速变化范围在上述两者之间。潮汐大小潮的变化对启动阶段的流速变化有一定的影响,但差别较小。在考察启动阶段机组的特性时,可重点考察流速为0.65、0.70 m/s这2种工况。

## 4 变桨控制启动特性分析

### 4.1 静态启动转矩

在叶轮处于静止状态时,水流作用到叶轮上的转矩对于机组的启动至关重要,即静态启动转矩。叶轮的静态启动转矩大小与桨距角、流速有着密切的关系。对机组的静态启动转矩特性进行分析。计算结果如图5所示。由图5可知,在流速固定不变的情况下,随着桨距角的增大,叶轮启动转矩呈现出“小—大—小”的变化趋势,在桨距角约为60°时叶轮的启动转矩达到最大;在保持一个固定桨距角的情况下,叶轮的启动转矩与来流速度成正比,随来流速度的增大而增大。当桨距角为0°时,叶轮的启动转矩很小,在流速为0.5 m/s时,叶轮的启动转矩仅0.19 kN·m。即使流速达到1.0 m/s,0°桨距角叶轮的启动转矩也仅约为0.75 kN·m。而当桨距角达到60°时,流速为0.5 m/s对应的叶轮的启动转矩为2.3 kN·m,约为0°桨距角时的12倍;流速为1.0 m/s时相对应的叶轮启动转矩为9.1 kN·m,同样



约为 $0^\circ$ 桨距角时的12倍。

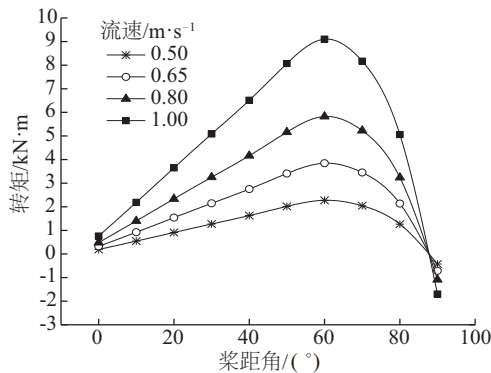


图5 静态启动力矩

Fig. 5 Static taking-off torque

另外,在流速为 $0.5 \text{ m/s}$ 和桨距角为 $20^\circ$ 的情况下叶轮的静态启动转矩为 $0.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,该数值与桨距角为 $0^\circ$ 、流速达到 $1.0 \text{ m/s}$ 时的叶轮启动转矩相当;这说明采取变桨控制的措施,能在小流速条件下获得定桨叶轮在大流速情况下的启动转矩,从而有效降低机组的启动流速。桨距角保持 $0^\circ$ 不变对应着定桨技术方案,因此定桨水平轴潮流发电装置的静态启动转矩相对较小。采用变桨的控制策略,能极大地提高水平轴潮流发电装置的静态启动转矩。

#### 4.2 启动阶段转矩特性分析

当机组刚刚启动后,叶片的旋转运动会对叶片的迎流角度产生巨大的影响,在较短时间内叶轮的受力状态会发生很大的变化。因此,在机组刚刚启动后的短时间内,叶轮的转矩特性对机组的启动性能同样有着重要的影响。启动阶段对叶轮转矩特性有重大影响的因素主要包括流速、叶轮转速、桨距角等。对变桨距角情况下启动阶段叶轮的转矩特性进行仿真分析,重点考察不同流速条件下叶轮的输出转矩与桨距角、转速间的关系。在流速方面,根据启动阶段流速分析结果,考察流速为 $0.65 \text{ m/s}$ 和 $0.70 \text{ m/s}$ 这2种工况条件下叶轮的转矩特性。启动阶段转矩特性反映流速、叶轮转速和转矩的静态关系,属于静态特性。

启动阶段叶轮转矩与桨距角的关系的计算结果如图6所示。图中,曲线标示中数字表示桨距角, $v_1$ 表示流速为 $0.65 \text{ m/s}$ 的情况, $v_2$ 表示流速为 $0.70 \text{ m/s}$ 的情况;共计考察 $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ 共4种不同桨距角的情况。

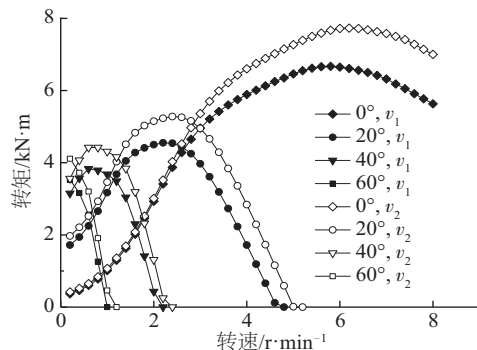


图6 启动阶段转矩特性

Fig. 6 Torque characteristic during start up

在 $0.65 \text{ m/s}$ 流速条件下,当叶轮刚刚启动时转速极低,在这种情况下( $0.2 \text{ r/min}$ )叶轮的转矩与桨距角成正比, $60^\circ$ 桨距角对应的叶轮转矩最大, $0^\circ$ 桨距角对应的叶轮转矩最小。随着转速的提高, $60^\circ$ 桨距角叶轮的转矩迅速减小,而其他桨距角的叶轮转矩则出现先增大后减小的现象。当转速提高至 $0.4 \text{ r/min}$ 时, $40^\circ$ 桨距角的叶轮转矩超过 $60^\circ$ 桨距角叶轮;当转速提高至 $1.2 \text{ r/min}$ 时, $20^\circ$ 桨距角叶轮的转矩超过其他3种桨距角叶轮;当转速超过 $3.0 \text{ r/min}$ 以后, $0^\circ$ 桨距角对应的叶轮转矩均大于其他桨距角对应的转矩。另外, $60^\circ$ 桨距角叶轮的转矩随转速的增大而迅速减小,当转速刚达到 $1.0 \text{ r/min}$ 时叶轮的输出转矩几乎为零。

对于流速为 $0.70 \text{ m/s}$ 的情况,叶轮的输出转矩均大于流速为 $0.65 \text{ m/s}$ 时的转矩,但转矩的特性和变化趋势基本相同。在叶轮处在刚启动的极低转速时,叶轮的转矩与桨距角成正比,大桨距角对应的叶轮转矩较大。但随着转速的提高,最佳桨距角的数值逐渐减小。 $60^\circ$ 桨距角叶轮的转矩在转速很低的情况下就减小到 $0 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,其他3种桨距角的叶轮的转矩则呈现增大后减小的趋势。

另外,在相同桨距角的条件下,2种流速条件下转矩特性曲线中转矩最大点对应的转速值非常接近,流速较大时的曲线略为偏右,即最大转矩点对应的转速值相对低流速时略微增大,但增大量很小。对于启动过程中的其他时刻来说,当流速介于 $0.65\sim 0.70 \text{ m/s}$ 之间,其转矩与转速关系曲线应介于上述2个特性曲线之间,且最大转矩点对应的转速值也基本相同。对这2个流速情况的分析,能反映整个启动阶段叶轮转矩与转速的对应特性。

在上述 2 种情况中,叶轮转矩特性对应的各最佳桨距角基本相同。当转速在 1.0~3.0 r/min 之间时,20°桨距角对应的叶轮转矩则从整体上优于其他角度的桨距角。而当转速小于 1.0 r/min 时,40°桨距角对应的叶轮转矩则在整体上最优。虽然在极低转速时 60°桨距角的转矩大于其他桨距角的转矩,但当叶轮刚刚转动时,60°桨距角的转矩就迅速减小到零,这个特性反而会对叶轮的启动起到阻碍的作用,因此不是最佳选择。

对于变桨控制叶轮启动的方案来说,需要设定合理的初始桨距角和变桨速度。根据启动阶段叶轮的转矩特性可知,在叶轮启动阶段,其初始桨距角不宜设置的过大。对于分析对象来说,可将初始桨距角设置约为 40°。在控制策略上,当叶轮启动后,以合适的变桨速度将桨距角调整至 0°,以便获得最大的输出转矩,以及尽快完成启动。变桨调整速度应与转速变化相匹配,否则,会使启动过程中叶轮的输出转矩达不到最佳值,反而影响机组的启动。

### 4.3 启动过程动态特性分析

除初始桨距角外,变桨速度是影响机组启动的另一个控制重要参数。在变桨控制仿真模型基础上,建立机组启动过程的动力学仿真模型,对机组启动的动态过程进行仿真,考察不同变桨控制速度对启动性能的影响。

机组启动的动力学过程的计算公式为:

$$J\varepsilon_i = T_i - T_0 \quad (16)$$

$$n_{i+1} = n_i + \varepsilon_i \cdot \Delta t \quad (17)$$

式中,  $J$  —— 机组的转动惯量;  $\varepsilon$  —— 第  $i$  次计算时叶轮的角加速度;  $T_i$  —— 第  $i$  次计算时叶轮的驱动转矩;  $T_0$  —— 机组的摩擦阻力矩;  $n_i$  —— 第  $i$  时刻叶轮的转速;  $\Delta t$  —— 时间步长。机组的转动惯量主要包括叶轮、增速器和发电机 3 部分的转动惯量,换算到叶轮转轴后的转动惯量为 23750 kg·m<sup>2</sup>;一般水平轴潮流机组的启动流速为 0.7~0.9 m/s,考虑到本机组采用大增速比的传动形式,启动摩擦阻力矩会相对更大,按本机组 1.0 m/s 流速时的静态转矩取  $T_0$  为 750 N·m<sup>[10]</sup>。

计算针对大潮流速条件,即最大流速 2.5 m/s,启动阶段流速变化范围为 0.65~0.70 m/s。在计算过程中,假定在达到启动流速前,机组处于制动和

静止状态,达到启动流速后松开制动并断开负载,发电机组仅有摩擦阻力矩。机组的启动流速为 0.65 m/s,仿真的时间步长为 2.5 s,仿真的总时长为 160 s,潮流流速变化按式(13)考虑,最大流速取 2.5 m/s。仿真计算流程为:设定初始流速、叶轮转速和桨距角;根据初始条件,利用仿真模型计算叶轮的输出转矩  $T_i$ ;利用式(16)计算叶轮的角加速度  $\varepsilon_i$ ,利用式(17)计算下一时刻的叶轮转速。

仿真结束时的流速约为 0.70 m/s。流速为 0.70 m/s 时,按最佳尖速比考虑,叶轮的最佳转速约为 8.5 r/min。因此,当叶轮转速达到或超过 8.5 r/min,可认为机组完成启动。共计考察 7 种变桨速度控制策略下机组的启动过程。根据启动阶段叶轮转矩特性分析结果,变桨启动控制的初始桨距角取 40°。7 种变桨速度分别取 0.25、0.35、0.50、0.75、1.00、2.00、3.00 (°)/s。在仿真的 160 s 内,所有变桨控制方案的桨距角均由 40°调整至 0°,进入正常工作状态。启动过程的仿真结果如图 7 所示。

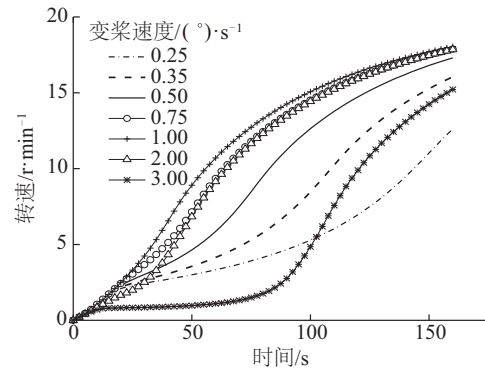


图7 大潮期间机组启动过程

Fig. 7 Dynamic process during spring tidal

由计算结果可见,在变桨控制下所有方案的叶轮转速均达到 12.5 r/min 以上,机组的正常启动。由于在启动阶段机组不施加电力负载,因此在负载方面仅有摩擦阻力矩作用;而在启动的后期摩擦阻力矩小于叶轮的驱动力矩,仿真中叶轮最终转速超过了最佳尖速比对应的转速。

在启动的前十几秒内,除变桨速度 2.0、3.0 (°)/s 外,其他 5 种变桨速度的启动特性几乎完全一致,在启动至约 20 s 时,这 5 种方案对应的叶轮转速均达到约 2 r/min。启动动作超过 20 s 后,变桨速度明显影响启动速度,不同方案的叶轮转速出现较大的差别,但超过 100 s 后各方案的转速差距又开始略

为缩小。

对比图 7 中各曲线可知,变桨速度为 1.00、0.75、2.00( $^{\circ}$ )/s 等 3 种方案的启动性能较好,叶轮转速的增长速度明显大于其他变桨速度的方案,约在 60 s 内这 3 种方案的叶轮转速均达到或超过最佳尖速比转速;三者中 1.0( $^{\circ}$ )/s 变桨速度的方案最佳,0.75、2.0( $^{\circ}$ )/s 这 2 种变桨方案的启动性能较为接近,转速增大速度比 1.0( $^{\circ}$ )/s 变桨方案略差。变桨速度为 3.0、0.25  $^{\circ}$ /s 这 2 种方案的启动性能较差;其中,在启动前 80 s 内 3.0( $^{\circ}$ )/s 方案对应的叶轮转速较低,不到 2.0 r/min,超过 90 s 后叶轮的转速才开始快速上升;0.25( $^{\circ}$ )/s 方案在刚启动的前 20 s 的转速较好,但超过 20 s 以后 0.25( $^{\circ}$ )/s 的方案转速明显小于其他变桨方案,尤其是超过 100 s 后,该方案对应的叶轮转速最低。变桨速度为 0.35、0.5( $^{\circ}$ )/s 这 2 种方案的启动性能适中,叶轮转速的增速介于上述诸方案之间。

为便于了解变桨速度对启动过程影响的机理,对变桨速度为 1.0、0.25( $^{\circ}$ )/s 这 2 种代表性的技术方案进行进一步分析。考察启动过程中叶轮转矩与转速的变化过程与转矩特性的匹配情况。启动性能最佳的为变桨速度 1.0( $^{\circ}$ )/s 的方案(方案 5),其转矩转速变化过程如图 8 所示。

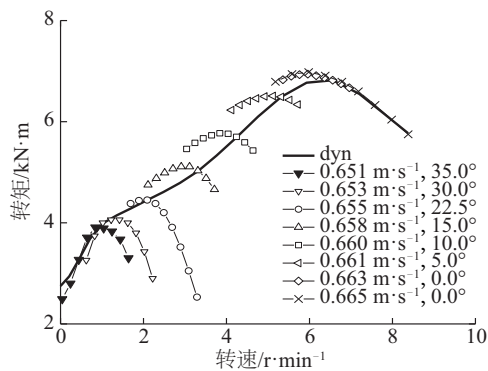


图 8 方案 5 与转矩特性匹配情况

Fig. 8 Matching of scheme 5 with torque character

图 8 中以“dyn”标示的实线为启动过程中叶轮转速和转矩变化情况,是叶轮在启动过程中的动态状态;其他曲线为叶轮的转矩特性曲线,表示在给定的流速、桨距角条件下,叶轮的转速与输出转矩之间的关系,为静态特性,曲线标示中前面的数值为流速,后面的数值为桨距角。在启动过程中,叶轮的转矩和转速沿“dyn”曲线变化。

结合图 7 启动过程仿真结果,在启动后某一时刻叶轮达到一个转速和桨距角,同时流速也达到一个数值;考察该流速、桨距角条件下叶轮的转速和转矩的对应关系,即得出该时刻叶轮的转矩特性曲线。若叶轮的 actual 转速位于转矩特性曲线中转矩最大点对应的转速附近,则表示叶轮的状态处在较佳的状态;反之若离最佳转速较远,则说明叶轮的状态不是最佳状态。由图 8 可见,在转速达到 6 r/min 之前的启动过程中,叶轮转矩转速动态曲线与各转矩特性曲线的交点靠近转矩特性曲线最大值,因此在启动的大部分时间,叶轮工作在较佳的工作状态,该变桨速度对叶轮在启动过程中始终获得较大的驱动转矩有利,较为合理。

变桨速度为 0.25( $^{\circ}$ )/s 方案(方案 1)的启动性能相对较差,在启动过程中其转速、转矩变化过程与转矩特性的匹配情况如图 9 所示。图中,横轴为叶轮的转速,纵轴为叶轮输出转矩。图中,以“dyn”标示的实线为启动过程中叶轮转速与转矩的变化情况,其他曲线为叶轮的转矩特性曲线,标示的数值为桨距角。由图 9 可知,仅在刚启动的时候,叶轮的转速、转矩与静态转矩特性曲线中的最佳状态较吻合,在后续的启动过程中转速、转矩动态变化曲线与转矩特性曲线的交点远远偏离特性曲线最大转矩值位置,因此在启动过程中叶轮的动力性能未得到充分利用,造成启动过程中叶轮转速上升缓慢。

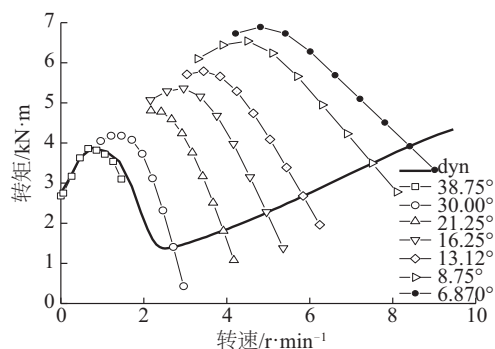


图 9 方案 1 与转矩特性匹配情况

Fig. 9 Matching of scheme 1 with torque character

#### 4.4 小潮启动过程分析

除大潮启动情况外,分析小潮期间的启动情况。小潮最大流速取 1.5 m/s,启动过程的仿真结果如图 10 所示。由图 10 可知,变桨速度为 1.0( $^{\circ}$ )/s



的方案启动性能依然优于其他方案,变桨速度为  $3.0(^{\circ})/\text{s}$  的最差;但所有变桨方案都能保证机组在流速达到  $0.65 \text{ m/s}$  之后的  $2.5 \text{ min}$  内的完成启动。比较图 10 和图 7,2 种最大流速条件下的启动过程几乎相同,这说明大小潮流速的变化对变桨启动控制的影响较小。

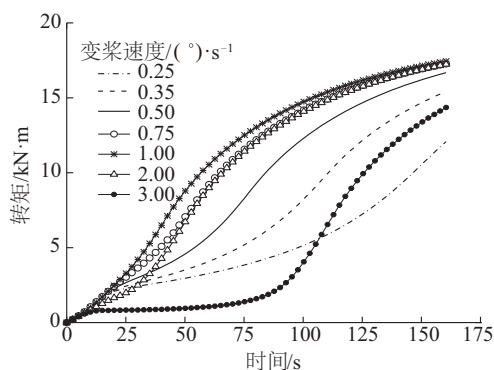


图 10 小潮期间机组启动过程

Fig. 10 Dynamic process during neap tidal

## 5 结 论

针对水平轴潮流能发电装置的变桨启动问题,以正在研制的水平轴潮流发电装置为对象,建立基于叶素-动量理论变桨启动特性仿真模型,对机组的变桨静态启动转矩、启动阶段转矩等静态特性进行分析,在此基础上对变桨启动动态特性进行研究。研究结果表明:

1)变桨控制可使水平轴潮流发电装置的静态启动转矩提高约 12 倍,可有效降低发电装置的启动流速,极大改善水平轴潮流发电装置的启动性能。

2)初始桨距角和变桨速度对水平轴潮流发电装置的启动特性有着较大的影响,当采用变桨方式控制水平轴潮流发电装置启动时,需要设置合理的初始桨距角、变桨速度等控制参量,过大或过小的初始桨距角、变桨速度都会对启动过程产生不利的影响。对于研制的潮流发电装置来说,最佳初始桨距角为  $40^{\circ}$ ,启动时的最佳变桨速度为  $1.0(^{\circ})/\text{s}$ 。

### [参考文献]

[1] 董永军,朱挽强,陈健梅,等. 新型水平轴定桨距永磁直驱潮流能发电系统设计及应用[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(5): 74—79.

[1] Dong Yongjun, Zhu Wanqiang, Chen Jianmei, et al. Design and application of a novel horizontal fixed-pitch tidal current system with direct drive permanent magnet generator[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(5): 74—79.

[2] 陈俊华,李浩,唐辰,等. 低流速水平轴潮流能发电装置桨叶的研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(10): 2511—2517.

[2] Chen Junhua, Li Hao, Tang Chen, et al. Blade research of horizontal axis marine current turbine in low flow velocity[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(10): 2511—2517.

[3] 张理,李志川,肖钢,等. 中低流速潮流能发电系统关键技术研究[J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 115—118.

[3] Zhang Li, Li Zhichuan, Xiao Gang, et al. Research on the key technologies for power generation system with medium and low velocity tidal energy[J]. China off Shore Oil and Gas, 2013, 25(6): 115—118.

[4] 戴庆忠. 潮流能发电及潮流能发电装置[J]. 东方电机, 2010, 38(2): 51—66.

[4] Dai Qingzhong. Tidal energy electric power generation and devices[J]. Dongfang Electric Machinery, 2010, 38(2): 51—66.

[5] 刘宏伟,李伟,林勇刚,等. 水平轴潮流能发电机组液压变桨技术研究及海试[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(5): 66—69.

[5] Liu Hongwei, Li Wei, Lin Yonggang, et al. Research and sea trials of the hydraulic pitch control technology for horizontal tidal current turbines[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(5): 66—69.

[6] 马舜,李伟,刘宏伟,等. 水平轴潮流能发电机组变桨距系统研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1605—1610.

[6] Ma Shun, Li Wei, Liu Hongwei, et al. Study on blade pitching system for horizontal axis tidal current turbine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(11): 1605—1610.

[7] 李嘉飞. 水平轴潮流能水轮机变桨距机构关键部件分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.

[7] Li Jiafei. Analysis on key components of the horizontal axis tidal current turbines' variable pitch mechanism[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.

[8] 郑志南. 海洋潮流能的估算[J]. 海洋通报, 1987, 6(4): 70—75.

[8] Zheng Zhinan. The estimation of ocean tidal current

- energy[J]. Marine Science Bulletin, 1987, 6(4): 70—75.
- [9] 侯放, 于华明, 鲍献文, 等. 舟山群岛海域潮流能数值估算与分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(1): 125—133.
- [9] Hou Fang, Yu Huaming, Bao Xianwen, et al. Analysis of tidal current energy in Zhoushan sea area based on high resolution numerical modeling [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(1): 125—133.
- [10] 国家海洋技术中心. 中国海洋能技术进展 2014[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [10] National ocean technology center. Progress of China marine energy technology 2014 [M]. Beijing: China Ocean Press, 2014.

## STUDY OF PITCH CONTROLS ON STARTING UP PERFORMANCE OF HORIZONTAL AXIS TIDAL CURRENT TURBINE

Wang Bingzhen, Zhang Wei, Duan Yunqi, Guo Yi

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

**Abstract:** A study of the pitch control on starting up of horizontal axis tidal current power generation device was carried out. Based on the blade elements momentum theory, a dynamics simulation model is established, which was verified by use of small scale model test in towing tank. Then the startup characteristics of horizontal axis tidal turbine was studied, and the main factors affecting startup were analyzed. The results showed that the initial pitch angle and pitch velocity are the key factors affecting the start-up performance of horizontal axis tidal turbine, and the startup performance of the device can be effectively improved by reasonably setting these 2 parameters.

**Keywords:** tidal energy; power device; start up; pitch control