

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.04.007

海流能水轮机模拟研究

周述庆, 易吉良, 李军军, 石伟, 李淼, 姜建伟

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了实现海流能发电的实际工况模拟, 分析了直流电动机与水轮机的运行机理, 探讨了二者的功率及转矩特性, 设计了控制直流电机的电流转速双闭环控制策略, 并利用 Matlab/Simulink 搭建了水轮机模拟仿真系统, 完成了固定流速、缓慢增速和随机流速 3 种典型工况下的系统仿真实验。实验结果表明, 电流转速双闭环的直流电动机控制系统可准确模拟水轮机的主轴转矩, 适用于实验室条件下对海流能发电机的测试。

关键词: 海流能; 工况模拟; 水轮机; 直流电机; 电流转速双环

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)04-0030-06

Simulation Study of Ocean Current Turbine

Zhou Shuqing, Yi Jiliang, Li Junjun, Shi Wei, Li Miao, Jiang Jianwei

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract : In order to simulate the actual working condition of current energy generator, analyzes the operating principles of the DC motor and the hydraulic turbine, discusses their power and torque characteristics, and designs a double closed-loop control strategy for the control of current and speed of DC motor. Establishes simulation system of turbine by Matlab/Simulink and complete the system simulation tests under three typical working conditions of constant speed, slow growth rate and random flow rate. Experimental results show that the current and speed double closed-loop DC motor control system accurately simulates the main shaft torque of hydraulic turbine and meets the laboratory conditions for ocean current energy generator tests.

Keywords : current energy generation; simulation of working condition; turbine; DC motor; current speed loop

0 引言

目前, 全球生态被严重破坏, 导致能源生产和需求矛盾日益激烈, 因而加强新能源的开发与研究刻不容缓。海流能发电是继风力发电后新能源开发的重点方向之一, 它不仅是一种无污染、可再生能源, 而且其蕴藏量丰富, 对解决能源和环境问题有着重要的意义^[1]。

已有对海流能发电方面的研究, 主要集中在小功率发电系统的实现研究方面, 对海流能测试平台的研究相对较少, 综合测试平台及测试方法对海流能发电装置的研发、测试、评价至关重要。海流能测试平台的研究可分为如下步骤:

1) 工况分析。以得到海流能的简单快速估算方法。分析过程中应考虑地月引力产生的潮汐运动、

收稿日期: 2015-06-30

基金项目: 湖南省科学技术厅计划基金资助项目(2014GK3001)

作者简介: 周述庆(1990-), 男, 湖南隆回人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新能源发电与智能电网,

E-mail: 121887595@qq.com

通信作者: 易吉良(1972-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 主要研究方向为电能质量分析和数字信号处理,

E-mail: yi_jiliang@163.com

水流上下波动等因素,这在《全国海洋能资源区划技术规定》中已给出估算方法^[2]。

2) 水轮机结构的研究与设计。通过设计与优化,可使水轮机获得较高的能量吸收率^[3-4]。

3) 测试平台整机设计^[4]。通常采用控制电动机的输出转速和转矩模拟水轮机。

已有关于海洋能测试平台的研发^[5-10],都缺乏整体的测试平台仿真系统,且被测发电机的功率较低,导致单机发电容量研究提升困难,商业价值不高。

为了实现海流能发电的实际工况模拟,本文通过分析水轮机的数学模型,研究其转矩计算方法,探讨了直流电机模拟水轮机运行的机理,并且利用 Matlab/Simulink 搭建了电流转速双闭环的直流电动机控制系统,用以准确模拟水轮机的主轴转矩,最后,通过恒速、变速和随机流速几种典型工况实验对所提模拟方案进行了验证,以期为海流能开发研究中的发电系统提供理论参考和实物模拟平台。

1 水轮机模型模拟基础

1.1 水轮机能量转换理论基础

根据水动力学知识^[4],可得出水轮机的输入功率 P_i 计算式为

$$P_i = 1/2 \rho v^3 A = 1/2 \rho \pi R v^3; \quad (1)$$

水轮机的输出功率 P_o 为

$$P_o = C_p P_i = 1/2 C_p \rho v^3 A = \pi/2 \rho D^2 v^3 C_p. \quad (2)$$

式(1)和(2)中:

P_i 为通过水轮机叶轮旋转面积的潮流能功率,单位为 kW;

ρ 为海水密度,单位为 kg/m^3 ;

A 为水轮机前方的水流面积,单位为 m^2 ;

v 为海流流速,单位为 m/s ;

C_p 为水轮机有效功率系数,可表示为

$$C_p = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%. \quad (3)$$

水轮机的输出转矩 T 为

$$T = \frac{P_o}{\omega} = \frac{\pi}{2} \rho C_p R^3 v^2. \quad (4)$$

根据贝茨理论^[5],水轮机的叶尖速比 λ 为

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{2\pi R n}{60v}. \quad (5)$$

式(4)和(5)中:

ω 为叶片的角速度,单位为 rad/s ;

R 为叶轮半径,单位为 m ;

n 为叶轮转速,单位为 r/min 。

在静态情况下,最佳的叶尖速比 λ_{opt} 与流速关系

如下:

$$v = \frac{\omega_{\text{opt}} R}{\lambda_{\text{opt}}}. \quad (6)$$

将式(6)代入式(2),可得静态条件下水轮机的最大输出功率 P_{max} , 为

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{2} C_{\text{max}} \rho A \left(\frac{\omega_{\text{opt}} R}{\lambda_{\text{opt}}} \right)^3 = K_{\text{opt}} \omega_{\text{opt}}^3; \quad (7)$$

此时的获能系数为

$$C_p = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_1}} - C_6 \lambda; \quad (8)$$

$$\text{且有 } \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 2} - \frac{1}{\beta^3 + 1}. \quad (9)$$

其中 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 为计算参数^[4-5]。

1.2 模型分析

由上述数学关系式,设定偏航角为 0° 时,得到水轮机的获能系数 C_p 和叶尖速比 λ 的关系如图1所示。

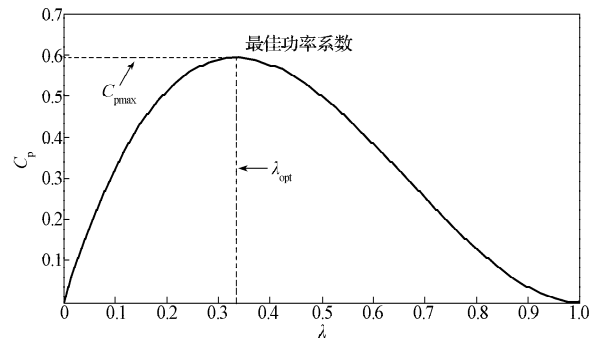


图1 水轮机的 C_p 和 λ 关系图

Fig. 1 The relationship diagram of C_p and λ of the turbine

由图1可知,在偏航角不变时,水轮机的叶尖速比 λ 有唯一对应的最佳功率系数 $C_{p\text{max}}$ 。大于或小于 $C_{p\text{max}}$, C_p 都会偏离 $C_{p\text{max}}$, 引起机组工作效率下降。

实时工况下,当流速超过某一值时,可能对水轮机造成损伤,因而要求水轮机能工作于合适的偏航角。根据式(7)~(9),水轮机的获能系数 C_p 与偏航角 β 的关系如图2所示。

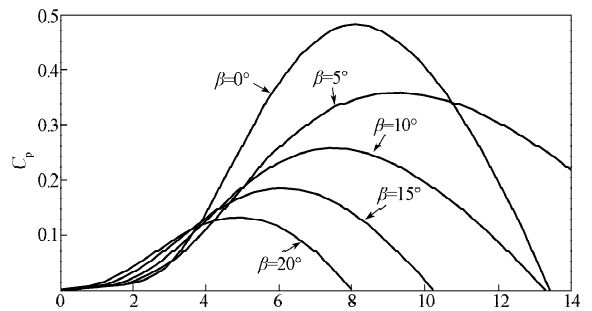


图2 偏航时 C_p 与 β 的关系图

Fig. 2 The relationship diagram of C_p and β while yawing

由图2可知,偏航角的变化会导致最佳功率系

数 C_{pmax} 相应变化, 偏航角越大, C_{pmax} 越小。因此, 当海流流速超过某一流速时, 可以通过调节偏航角, 使水轮机处于最佳的工作状态。

在固定偏航角的不同流速工况下, 根据式 (2), 可得出水轮机的转速 ω 与吸收的能量即输出功率 P_o 间的关系, 如图 3 所示。由图 3 可知, 不同水流速度下, 水轮机的输出功率均随转速的升高先增大后减少, 即存在一个最大功率值点。因此, 必须对水轮机的转速进行调节, 以使输出能量最大。

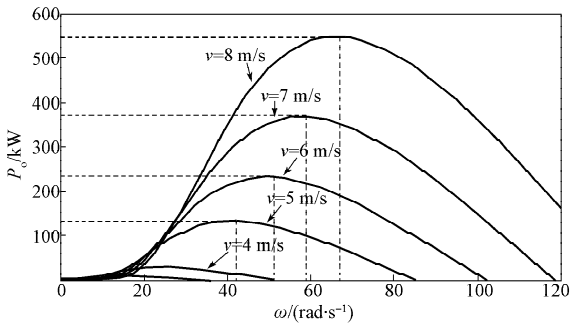


图3 水轮机转速与输出功率关系图

Fig. 3 The relationship diagram of turbine speed and output power

海流流速一定时, 转速不同则水轮机吸收和输出功率随之变化, 但总存在一个最佳转速 ω_{opt} , 使得水轮机达到最佳叶尖速比 λ_{opt} , 捕获最大海流能 P_{max} , 输出最大功率, 根据式 (4), 可得水轮机输出机械力矩 T_m 与转速 ω 和流速 v 的关系如图 4 所示。

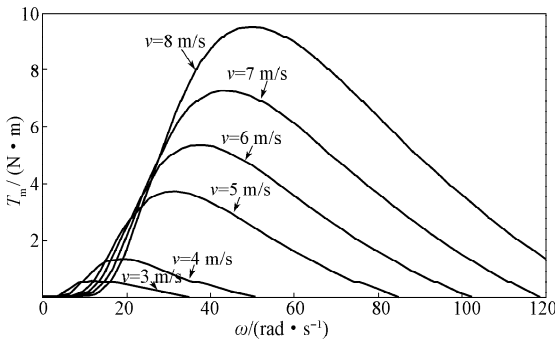


图4 水轮机机械转矩与转速的关系图

Fig. 4 The relationship diagram of turbine mechanical torque and speed

水轮机的模拟系统主要是模拟水轮机的转矩输出, 由图 4 可看出, 不同海流速度下, 水轮机的输出转矩均随转速的增加先增大后减少, 出现了唯一最大值点。

综上所述, 在水轮机模拟系统中, 对转速的控制至关重要。

1.3 直流电动机模拟水轮机的运行机理

理想状态下, 直流电动机的动态特性可用如下方程表示^[6]:

$$\begin{cases} T_e - T_l = J \frac{dw}{dt}, \\ T_e = C_m I_a, \\ U = R_a I_a + L_a \frac{dw}{dt} + C_e n, \\ E = C_e n, C_e = K_e \phi. \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 中: T_e 为电机电磁转矩;

T_l 为负载转矩;

C_e 为反电动势转速比;

C_m 为电磁转矩电流比;

K_e 为电动势系数;

R_a 和 L_a 分别为电枢电阻和电感;

J 为电机转动惯量;

U 和 I_a 分别为电枢电压和电流;

ω 和 n 分别为电机角速度和转速;

ϕ 为励磁磁通^[7]。

当保持磁通 ϕ 不变时, 电机的输出功率为

$$P_m = T_e \omega = C_m I_a \omega = C_e n I_a \omega = C_e n \frac{v - C_a n}{R_a} \omega. \quad (11)$$

电机转速通常高于水轮机转速, 而电磁力矩比水轮机机械力矩小, 故需要经变速箱进行调节:

$$\omega = N \cdot \omega_r, T_e = \frac{T_m}{N}. \quad (12)$$

式中: ω_r 为水轮机角速度; T_m 为机械力矩。

图 5 所示为直流电机转矩与水轮机转速关系曲线图。其中, 4 条直线为电机转矩-转速特性曲线 (电枢电压 $U_1 > U_2 > U_3 > U_4$)。由图可知, 调节电枢电压, 使电机运行曲线与水轮机特性曲线相交, 可得连续的水轮机特性曲线上的每一个点, 即可以使用直流电机模拟水轮机。

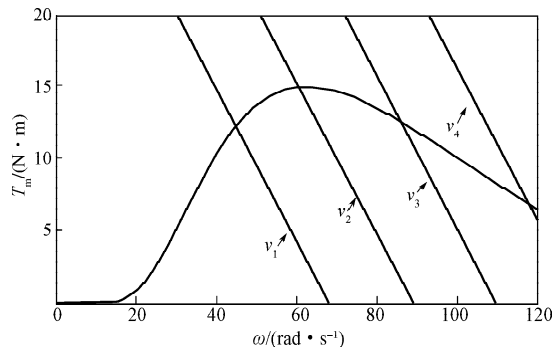


图5 直流电机转矩与水轮机转速关系图

Fig. 5 The relationship diagram of DC motor torque and turbine speed

综上所述, 利用直流电机模拟海流能发电中的水轮机的方案可行, 关键在于计算电动机的输出功率和设计出对电机的调压调速控制方法。

2 模拟仿真建模与实验

2.1 模拟系统总体结构

基于上述分析,用 Matlab/Smulink 搭建水轮机模拟系统,系统共分 3 部分^[7]:

- 1) 水轮机模块,用于获取控制电机的参考转矩;
- 2) 控制模块,用于控制电机的电流、转速闭环;
- 3) 直流电机模块,用于输出对应的水轮机转矩。

模拟系统的目标,是使直流电动机的转矩能跟踪水轮机的转矩。模型的总体框架如图 6 所示。

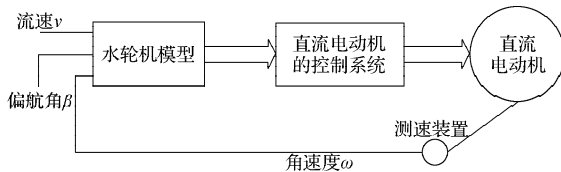


图6 水轮机模拟系统总体框图

Fig. 6 The block diagram of hydraulic turbine simulation system

2.2 水轮机建模

水轮机系统参数设定:额定功率为 20 kW,最大获能系数为 0.35,实际工况下,与发电机相连时需要变速箱改变转速和转矩,本次在实验室条件下变速比设定为 8.1,半径为 2.5 m。

根据式(2)~(9)建立水轮机模型,见图 7。

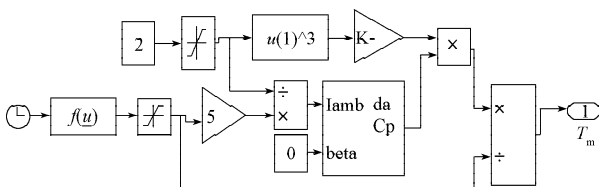


图7 水轮机模型

Fig. 7 Turbine model

给定流速分别为: 2, 3, 4, 5 m/s, 水轮机转速 ω 取 0~20 rad/s, 固定偏航角 $\beta=0^\circ$, 得到水轮机的输出转矩与角速度的关系仿真结果, 如图 8 所示。

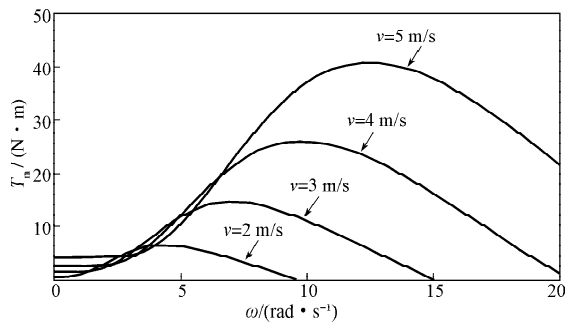


图8 水轮机 $T_m-\omega$ 关系图

Fig. 8 The relationship diagram of turbine T_m and ω

给定海流速度 $v=4$ m/s, 水轮机的转速 ω 范围为 0~20 rad/s, 偏航角 $\beta_1=2^\circ, \beta_2=4^\circ, \beta_3=6^\circ, \beta_4=10^\circ$, 仿真

所得偏航时水轮机的输出转矩与角速度的关系曲线如图 9 所示。

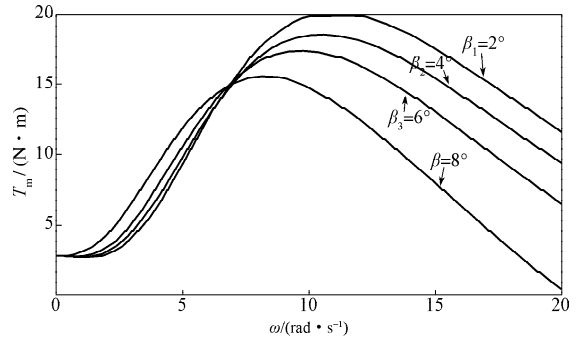


图9 偏航时水轮机的 $T_m-\omega$ 关系图

Fig. 9 The relationship diagram of turbine $T_m-\omega$ while yawing

由图 8 和图 9 可得知, 海流速度 v 越大, 水轮机的转矩 T_m 越大; 而偏航角 β 越小, 水轮机的转矩 T_m 越大, 这一结果与实际工况特性相符。

为了能更准确地实现模拟, 考虑到转矩信号抗干扰能力弱, 且易受水轮机实际工况的影响, 波动性较大。而电流信号抗干扰能力较强, 测量较方便, 若把转矩信号转化成电流信号, 通过电流闭环进行调节, 实现转矩控制, 将克服直接转矩控制的弱点。设计的直流电机控制原理图如图 10 所示。

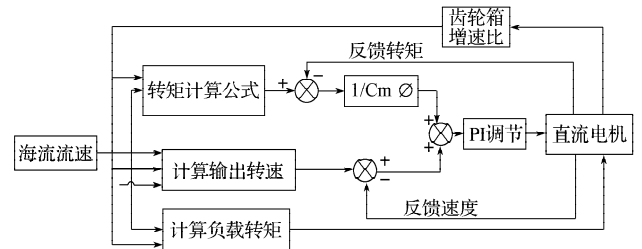


图10 直流电机控制原理图

Fig. 10 The control principle diagram of DC motor

3 工况仿真实验结果与分析

根据以上分析, 搭建海流能发电能量转换装置模拟系统, 如图 11 所示。

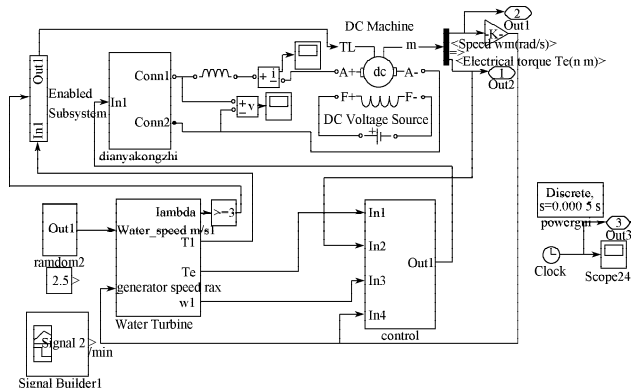


图11 海流能水轮机模拟系统模型

Fig. 11 Simulation system model of ocean current turbine

工况仿真过程中的系统仿真参数设置如下：仿真时间为20 s，步长为0.000 5 s，平波电抗器 L 为 $15e^{-3}$ H，励磁电压为220 V的直流电压，水轮机半径 R 为2.5 m，最佳叶尖速比为8.1，PI的仿真参数见表2。然后对固定流速、缓慢增速和随机流速3种典型工况进行仿真实验。

表2 PI仿真参数

Table 2 PI simulation parameters

| PI 参数 | 比例参数 P | 积分参数 I |
|-------|----------|----------|
| 转矩环 | 8.1 | 0.000 05 |
| 转速环 | 0.5 | 0.000 01 |

1) 固定流速工况

取 $v=2.5$ m/s，所得海流能水轮机的仿真模拟结果如图12所示。

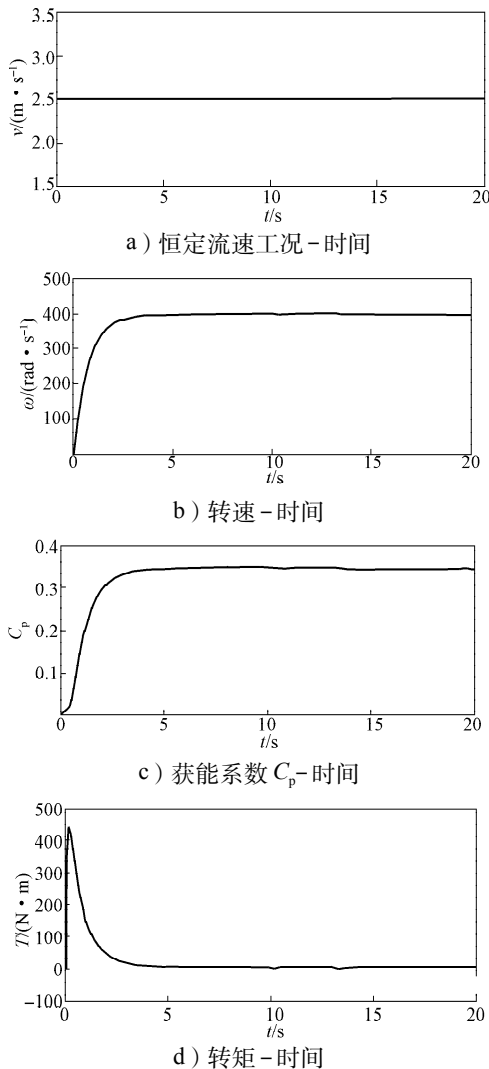


图12 恒速工况下海流能水轮机的仿真结果

Fig. 12 Simulation results under constant speed condition

由图12可得，在 $v=2.5$ m/s的固定流速工况下，系统稳定工作时，其能量吸收率约为0.35，且水轮机模型的转速和获能系数快速稳定，电机启动转矩较大，

之后会稳定在实际转矩范围。

2) 缓慢增速工况

海流运动受地球自转和月球绕地球运动的影响，在某段时间内会逐渐增大。本工况下，设定仿真时间为20 s，流速从1.5 m/s渐变到3.5 m/s，所得水轮机模拟系统的输出响应曲线如图13所示。

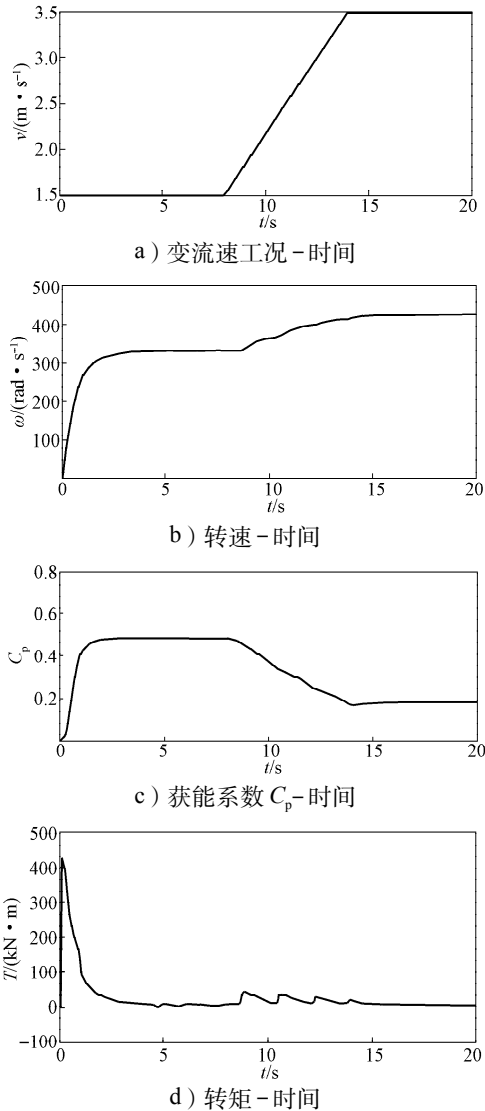


图13 变速工况下海流能水轮机的仿真结果

Fig. 13 Simulation results under variable speed condition

由图13可以得知，当海流流速发生变化时，因水轮机有惯性，其转速变化出现了0.5 s的延时；同时，转矩出现了3次波动，快速响应工况的变化；由于前8 s内，系统已经达到稳定；流速 v 再变大时，系统惯性使转速保持不变，又由式(5)可知，叶尖速比与速度 v 成反比，所以 C_p 将减少，出现如图13c所示情况。

3) 随机变化流速工况

为了模拟海风和水面高度变化引起的流速波动，可以将海流看成额定流速下叠加上一个随机波动的

流速。为了方便研究,假定在工作到第4s时,水流突变,即从2 m/s突然增加到3 m/s,仿真时间为20 s,然后分析结果,所得水轮机模拟系统的输出响应曲线如图14所示。

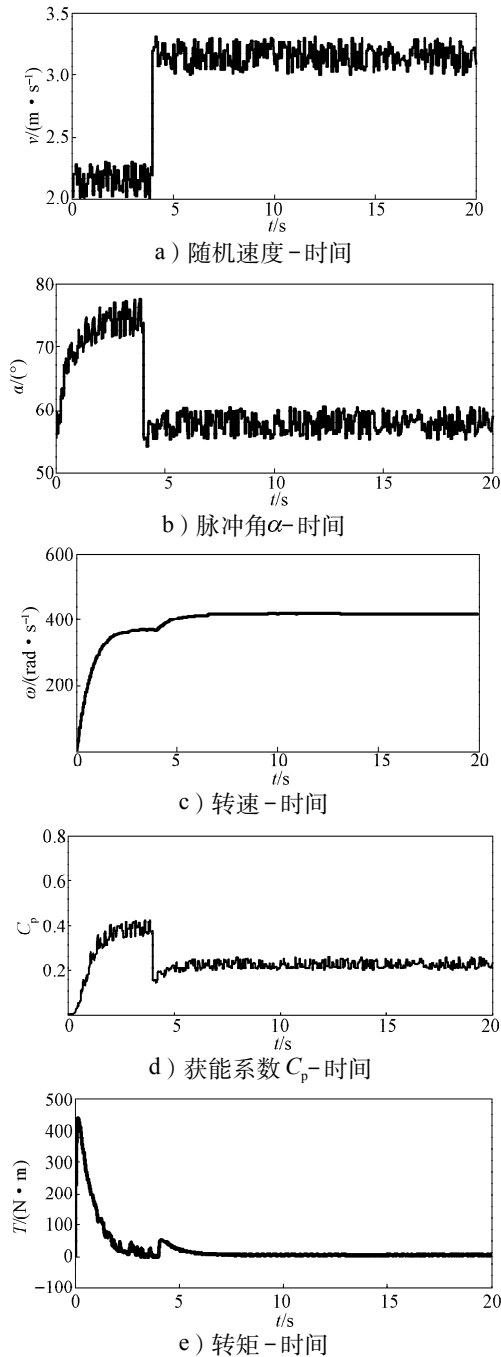


图14 随机流速下海流能水轮机的仿真结果
Fig. 14 Simulation results at random speed

海流的实际流速是在一定范围内波动的,从图14可以得知,系统的获能系数、参考转矩以及转速均呈现出一定的波动性,通过PI调节后,把波动性反映到电机电压控制角 α 上,使得测功机与水能机的特性一致。由于测功机具有惯性,流速波动时,表现在电机转速和转矩曲线上只有微小的变化,从图

形中观察,波动情况并不是很明显,这说明试验结果与实际情况相符。

以上3种工况下的仿真实验结果表明,把转矩信号转化成电流信号,通过电流闭环进行调节,可克服直接转矩控制的弱点,所设计的直流电机海流能水轮机模拟系统运行可靠,可模拟不同工况下水轮机的输出转矩和转速。

4 结语

本文在研究了水轮机数学模型的基础上,比较和分析了水轮机和直流电机特性,搭建了直流电机模拟水轮机的Simulink仿真模型,并采用电流转速双闭环控制策略,模拟水轮机工作,通过对固定流速、缓慢增速和随机流速3种不同工况下的实验,验证了所提出的转矩转速调节方案准确可行,可模拟不同工况下水轮机的输出转矩和转速。

基于直流电机的海流能发电的水轮机仿真模拟系统,可为进一步研究开发实物模拟平台提供一定的有益参考。

参考文献:

- [1] 张 萧. 海流能发电及模拟装置的研制[D]. 长春: 东北师范大学, 2009.
Zhang Xiao. Currents to Power Generation and the Development of Simulator[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2009.
- [2] 郑志南. 海洋潮流能的估算公式[J]. 哈尔滨船舶工程学院学报, 1987, 8(2): 37-44.
Zheng Zhinan. Estimating Formulae of Ocean Tidal Current Energy[J]. Journal of Harbin Shipbuilding Engineering Institute, 1987, 8(2): 37-44.
- [3] 刘宏伟. 水平轴海流能发电机械关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
Liu Hongwei. Study on the Key Technologies of Horizontal Axis Marine Current Turbine's Mechanics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [4] 冯天慜. 潮流发电模拟装置研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
Feng Tianyi. Research on the Tide Generating Simulation Device[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [5] Heier Siegtied. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems[M]. UK: John Wiley&Sons Ltd., 1998: 6.
- [6] 周渊深. 交直流调速系统与MATLAB仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 7-128.
Zhou Yuanshen. AC/DC Speed Control System and MATLAB Simulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 7-128.

(下转第95页)