

阿基米德浮子式波浪发电系统的无源控制

谢泽坤, 杨金明[†], 黄伟, 姜元, 黄秀秀

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对波浪随机性变化的特性, 本文提出了一种基于无源性理论的波浪发电最大功率捕获控制方法. 首先提出了阿基米德浮子式(AWS)波浪发电系统的欧拉-拉格朗日(E-L)模型, 其包含了系统的机械部分和电气部分, 之后充分利用波浪发电系统的结构性特点, 设计与系统动力学特性相匹配的控制器, 通过注入阻尼和调整系统能量分配的措施, 改变了系统有功和无功的分布, 使得系统获得良好的快速响应能力, 实现了任意波浪力输入下的波浪发电最大功率捕获控制, 并具有良好的动态特性. 最后通过可控整流桥实现控制, 控制方法易于实现.

关键词: 阿基米德浮子; 波浪发电; 直线电机; 欧拉-拉格朗日模型; 无源控制

引用格式: 谢泽坤, 杨金明, 黄伟, 等. 阿基米德浮子式波浪发电系统的无源控制. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 383 – 388

DOI: 10.7641/CTA.2019.80849

Passive control of Archimedes wave swing wave power generation system

XIE Ze-kun, YANG Jin-ming[†], HUANG Wei, JIANG Yuan, HUANG Xiu-xiu

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: A method of maximum power capture control for wave power generation based on passive theory is proposed, aiming at the characteristics of wave random variation. Firstly, a Euler-Lagrange (E-L) model of the Archimedes wave swing (AWS) wave power generation system is proposed, which includes the mechanical model and electric model of the system. Then, the structural characteristics of the wave power system are fully utilized to design a controller that matches the dynamic characteristics of the system. By injecting damping and adjusting the energy distribution of the system, the distribution of active and reactive power of the system is changed, so that the system can obtain the good ability of rapid response. Thus, the maximum power acquisition control of wave power generation under arbitrary wave force input is realized and has good dynamic characteristics. Finally, the controllable rectifier bridge is used to realize the control, and the control method is easy to realize.

Key words: Archimedes wave swing; wave power; linear motor; Euler-Lagrange model; passive control

Citation: XIE Zekun, YANG Jinming, HUANG Wei, et al. Passive control of Archimedes wave swing wave power generation system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(3): 383 – 388

1 引言

波浪能是一种蕴含丰富的可再生能源, 全球可利用的波浪能达到2TW^[1]. 目前已有多种波浪能发电装置^[2-5], 如振荡水柱式、阿基米德浮子式(Archimedes wave swing, AWS)、Pelamis式、Wave Dragon式、鸭式及鹰式等. 其中AWS是第1种采取了直驱式发电的装置, 波动力通过浮子直接驱动直线永磁发电机(linear permanent-magnet generator, LPMG)发电, 具有效率高、结构简单、抗风能力强等特点^[6]. 已有一些关于波浪发电控制的研究成果^[7-11], 如PI控制和模糊控

制等方法都已用于最大波浪能的捕获控制中. 波浪能是一种复杂变化的能量形式, 波浪发电中的控制方法应在快速收敛性和鲁棒性方面有更高要求, 现有控制方法缺乏对系统结构特性的利用. 基于无源理论的控制方法本质上是一种能量控制, 即按系统的控制要求, 确定系统能量分布, 以获得最佳的控制效果. 无源控制有良好的物理解释和全局收敛特性, 自Ortega于1989年提出后, 引起了控制领域的广泛重视, 国内外学者已将无源控制成功地应用到电机^[12-13]、换流器^[14]和多端直流输电^[15]等的控制中. 波浪发电本质

收稿日期: 2018-11-01; 录用日期: 2019-03-11.

[†]通信作者. E-mail: jmyang@scut.edu.cn; Tel.: +86 13168360989.

本文责任编辑: 张承慧.

广东省部产学研合作项目(2013B090500089)资助.

Supported by the Industry-University-Research Cooperation Project of Guangdong Province (2013B090500089).

上也是能量传递和分布过程,与无源控制方法的机理有很好的契合.本文在欧拉-拉格朗日(Euler-Lagrange, E-L)模型分析基础上,利用波浪发电系统的结构特性,通过阻尼注入方法,设计了AWS系统的无源控制器,以改善AWS系统的动静态性能,使装置能很好的实现波浪能的最大功率追踪控制.

2 AWS波浪发电系统E-L模型

2.1 机械模型

AWS系统的结构如图1所示^[6],AWS通过缆绳与海床相连接,端盖1随波浪上下运动,端盖2固定,两个端盖中间充满空气.当波峰经过时,端盖1向下运动并挤压空气.波谷时,气压推动端盖1向上运动.LPMG的定子固定在端盖2中,端盖1的下端与LPMG的动子端进行刚性连接.

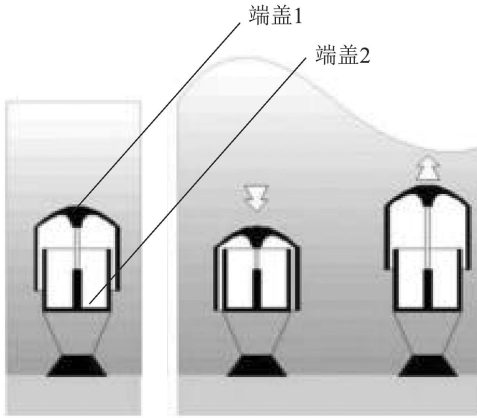


图1 AWS结构图

Fig. 1 Structure of AWS

波浪作用在AWS系统端盖1上的波浪力 F 为装置的输入,AWS系统的动力学模型为

$$m\ddot{x} + c_1\dot{x} + kx = F - F_e, \quad (1)$$

式中: x 为端盖1的位移; m 为所有运动部件的质量以及浮子在海浪中运动附加质量的总和; c_1 为等效的海水阻尼系数; F_e 为发电机的反电磁力,LPMG的反电磁力与端盖1的运动速度成正比, $F_e = c_2\dot{x}$; k 为海水的等效弹性系数.

2.2 电气模型

当LPMG动子往下运动时,定子端输出电压相序为ABC,而当动子往上运动时,定子端输出电压相序为CBA.即动子运动方向的变化会导致LPMG输出电压的相序发生改变,三相电压的电角度超前和滞后也会发生相应的变化,同时定子端感应电压和相应的电流也都会发生反向,所以三相坐标下难以建立统一模型,为了便于控制,建立 dq 参考坐标系下统一格式的

定子端电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_s \dot{i}_d - |\omega_g| L_s i_q, \\ u_q = R_s i_q + L_s \dot{i}_q - |\omega_g| L_s i_d + \omega_g \Psi_{PM}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d, u_q 分别为定子 d, q 轴电压; i_d, i_q 分别为定子 d, q 轴电流; R_s, L_s 分别为定子电阻和电感; ω_g 为发电机电角速度($\omega_g = \frac{2\pi v}{\tau}$,其中: v 为动子的运动速度, τ 为LPMG的极距); Ψ_{PM} 为永磁体的磁链.

2.3 AWS系统E-L模型

由式(1)和式(2),将系统模型写成E-L的形式:

$$M\dot{X} + JX + RX = u, \quad (3)$$

式中:

$$M = \begin{pmatrix} L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k \end{pmatrix}$$

为正定的对角阵;

$$J = \begin{pmatrix} 0 & -|\omega_g|L_s & 0 & 0 \\ |\omega_g|L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k \\ 0 & 0 & -k & 0 \end{pmatrix}$$

为反对称阵,反映了系统内部的互联结构;

$$R = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

为对称正定矩阵,反映了系统的耗散特性; $u = [u_d \ u_q - \omega_g \Psi_{PM} \ F - F_e \ 0]^T$ 反映了系统与外部能量交换; $X = [i_d \ i_q \ \dot{x} \ x]^T$ 为系统的状态变量.

3 AWS系统的无源控制系统设计

根据无源性的定义^[14],可以证明系统(3)是严格无源的.

定义状态误差向量:

$$X_e = X - X^* = [i_d - i_d^* \ i_q - i_q^* \ \dot{x} - \dot{x}^* \ x - x^*]^T,$$

其中 $i_d^*, i_q^*, \dot{x}^*, x^*$ 为状态参考量.代入式(3)得到误差状态模型

$$M\dot{X}_e + RX_e + JX_e = u - (M\dot{X}^* + JX^* + RX^*). \quad (4)$$

取误差系统能量函数:

$$H_e(X_e) = \frac{1}{2} X_e^T M X_e. \quad (5)$$

对式(5)沿轨迹(4)求时间导数, 得

$$\begin{aligned} \dot{H}_e(X_e) = & \\ & -X_e^T R X_e + X_e^T (u - M\dot{X}^* - JX - RX^*). \end{aligned} \quad (6)$$

分析式(6)可知, 因为矩阵 R 主对角线有缺项, 当设计控制律使得括号内项非正定时, 并不能保证误差向量 x_{e4} 收敛到零, 故无法保证 $\dot{H}_e(X_e)$ 严格负定. 虽然因为矩阵 J 的反对称性, 矩阵所对应项的动态不影响系统稳定性, 但其关系到系统的能量分配, 从而影响状态的收敛. 本文通过注入阻尼和能量再分配的方法, 来实现对参考状态的跟踪.

将式(4)进行恒等变换:

$$\begin{aligned} M\dot{X}_e + R X_e + R_a X_e + J X_e + J_a X_e = & \\ u - (M\dot{X}^* + J X + R X^* - R_a X_e - J_a X_e), \end{aligned} \quad (7)$$

式中:

$$R_a = \begin{bmatrix} \xi_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \xi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \xi_4 \end{bmatrix}$$

为注入阻尼项($\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ 为注入阻尼系数);

$$J_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \xi_5 \\ 0 & 0 & -\xi_5 & 0 \end{bmatrix},$$

其中 ξ_5 为能量分配调节系数, 在控制项中引入 $J_a X_e$ 是为了实现状态 x_{e4} 收敛控制.

沿轨迹(7)求 $H_e(X_e)$ 的时间导数:

$$\begin{aligned} \dot{H}_e(X_e) = & \\ & -X_e^T (R_a + R) X_e + X_e^T (u - M\dot{X}^* - \\ & J X - R X^* + R_a X_e + J_a X_e). \end{aligned} \quad (8)$$

分析式(8)可知, 矩阵 $(R_a + R)$ 主对角线无缺项, 在设计控制律为式(9)时, 可保证 $\dot{H}_e(X_e)$ 严格负定, 各误差状态指数均收敛到零.

取控制律为

$$u = M\dot{X}^* + J X + R X^* - R_a X_e - J_a X_e. \quad (9)$$

将式(9)展开, 可得各分项控制律:

$$\begin{cases} u_d = L_s \dot{i}_d^* - |\omega_g| L_s i_q + R_s i_d^* - \xi_1 (i_d - i_d^*), \\ u_q = L_s \dot{i}_q^* + |\omega_g| L_s i_d + R_s i_q^* + \\ \quad \omega_g \Psi_{PM} - \xi_2 (i_q - i_q^*), \\ F_e = F - [m\ddot{x}^* + kx + c_1 \dot{x}^* - \\ \quad \xi_3 (\dot{x} - \dot{x}^*) - \xi_5 (x - x^*)]. \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知, $J_a X_e$ 的引入对应于 F_e 控制项中增加了位置误差反馈.

4 系统状态量参考值的计算

以实现波浪能的最大功率捕获和直线电机的损耗最小来确定参考状态, 假设波浪力为简谐波形式($F = F_0 \sin(\omega t + \theta_0)$, F_0 为波浪力幅值, ω 为波浪力频率, θ_0 为相位角), 可得获取最大能量的条件为^[16]

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + (\omega m - \frac{k}{\omega})^2}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(1), 可以得到AWS装置的速度和位移的参考值为

$$\begin{cases} \dot{x}^* = A \cdot e^{-(\omega t + \theta_0 + \theta_1)}, \\ x^* = \frac{A}{\omega} \cdot e^{-(\omega t + \theta_0 + \theta_1 - \frac{\pi}{2})}, \\ F_e^* = c_2 \dot{x}^*, \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$A = \left| \frac{F_0}{c_1 + c_2 + i(\omega m - \frac{k}{\omega})} \right|,$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{\omega m - \frac{k}{\omega}}{c_1 + c_2}\right).$$

对于LPMG电机, 本文采取了 $i_d = 0$ 的矢量控制策略^[16], 励磁电流分量和电磁力电流分量实现解耦控制, 定子电流全部用来产生电磁力, 可得 d, q 轴参考电流为

$$\begin{cases} i_d^* = 0, \\ i_q^* = \frac{2\tau}{3\pi \Psi_{PM}} F_e^*. \end{cases} \quad (13)$$

5 仿真实验与分析

5.1 系统结构

在MATLAB/Simulink中搭建了如图2所示的AWS系统仿真模型, 主要由4部分组成: 波浪模型、机械运动模型、主电路模型、控制电路模型.

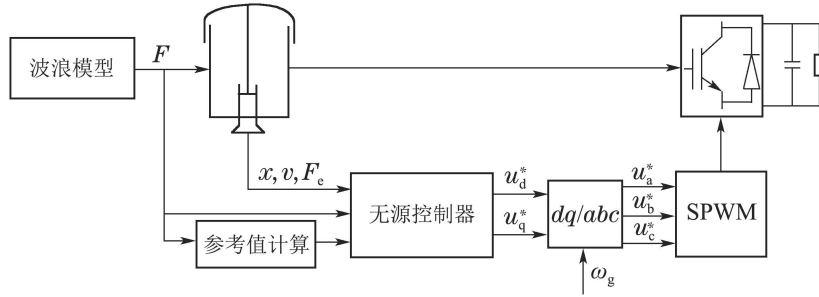


图2 AWS系统控制结构示意图

Fig. 2 Control block diagram of AWS system

根据式(12)和式(13)计算参考值, 参考值与实际值通过无源控制器得到 u_d^* 与 u_q^* , 经dq/abc转换后, 将得到 u_a^* , u_b^* , u_c^* , 通过SPWM, 控制可控整流桥, 完成无源控制. 仿真参数如表1所示.

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	符号	参数值
质量	m	0.6 Mkg
海水阻尼系数	c_1	$1.42 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
等效弹性系数	k	0.56 MN/m
电机定子电感	L_s	42 mH
电机定子电阻	R_s	0.27 Ω
电机磁链	Ψ_{PM}	23 Wb
极距	τ	0.1 m

5.2 仿真分析

系统总仿真时长为50 s, 以不规则波浪力为仿真工作状态, 依据实际海况数据^[17]设计出不规则波浪力(见图3). 根据二阶系统设计经验, 系统阻尼比取0.707, 算得控制器系数为 $\xi_3 = -600000$, $\xi_1 = 8000$, $\xi_2 = 8000$, $\xi_4 = 0$, 较大的系数值对应于系统较大的结构系数.

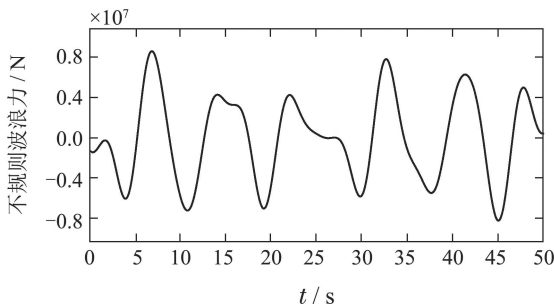


图3 不规则波浪力

Fig. 3 Irregular wave force

控制结果见图4-6, 分别表示d轴电流、q轴电流和电机反电磁力 F_e . 可以看出, 电流和电机反电磁力都能跟踪上参考信号.

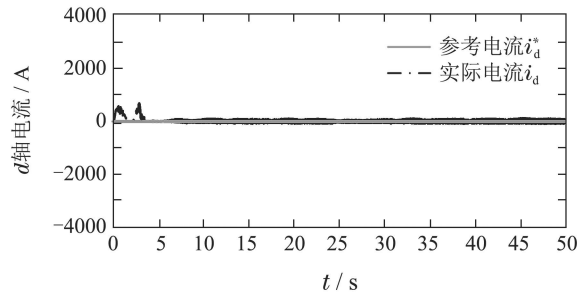


图4 d轴定子电流

Fig. 4 Stator current of d axis

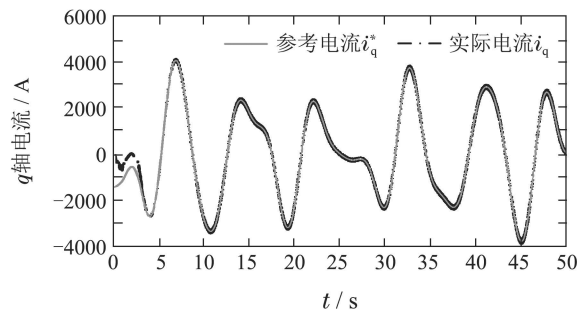


图5 q轴定子电流

Fig. 5 Stator current of q axis

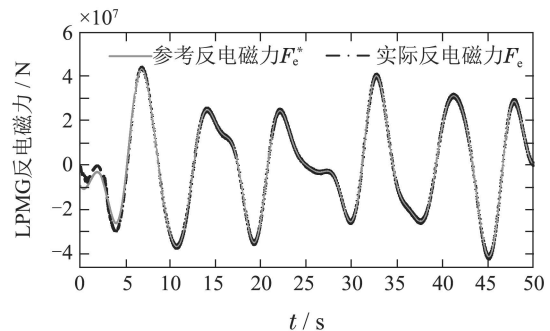


图6 LPMG电机反电磁力

Fig. 6 Electromagnetic of LPMG motor

为了验证能量分配设置对位置跟踪的效果, 对互联矩阵 $J_a X_e$ 设计了对比仿真. 图7为未设置 $J_a X_e$ 项时的位移跟踪情况, 图8为设置了 $J_a X_e$ 项的结果(能量分配调节系数 $\xi_5 = 800000$), 可以看出互联矩阵 $J_a X_e$ 项有较好的消除位置误差的效果. 图9为速度跟踪过程, 图10为LPMG电机的输出功率图.

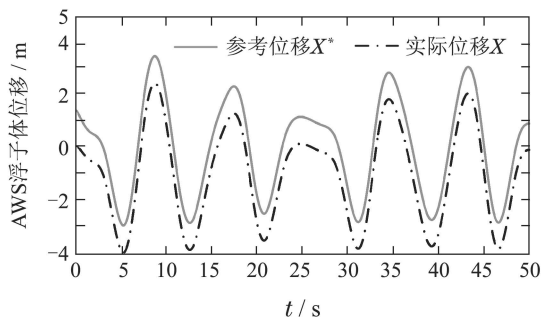


图7 未设置互联矩阵的AWS浮子体位移

Fig. 7 AWS float position shift without injection of interconnection matrix

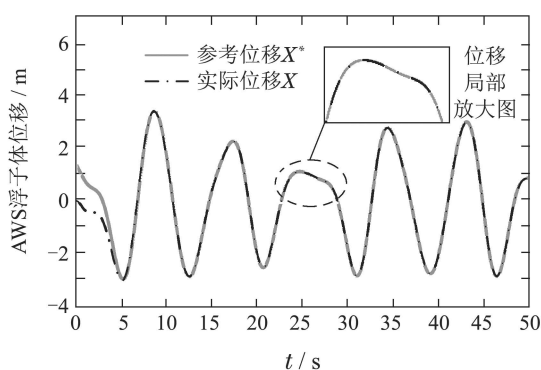


图8 注入互联矩阵后的AWS浮子体位移

Fig. 8 AWS float position shift after injection of interconnection matrix

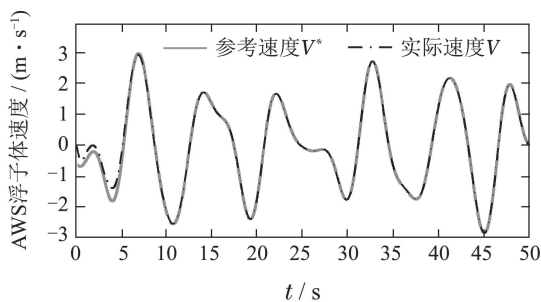


图9 注入互联矩阵后的AWS浮子体速度

Fig. 9 Speed of the AWS float after injection of the interconnection matrix

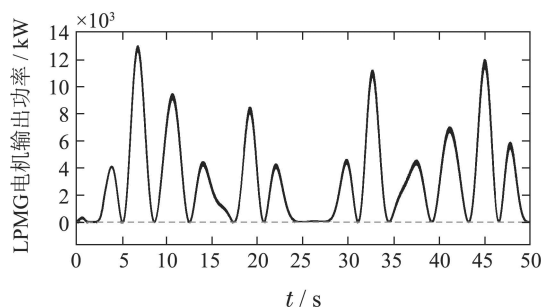


图10 LPMG电机输出功率

Fig. 10 Output power of LPMG motor

6 结论

本文针对AWS波浪发电系统提出了一种基于无源理论的最大波浪能捕获控制方法, 利用系统的动力结构特性, 通过注入阻尼和调节系统能量分布的方法, 实现了任意波输入下的波浪发电最大功率跟踪控制, 仿真结果验证了该方法的有效性, 说明了与被控对象特性结合的控制设计方法能够很好地实现控制目标。

参考文献:

- [1] JING H, MAKI N, IDA T, et al. Electromechanical design of a MW class wave energy converter with a HTS tubular linear generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(4): 1 – 4.
- [2] SJOKVIST L, KRISHNA R, RAHM M, et al. On the optimization of point absorber buoys. *Journal of Marine Science & Engineering*, 2014, 2(2): 477 – 492.
- [3] XIE Dian, GU Yujiong, YU Zhiwen, et al. Performance analysis and comprehensive evaluation of wave energy power generation devices. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(8): 113 – 120. (谢典, 顾煜炯, 余志文, 等. 波浪能发电装置的性能分析及综合评价. *水力发电学报*, 2017, 36(8): 113 – 120.)
- [4] WU F, JU P, ZHANG X P. Modeling, control strategy, and power conditioning for direct-drive wave energy conversion to operate with power grid. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(4): 925 – 941.
- [5] CHAI Hui, LIU Ye, ZHANG Jiming, et al. Study on simulation model of pendulum wave power device for ocean monitoring buoy. *Renewable Energy Resources*, 2018, 36(9): 1398 – 1403. (柴辉, 刘野, 张继明, 等. 基于海洋资料浮标的单摆式波浪能发电装置仿真模型研究. *可再生能源*, 2018, 36(9): 1398 – 1403.)
- [6] WU F, ZHANG X P, JU P, et al. Modeling and control of AWS-based wave energy conversion system integrated into power grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(3): 1196 – 1204.
- [7] QIN Chuan, GUAN Weiya, JU Ping, et al. Equivalent modeling of AWS-based wave farm. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(11): 25 – 31. (秦川, 管维亚, 鞠平, 等. 并网AWS波浪发电场等效建模. *电力自动化设备*, 2015, 35(11): 25 – 31.)
- [8] FARROK O, ISLAM M R, SHEIKH M R I. Fuzzy logic based an improved controller for wave energy conversion systems. *2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2015.
- [9] OZKOP E, ALTAS I H, SHARAF A M. A novel fuzzy logic tan-sigmoid controller for wave energy converter-grid interface DC energy utilization farm. *2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. St. John's, NL, Canada: IEEE, 2009: 1184 – 1187.
- [10] ZHENG Mingyue, YANG Jinming, LIN Kaidong, et al. The maximum power tracking control based on the double degrees of freedom wave power system. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(5): 778 – 783. (郑明月, 杨金明, 林凯东, 等. 双自由度波浪发电系统的最大功率跟踪控制. *可再生能源*, 2017, 35(5): 778 – 783.)
- [11] HAZRA S, SHRIVASTAV A S, GUJARATI A, et al. Dynamic emulation of oscillating wave energy converter. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 1860 – 1865.
- [12] WU Chun, QI Rong, GAO Feng. Passivity-based control of permanent-magnet synchronous motor based on extended PCHD.

- Control and Decision*, 2014, 29(5): 895 – 900.
(吴春, 齐蓉, 高峰. 基于扩张PCHD模型的永磁同步电机无源控制. 控制与决策, 2014, 29(5): 895 – 900.)
- [13] CHEN Hua, CHENG Zhiping, ZHI Changyi, et al. Permanent magnet synchronous linear motor passive control based on port-controlled Hamiltonian method. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(15): 1 – 7, 33.
(陈华, 程志平, 支长义, 等. 基于端口受控哈密顿方法的永磁同步直线电机无源控制. 电测与仪表, 2015, 52(15): 1 – 7, 33.)
- [14] CAI Xinhong, ZHAO Chengyong. Euler-Lagrange model based passive control for modular multilevel converter. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(10): 224 – 232.
(蔡新红, 赵成勇. 基于欧拉-拉格朗日模型的模块化多电平换流器的无源控制. 电工技术学报, 2013, 28(10): 224 – 232.)
- [15] YANG Bo, HUANG Linni, ZHANG Xiaoshun, et al. Adaptive passive control for multi-terminal high voltage direct current systems. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(5): 637 – 647.
(杨博, 黄琳妮, 张孝顺, 等. 多端高压直流输电系统自适应无源控制. 控制理论与应用, 2017, 34(5): 637 – 647.)
- [16] KANG Qing, XIAO Xi, NIE Zanxiang, et al. An optimal control strategy for output power of the directly driven wave power generation system. *Automation of Electric Power System*, 2013, 37(3): 24 – 29.
(康庆, 肖曦, 聂赞相, 等. 直驱型海浪发电系统输出功率优化控制策略. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 24 – 29.)
- [17] GUO B, PATTON R, JIN S, et al. Non-linear modelling and verification of a heaving point absorber for wave energy conversion. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 9(1): 453 – 461.

作者简介:

谢泽坤 硕士研究生, 从事可再生能源系统控制技术研究, E-mail: 394091372@qq.com;

杨金明 教授, 博士, 主要从事能源与动力系统中电力电子及其控制技术研究, E-mail: jmyang@scut.edu.cn;

黄伟 硕士研究生, 从事可再生能源系统控制技术研究, E-mail: 1419116413@qq.com;

姜元 硕士研究生, 从事可再生能源系统控制技术研究, E-mail: 2368956487@qq.com;

黄秀秀 硕士研究生, 从事可再生能源系统控制技术研究, E-mail: 673391253@qq.com.