

双自由度波浪发电系统的最大功率跟踪控制

郑明月¹, 杨金明¹, 林凯东¹, 黄秀秀¹, 段鹏翔²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广州翔曦能源科技有限公司, 广东 广州 510660)

摘 要: 文章提出了一种全封闭双自由度的振荡浮子波浪发电系统。在分析其动力学特性基础上, 采用一种变负载的最大功率点跟踪(MPPT)方法, 实现了系统在波浪变频率条件下的最大发电控制; 通过爬山法寻找到最优负载阻值, 得到参考电流; 通过控制开关管的导通与关断进行电流控制, 使电机电流跟随给定电流值、电机输出平均功率达到最大值, 实现系统的最大功率跟踪。仿真结果表明, 该方法能够跟随波浪频率变化自适应调节等效负载, 实现电机的最大功率输出。

关键词: 波浪发电; 变负载; MPPT; 爬山法

中图分类号: TK79; TM612 文献标志码: A 文章编号: 1671-5292(2017)05-0778-06

DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2017.05.023

0 引言

随着化石矿物能源的日益枯竭和生态环境的日益破坏, 可再生能源日益得到青睐。海洋中蕴含着巨大的波浪能, 合理地开发和利用海洋波浪能已成为研究人员关注的焦点。从 20 世纪 80 年代, 国内外的学者都已经开始了对波浪能转换装置的研究, 并取得了一系列的研究成果^[1]。

目前波浪能研究方向主要有两种: 一是改变浮子的物理形状、质量等, 根据流体力学使浮子的机械结构与波浪特性相匹配, 最大化地从波浪中提取能量, 该方法会大大改善能量的提取状况, 但是操作缓慢且较复杂^{[2],[3]}; 二是改变浮子受到的阻尼力情况, 包括中间转换装置给浮子的阻尼力或者电机的反作用电磁力, 该方法在浮子结构固定的情况下, 最大化地实现波浪能的电能转换, 有利于实施智能控制, 且易于实现^[4]。

文献[5]浮子结构通过改变 BUCK 电路的占空比, 来改变整个系统的负载阻值, 但是由于不可控整流桥的存在使发电机输出电流谐波含量很大, 不利于电网安全和用电设备的使用。文献[6]利用可控整流桥, 改变开关的导通占空比实现发电机每相负载的改变, 即对电机的每相负载都进行控制, 但由于采用降压控制, 使得最后负载功率并不是很高。文献[7]在 DC 端加直流电压, 通过控制每相的可控开关模拟每相的负载, 使发电

机相电流和相电压同相位, 该方法电压和电流中谐波含量较少, 但是却无法在变化的海洋波浪中实现最优控制。

本文针对一种全封闭结构的振荡浮子式波浪发电系统, 提出了一种自适应调节负载的最大功率点跟踪方法。

1 波浪能转换器

本文研究的波浪发电装置, 由浮子体、弹簧、质量块、直线发电机等组成, 其结构如图 1 所示。

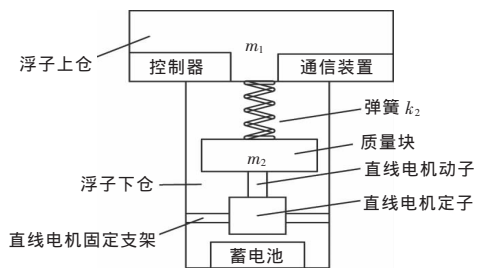


图 1 振荡浮子式波浪发电结构图

Fig.1 Schematic of the structure of the oscillating buoy wave energy converter

浮子体在波浪力作用下做起伏运动, 弹簧和质量块组成的振动装置由于惯性力的作用, 使质量块产生对浮子体的相对运动, 质量块与直线发电机定子相连, 从而驱动发电机发电。整个浮子采用密封的形式与海水隔离, 通过系在浮子上的锚绳与海底相连, 这样可以避免海水对内部装置的腐蚀, 延长使用寿命。

收稿日期: 2016-11-18。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177050); 广东省产学研合作项目(2013B090500089)。

通讯作者: 杨金明(1962-), 男, 教授, 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

1.1 转换装置的数学模型

在海洋波浪中,振荡浮子发电系统的动力学特性等效为一个二自由度的弹簧-质量块振荡系统,其动力学模型如图2所示。

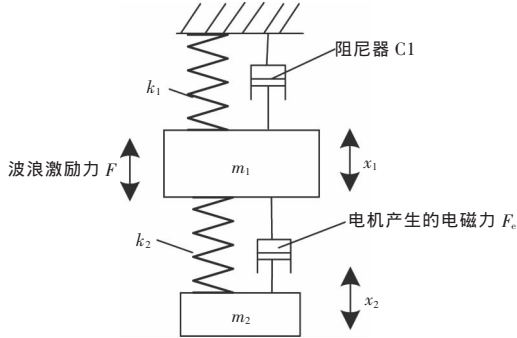


图2 振荡浮子发电系统的动力学模型

Fig.2 Dynamic model of the oscillating buoy wave energy converter

图中 m_1 为浮子体质量; m_2 为质量块质量; k_1 为等效海洋弹性系数,与浮子有效横截面积有关; k_2 为弹簧刚度; x_1 和 x_2 分别为浮子体和质量块的绝对位移。

电机电磁力可等效为^{[5]-[8]}

$$F_e = c_2(x_2 - x_1) \quad (1)$$

式中: c_2 为等效电机阻尼系数。

由式(1)建立振荡浮子发电系统的数学模型为

$$\begin{cases} (m_1 + a)\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = F \\ m_1\ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 为因海洋辐射波产生的附加质量; c_1 为辐射波产生阻尼力的阻尼系数; F 为波浪激励力,其表达式为 $F = F_0 \sin(\omega t)$; ω 为波浪频率。

假设浮子体运动的幅值和周期与波浪保持一致,则浮子的运动位移可表示为

$$x_1 = X \sin(\omega t) \quad (3)$$

设 $y = x_1 - x_2$, 则式(2)可写为

$$m_2\ddot{y} + c_2\dot{y} + k_2y = m_2\omega^2 X \sin(\omega t) \quad (4)$$

式(4)的解为

$$y = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (5)$$

式中: $A = \frac{m_2\omega^2 X m}{\sqrt{(k - m_2\omega^2)^2 + (c_2\omega)^2}}$;

$$\varphi = \arctan \frac{c_2\omega}{k - m_2\omega^2}。$$

发电机发出的平均功率为

$$P = \frac{1}{2} c_2 \left| \dot{y} \right|^2 = \frac{1}{2} c_2 \frac{\omega^4 m_2^2 X^2}{(k - m_2\omega^2)^2 + (c_2\omega)^2} \quad (6)$$

在波浪幅值不变时, P 与 ω, c_2 的关系如图3所示。波浪频率 ω 越高,发电功率 P 越大,对于每一个 ω ,在有功率输出情况下,存在一个对应的阻尼系数 c_2 ,使发电功率 P 最大。

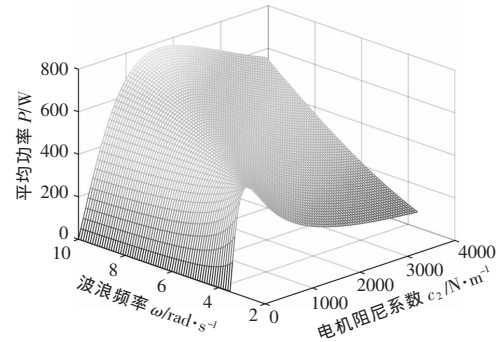


图3 直线发电机的功率输出曲线

Fig.3 curves of the power output of the linear generator

1.2 永磁同步直线发电机的数学模型

永磁同步直线发电机的 d-q 数学模型为

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q + R_s i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d + R_s i_q \end{cases} \quad (7)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (8)$$

发电机电磁力为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (9)$$

电磁功率为

$$P = \frac{3}{2} \omega_e (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (10)$$

直线电机的电角速度为

$$\omega_e = \frac{\pi v}{\tau} \quad (11)$$

直线电机动子的运动位移为

$$x = vt \quad (12)$$

空间矢量角 θ 可以下式求得

$$\theta = \frac{\pi x}{\tau} = \omega_e t \quad (13)$$

式中: ψ_d 和 ψ_q 分别为 d 轴和 q 轴的磁链; L_d 和 L_q 分别为 d 轴和 q 轴的等效电感; v 为直线电

机转子的运动速度; R_s 为定子电阻; i_d 和 i_q 分别为电流的 d 轴和 q 轴分量; ψ_f 为永磁同步发电机的转子磁链; n_p 为直线电机极对数; τ 为电机极距。

2 最大功率点跟踪(MPPT)控制

由式(1)可知,改变电磁力 F_e 可以等效调节 c_2 ,以实现波浪发电的最大功率跟踪。又由式(9),

F_e 可以通过调节电流来实现。

由文献[8]可知,当电机的三相负载为电阻时,电机的阻尼系数 c_2 与电机的负载电阻 R_l 存在一一对应关系。结合前面分析可知,每个频率对于一个相应的负载电阻值(最优阻值,单位为 Ω),使 P 取得最大值。

本文的控制框图如图 4 所示。

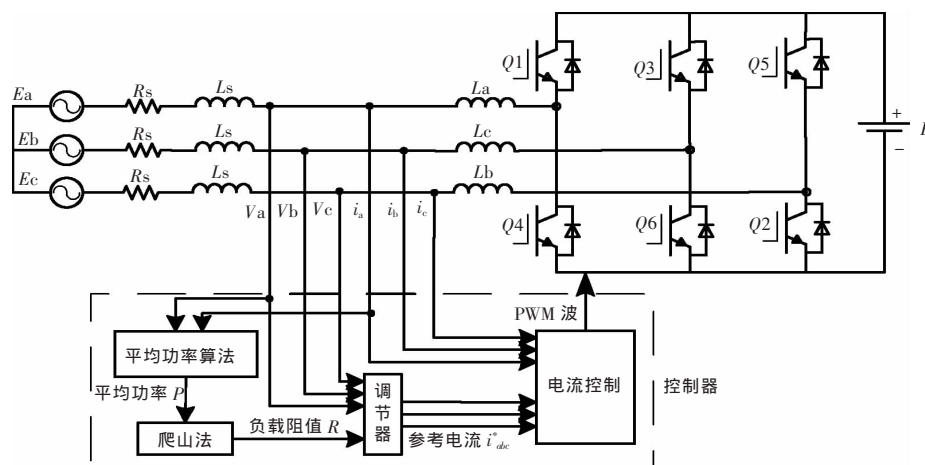


图 4 控制系统原理图

Fig.4 Principle diagram of control system

图 4 中, E_{abc} , R_s , L_s 为对直线发电机的简化模拟,由发电机侧测得电机的三相电流 i_a , i_b , i_c 和三相电压 u_a , u_b , u_c , 经过平均功率算法公式得到单相平均功率 P , 根据对电机平均功率的采样分析结果,通过爬山法对负载电阻 R_l 进行调节,并结合电机实际端电压得到参考电流 i_{abc}^* ,进行电流控制^[9]后得到相应的 PWM 波,该 PWM 波控制开关管 $Q_1 \sim Q_6$ 的导通与关闭,改变每相的负载阻值,使发电机输出的相电压与相电流同相位。交流侧电路主要由直线发电机、电感 L_{abc} 和开关管 $Q_1 \sim Q_6$ 组成,直流侧电路由直流电压源 E 组成。电感 L_{abc} 能够过滤交流侧电压的高次谐波,其值应在不造成交流侧电流波形畸变的条件下进行选取。为了便于对交流侧进行升压整流控制,直流侧的直流电压源应大于交流侧的线电压的峰-峰值。

电流控制的原理如图 5 所示(以 A 相为例),根据爬山法和调节器生成的参考电流 i_a^* ,参考电流与实际电流的差值通过 PI 控制器与锯齿波进行比较,产生相应的 PWM 波,控制 Q_1 与 Q_4 的导通与关断^{[9][11]}。

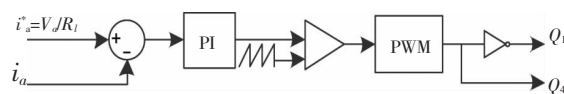


图 5 电流控制原理图

Fig.5 Principle diagram of the current control

因为电机的输出功率与负载阻值存在一一对应关系,最优阻值通过爬山法取得^{[12],[13]},其寻优表达式为

$$R_l(k) = R_l(k-1) + SP \times CS \quad (11)$$

式中: SP 为功率变化符号; CS 为电阻调节步长。

比较功率变化 $\Delta P = P(k) - P(k-1)$,如果 ΔP 为正,表明功率在增加,则 SP 保持不变;如果 ΔP 为负,表明目前负载的变化阻碍了功率增大,功率符号 SP 需要取反。电阻寻优的流程如图 6 所示。

本文系统负载初值设置为 5,功率符号 SP 为 1。为了减少爬坡时间和在功率最高点附近电阻寻优过程的抖动幅值,本文算法采用两种步长进行调节:当功率变化绝对值大于 8 W 时,步长 CS 为 1,进行较大的负载调节,使其缩短爬山时间,尽快接近最大值点;当功率变化绝对值小于

8 W 时,步长 CS 为 0.2,进行较小的负载调节,使其缓慢接近最高点,不至于跨过最高点,影响算法的准确性。

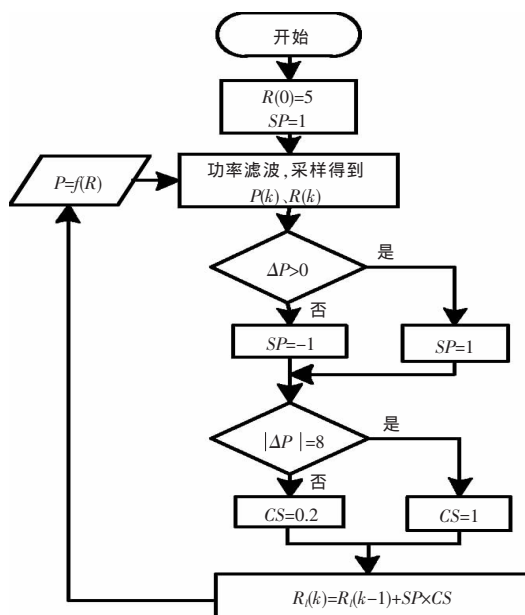


图 6 程序流程图

Fig.6 Program flow chart

3 仿真结果

利用 Matlab/Simulink 软件对整个系统进行仿真验证,其仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

参数	符号	数值	单位
浮子质量	m_1	1 000	kg
浮子半径	r	0.8	m
质量块质量	m_2	500	kg
附加阻尼	c_1	0.6	kNs/m
附加质量	a	200	kg
弹簧系数	k	8	kN/m
电机磁链	ψ_f	0.147	Wb
电机极对数	n_p	8	对
电机级距	τ	0.05	cm
电机定子电阻	R_s	0.1	Ω
电机定子电感	L_s	8.2	mH
滤波电感	L	0.1	H

初始波浪力幅值为 3 000 N,周期 T 为 8 s,在 120 s 时,周期 T 为 4 s。浮子的运动波形如图 7 所示。电机的三相电压与三相电流波形分别如图 8,9 所示,随着负载阻值的调节,三相电压与三相电流在不同波浪周期下分别逐渐趋于稳定,说明了仿真算法的可靠性和稳定性。

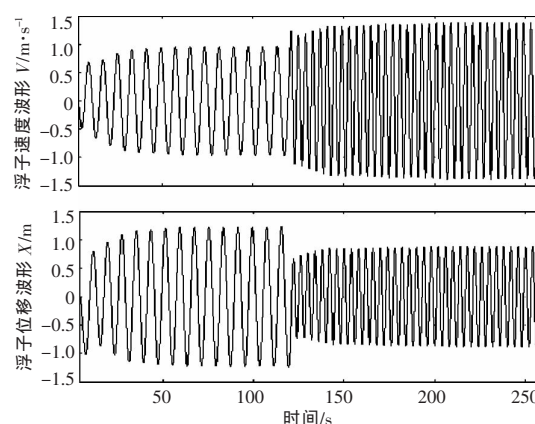


图 7 浮子速度与位移波形

Fig.7 The velocity and displacement waveforms of float

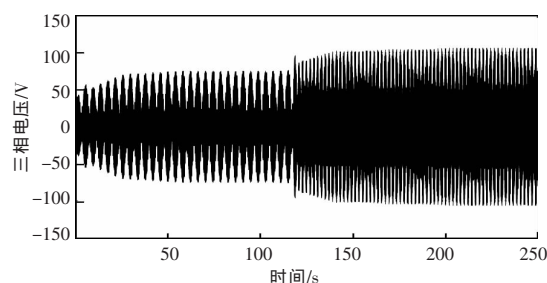


图 8 三相电压波形

Fig.8 Three phase voltage waveform

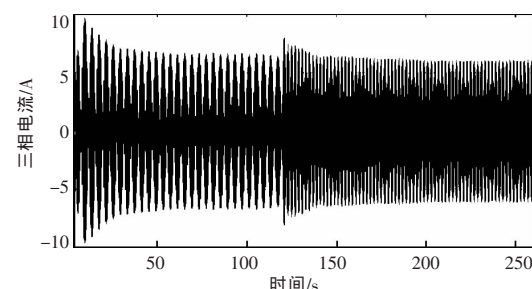


图 9 三相电流波形

Fig.9 Three phase current waveform

以 A 相为例,电机输出功率与平均功率的波形如图 10 所示。

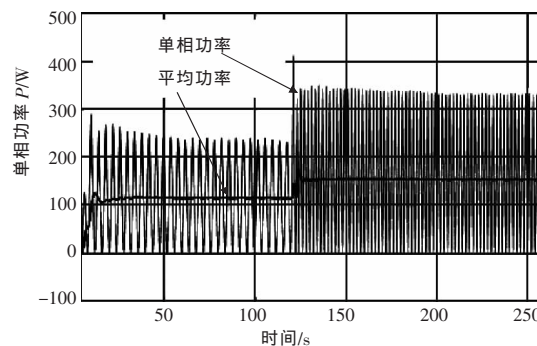


图 10 单相功率与平均功率的波形

Fig.10 Waveform of single phase power and average power

平均功率的采样周期至少为波浪周期的 0.5 倍,采样周期小时,将导致采样值变化幅度较大,负载阻值变化也较大且难以稳定,降低爬山寻优的准确度;但是采样周期大时,将不能准确捕捉到电机输出功率的变化,因此采样周期的确定将影响控制系统的准确性与快速性。

模拟负载 R_l 的变化如图 11 所示,其相应的电机电磁力 F_e 的变化如图 12 所示。当波浪周期为 8 s 时,随着负载阻值的自适应调节,因初始值设定的较低,系统经过 75 s 左右达到最优阻值 11,此后以步长 0.2 进行小幅度调节。在 120 s 波浪周期改变后,又再次开启寻优过程,则可较快地寻优到 17 左右。

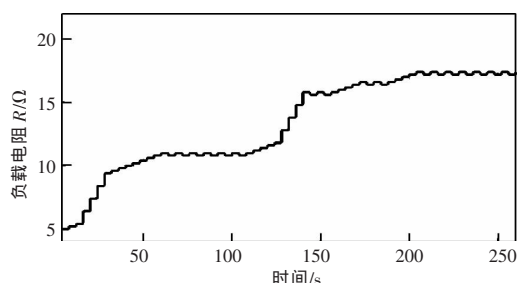


图 11 模拟负载波形
Fig.11 Simulated load waveform

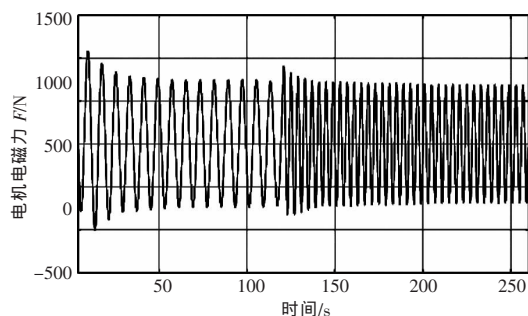


图 12 电机电磁力波形
Fig.12 Electromagnetic force waveform of generator

单相电压与电流的波形如图 13 所示。

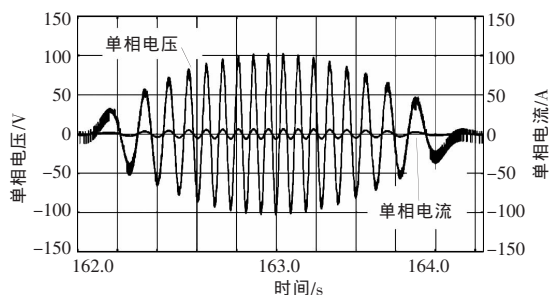


图 13 相电压与相电流的波形
Fig.13 The waveform of phase voltage and phase current

由图 13 可见,通过控制开关管的导通与关闭,很好地实现了电压与电流的同相位,且此时电压、电流波形含谐波比较少。

4 结束语

本文提出了一种新型振荡浮子发电系统,从仿真结果可以看出,利用自适应负载的方法可以在波浪参数改变的情况下实现最大功率跟踪,且反应速度比较迅速,输出相电流和相电压中所含的谐波很小。本文提出的振荡浮子发电系统在开发波浪发电技术,尤其是离岸海洋环境下的发电需要中,如海洋监测平台,有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 闫耀保.海洋波浪能综合利用-发电原理与装置[M].上海:上海科学技术出版社,2013.225-252.
- [1] Yan Yaobao. Principle and Device of the Ocean Wave Energy Conversion Generation [M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Publishing House, 2013.225-252.
- [2] 刘力红,高青鹏,马齐江,等.新型海岸波浪发电装置的设计与分析[J].可再生能源,2014,32(8):1245-1248.
- [2] Liu Lihong, Gao Qingpeng, Ma Qijiang, et al. The design and analysis of a new coastal wave power generation device [J].Renewable Energy Resources,2014,32(8):1245-1248.
- [3] 胡珊,何宏舟,郑松根,等.漂浮式波浪能发电平台船艏楔形角及浮子质量的优化研究[J].可再生能源,2016,34(9):1417-1422.
- [3] Hu Shan, He Hongzhou, Zheng Songgen, et al. Bow angle and buoys mass optimization on floating wave energy platform [J]. Renewable Energy Resources, 2016,34(9):1417-1422.
- [4] 王幸,吴必军,林礼群.直驱式波能装置振动及转换效率分析[J].可再生能源,2014,32(3):371-378.
- [4] Wang Xing, Wu Bijun, Lin Liqun. Oscillating characteristics and conversion efficiency of a direct drive wave energy converter [J].Renewable Energy Resources, 2014,32(3):371-378.
- [5] Amon E A, Schacher A A, Brekken T K A. A novel maximum power point tracking algorithm for ocean wave energy devices [A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition[C].San Jose:IEEE,2009.2635-2641.
- [6] E Amon, T K A Brekken, A Schacher. Maximum power point tracking for ocean wave energy conversion [J].

- IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (3): 1079–1085.
- [7] Hugo Mendonca, Sergio Martinez. A resistance emulation approach to optimize the wave energy harvesting for a direct drive point absorber [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 3–11.
- [8] C Bostrom, M Leijon. Operation analysis of a wave energy converter under different load conditions [J]. IET Renew. Power Gener, 2011, 5(3): 245–250.
- [9] Wu Feng, Ju Ping, Zhang Xiaoping. Modeling, control strategy, and power conditioning for direct-drive wave energy conversion to operate with power grid [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(4): 925–941.
- [10] Rieghard Vermaak, Maarten J Kamper. Experimental evaluation and predictive control of an air-cored linear generator for direct-drive wave energy converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (6): 1817–1816.
- [11] Elisabetta Tedeschi, Matteo Carraro, Marta Molinas. Effect of control strategies and power take-off efficiency on the power capture from sea wave [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26 (4): 1088–1098.
- [12] Xi Xiao, Xuanrui Huang, Qing Kang. Hill climbing method based maximum power point tracking strategy for direct-drive wave energy converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 257–267.
- [13] Nathan Tom, Ronald W Yeung. Experimental confirmation of nonlinear-model-predictive control applied offline to a permanent magnet linear generator for ocean-wave energy conversion [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(2): 281–294.

The maximum power tracking control based on the double degrees of freedom wave power system

Zheng Mingyue¹, Yang Jinming¹, Lin Kaidong¹, Huang Xiuxiu¹, Duan Pengxiang²

(1.School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2.Guangzhou Suning Sea Energy Technology Company, Guangzhou 510660, China)

Abstract: This article presents a fully enclosed double degrees of freedom oscillating buoy wave energy converter. Based on the dynamic characteristics of the converter, a variable load maximum power point tracking (MPPT) control strategy is proposed to extract the maximum power from the variable ocean wave environment. The optimal load resistance of the generator will be achieved through the hill climbing method. The current control, which is realized through the power switches off and on, is used to control the actual current of the generator to follow the given value. By this control, the output average power of the motor will reach the maximum value. The simulation results show that this strategy is able to adaptively adjust the value of load along with the change of wave frequency, and the maximum power output of the motor is achieved.

Key words: wave energy converter; variable load; MPPT; hill climbing method