

直接式波浪能采集的研究现状与展望

陈仁文 刘川 张宇翔

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要: 海洋波浪能量是风能、太阳能等环境能源中能量密度最大的一类能源, 分布非常广泛。但海洋波能开发和利用还相对滞后, 传统的波能采集装置由于存在转换机械结构复杂、转换效率低及耐冲击腐蚀能力差等缺点, 实现较为困难。一种以提高转换效率、稳定可靠为目的的能量采集装置——直接式波能采集装置近年来越来越受到重视, 成为该领域研究的热点。本文详细总结了直接式波浪能量采集的总体情况、特点、主要结构类型及其充电控制策略, 论述了波能发电的电能管理系统, 并对直接式波浪能量采集系统的发展趋势进行了展望。

关键词: 波浪能采集; 直接式; 充电控制; 电源管理

中图分类号: TH39 **文献标志码:** A

Research Status and Perspective of Direct Ocean Wave Energy Harvesters

Chen Renwen, Liu Chuan, Zhang Yuxiang

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Ocean wave energy, which is much rich on the earth, is one of the highest density energy among all renewable energies such as wind and solar energy. However, traditional ocean energy harvesters are unpractical because of their complicated conversion structures, low transmission efficiency, and weak anti-corrosion and anti-shock capacities. Thus, a wave energy harvesting device for promoting the transferring efficiency, reliability and stability, which is called direct energy harvester, is more and more emphasized and has become a research focus. This paper summarizes in detail the research status, characteristics, main classes, charging control strategies and power management systems of direct ocean wave harvesters. Moreover, the development tendencies of direct ocean wave harvesters are prospected.

Key words: wave energy harvester; direct conversion; charge control; power management

引言

目前, 人类所消耗的能源仍以石油、煤炭、天然气等传统矿物能源为主。但随着经济的发展, 对能源的需求越来越大, 加速了能源的消耗, 因此开发和利用可再生清洁能源已经迫在眉睫^[1]。近年来, 风能、太阳能等能源的开发利用进展不错^[2-3], 但对于蕴藏极其丰富、能量密度大的海洋波浪能的开发和利

用还相对滞后,需要加大研发力度。传统的波能采集装置,如点头鸭式^[4-5]、越浪式^[6-8]、振荡水柱式^[9-11]等,由于存在转换机械结构复杂、转换效率低、耐冲击腐蚀能力差等缺点,实用性较差。近年来,一种以提高转换效率、稳定可靠为目的的能量采集装置——直接式波能采集装置,成为研究的热点。本文围绕直接式波浪能量采集的特点、主要类型、进展情况、充电控制策略和电源管理等内容,对直接式波浪能量采集研究进展进行综述,并对其发展趋势进行展望。

1 直接式波能采集的优势及结构形式

1.1 波浪发电的一般结构

波浪能采集器(Wave energy harvester, WEH)也叫波浪能转换器(Wave energy converter, WEC),或者波浪发电机(Wave generator, WG),有很多类型。按照波能俘获方式分类,有振荡水柱式、浮子式、摆式、鸭子式、筏式、蚌式以及收缩坡道式等;按照波浪能量转换方式分类,则有气动式、液压式和蓄水式等^[12-18]。

波浪发电结构一般有3级,如图1所示。第1级作用是波浪能的捕获或者获取,它直接接受波浪力作用,这一级的典型部件有浮体、腔体等;第2级的功能是能量传递,包括机械传动、水力传动、液压传动和气体传动等,将捕获的能量继续传递至第3级;第3级负责最终的能量转换,这一级通常是旋转电机或者直线电机,它们负责将传递来的机械能转换为电能。能量经历3个过程:波浪能(动能+势能)→液体能量、气体能量、机械能等→电能。

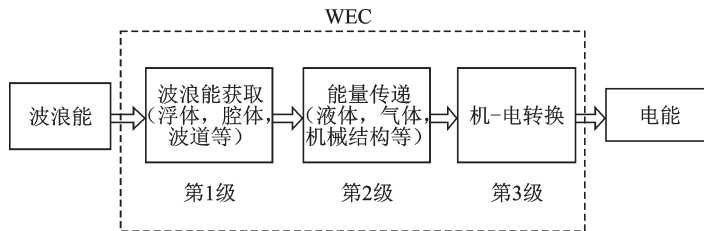


图1 波浪能采集器的3级转换框图

Fig.1 Block diagram of wave energy harvesters

1.2 直接式海浪发电的特点

目前大部分的波能发电都具有3级结构,这种发电装置有以下一些问题需要改进:

(1) 能量转换效率不高。很多能量转换都要经过几级能量耦合和转换,每级的能量耦合和转换都有能量损失。因此,大多数的波浪能量转换装置的效率只有10%~30%^[19]。

(2) 波能发电装置对波浪的适应性较差。一般设计的波能发电结构是在一定波浪下的最优设计,但这种设计是固定的,是根据波浪特点设计与之匹配的固定波浪发电装置,并不能根据波浪方向和波浪波高、频率等参数进行自适应实时在线调整,以产生最佳功率输出,当波浪参数发生变化时,其转换效率会显著下降^[20]。

(3) 能量收集系统结构复杂、抗冲击能力差、建设成本高。当前大部分波能发电系统机械结构复杂、机体易被腐蚀、对选材要求较高。而且,大部分能量转换依靠液体或气体推动透平和电机进行发电,而其中的透平设计及其耐久性也是技术难点^[21]。图2所示为鸭式波浪能量收集装置,从图中可以看出其复杂性^[22]。

然而,直接式波能采集结构相对要简单得多。它的机电能量转换结构中的定子和动子直接受波浪力的作用而产生相对运动。动子和定子上分别布置了线圈绕组和永磁体磁芯,线圈切割磁力线,从而

输出电能。这种发电装置由于没有第2级的中间能量传递环节使得结构简单,因此能量转换效率得到提高。另外,简单的结构使整个发电系统更能耐受冲击,可靠性更高、更实用。特别值得一提的是,直接式能量采集结构更利于实现在线自适应控制,以使其在输入波参数变化时仍能获得最大功率输出。

1.3 直接式海浪发电的结构

直接式波能采集装置的结构主要分为以下两类。

(1) 直线式能量转换结构

直线式能量转换结构的灵感来源于直线电机。传统的发电机是旋转式的,由旋转轴带动永磁体旋转,使定子上的线圈中感生出电动势。而这类直线式结构由定子和动子组成。在波浪直接作用下,定子和动子之间受迫产生相对的直线运动,而不是旋转运动。一般有几组绕组分布在定子上,而在动子上则布置有永磁体阵列,使其沿轴向产生交变的磁场。目前流行的点吸收式波能采集器就属于这类结构,如图3所示^[22]。这种直线发电机的定子固定在海床上,动子连接到浮子,定子中包含绕组,动子上有永磁阵列。当浮子振荡时,将在定子中感应出电流。

新的磁性材料和变频电子设备应用可以大大降低直线电机的成本,使得波浪能发电利用直线发电机成为一种趋势。相比于液压或涡轮系统的复杂性带来的可靠性和维护等问题,直线发电机更加简单,而且浮子和电机之间没有中间装置,直线发电机可以实现机械能直接转换为电能,转换效率高。

Trapanese等^[23]设计出一种直接式WEC,该WEC包括直线发电机、电力转换系统和海水电解槽。直线发电机的使用提高了系统的稳定性和可靠性。而且为了储存能量,该系统还能产生氢气。Pan等^[24]提出了一种基于非对称双向直线开关磁阻发电机的WEC互补功率的补偿方案,保证了WEC的输出电压的控制精度和系统鲁棒性。重庆交通大学的吴林键等^[25]提出了一种基于直线电机的“章鱼”型波浪能发电装置,如图4所示。该装置采用8个方向整体结构来布置触脚,8个触脚均匀环绕在八角浮力盘的四周,可从各个角度迎接海浪,充分利用波浪能发电。它使用直线发电机直接将波动动能转换为电能,简化了中间能量传递的环节,降低了中间环节的功率损耗,从而提高了波浪能转换效率。已经建成的浮子式波浪能采集装置有英国的Aqua Buoy装置^[26]、阿基米德波浪摆和美国OPT公司的动力浮标(Power Buoy)^[27]等。

本文提出了一种多浮筒直接式海洋波浪采集装置^[28],如图5所示。这种结构由多个浮筒级联构成,

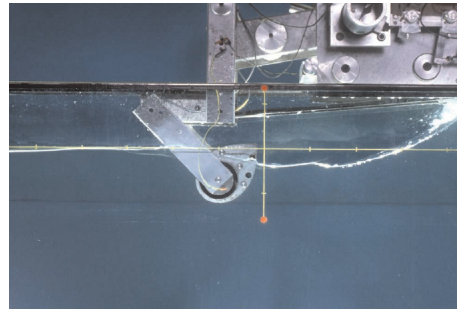


图2 一种鸭式波浪能量收集装置

Fig.2 A salter duck WEC

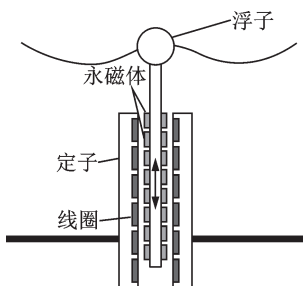


图3 永磁直线发电机的示意图

Fig.3 Schematic representation of permanent magnet linear generator

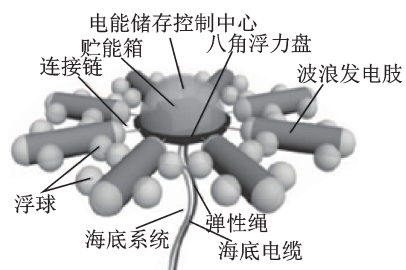


图4 章鱼型波浪能发电机

Fig.4 Octopus wave energy generator

浮筒之间的连接部件就是直线发电机,如图6所示。该部件的定子固定在一个浮筒中,其转子则与相邻的浮筒固联。由于机械约束,定子相对转子只能进行直线运动。每个浮筒的下部都有偏心质量,保证浮筒在水面不会侧翻。

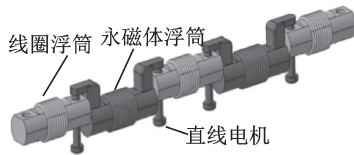


图5 多浮筒直接式海洋波浪发电结构

Fig.5 Structure of a multi-buoy direct wave energy generator

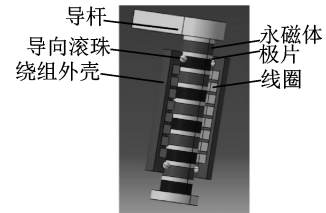


图6 直接式发电部件原理图

Fig.6 Schematic diagram of the direct power generation unit

(2) 转动式能量转换结构

为了使浮筒更能与波浪耦合,同时为了结构更简单,容易实现,本文还提出了一种铰链式蛇形波能采集结构,如图7所示^[29]。这种能量采集结构包含若干线圈浮体和若干十字形的永磁浮体,它们间隔布置,在海浪波浪作用下起伏,从而线圈浮体与十字永磁浮体由于铰链的约束,做相对转动。永磁浮体上布置了一种扇形Halbach永磁阵列结构,线圈浮体上则安排了多组线圈,也成弧形布置,如图8所示^[29]。Halbach布置方式有利于增强单边磁场,使得在相同波浪下换能结构能够获得更大电能输出。

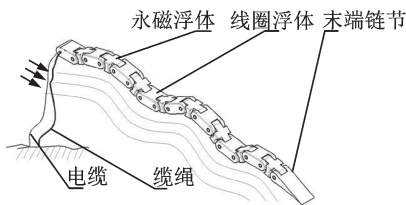


图7 铰链式蛇形波能采集结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of hinged snake-like wave energy converter

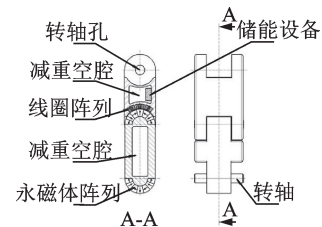


图8 转动式发电部件结构

Fig.8 Structure of the rotary power generation part

2 直接式波浪发电过程的控制和效率优化

直接式波浪发电系统从本质上适合进行能量采集过程的控制。控制目的是在一定波浪作用下获得最大的输出功率,亦即获得最优的能量转换效率。因为控制始终是在自适应跟踪最大功率输出,所以称其为最大功率点跟踪(Maximum power point tracking, MPPT)控制。控制的更新间隔可以从小时到毫秒级保证其实时性。对直接式波浪发电系统控制包含两个方面:一是对发电装置中线圈电流的控制,通过调节电磁阻尼,控制波能采集结构对波浪的动力学响应;二是调节浮筒长度、弹簧刚度等参数,以使受波体能够适应波浪参数的变化。

2.1 充电电流控制

直接式结构中的电机定子和转子直接受波浪力的作用,在线圈中感生出电流,给蓄能元件充电。线圈中感生的电流同时也会产生磁场,阻碍转子和定子之间的相对运动,这个阻碍力通常叫做电磁阻尼。调节电磁阻尼可通过直接改变负载电阻来实现。本文提出通过调节线圈向储能元件的充电电流

来实现电磁阻尼调节的新思路,其目的是实现波能结构对波浪的动力学响应,从而通过一定控制算法来获得最大的功率输出。

一般情况下,波浪能发电装置都是根据所在海域的实际波浪频率设计的。如果装置的固有频率与波浪频率重合,浮子与波浪的速度是同相的,则可以实现共振以最大程度地捕获波浪能。然而,海洋中的波浪频率是时刻变化的,当波浪频率偏离装置固有频率时,其能量捕获效率在装置不受控时将会显著减小。因此,需要将波能转换装置设计成一种能够在宽频率范围内谐振并且自适应调节的装置。目前常用的波浪能发电装置的控制方案是阻尼控制和锁止控制等。

(1) 阻尼控制

以点吸收式 WEC 为例,研究发现当 WEC 装置的无阻尼固有频率接近入射波的主频时,点吸收式 WEC 可以实现对能量最有效的捕获^[30]。在共振时,浮子与波浪的速度是同相的,利用入射波的动力压力,引起能量从波浪到浮子的大量传递^[31],此时可从波浪中捕获最大功率。因此,装置的运动取决于阻尼的大小:如果发电系统阻尼太高,则运动受到限制并且产生的功率很小;如果阻尼太小,则阻尼器吸收的功率很小,并且几乎没有功率消耗。对于一个波能发电系统,合适的阻尼对于高效能量采集至关重要。通过调节发电结构阻尼大小以捕获最大功率,是一种非常有效的措施。

为获得最大的电能输出,研究者们热衷于采用电磁阻尼控制的方法,而电磁阻尼的控制主要有恒定最优阻尼控制^[32]、在线阻尼控制^[33-34]和最大功率点跟踪控制^[35-36]等方法。

假设入射波为简单的正弦波,如果在 WEC 响应波浪的整个周期内都采用恒定的阻尼系数,就称为恒阻尼控制。如果该阻尼能使 WEC 吸收最大的波浪能量,则称这种控制是最优阻尼控制。Irina 等^[32]针对其应用的对象,采用了阻尼为 5~400 kNs/m 之间按照 5 kNs/m 的步长进行搜索,得到最大平均吸收功率时所对应的阻尼作为最优阻尼,实现了恒定最优阻尼控制。

然而真实的波浪频率是不停变化的,恒阻尼并不能满足所有周期范围内最大功率的输出,因此阻尼的在线控制策略应运而生。Son 等^[33]利用非线性模型预测控制方法,通过具有脉冲宽度调制技术的固态继电器产生模拟电流,实现永磁直线电机的阻尼在线控制。Jama^[34]提出一种新的在线阻尼控制策略,该策略通过调节单开关三相升压整流器的占空比,实时控制永磁直线电机的阻尼力。

Lekube 等^[35]使用外向传感器,采用最大功率点跟踪技术来使系统效率最大化。控制决策基于由沿涡轮机定位的压力传感器测量的压降,为此,对于不同的测量信号实现了基于传感器的新型流量控制器。仿真结果表明,基于流量控制的最大功率点跟踪策略能够提高输出功率。Lettenmaier 等^[36]提出了一种新的最大功率点跟踪算法,即循环算法,该算法用于控制随机海域中的波浪能转换器。Lettenmaier 将该算法与常规的扰动观察算法(Perturb and observe algorithm, POA)进行了比较。结果表明,循环算法比扰动观测算法获得了更好的效果。

(2) 锁止控制

锁止控制是一种相位控制方法。该方法是指根据一定的控制策略,在 WEC 响应过程中不断锁定和释放 WEC 中定子和动子,使其相对运动处于交替锁定和释放状态的一种控制方法。

锁止控制的原理如图 9 所示^[37]。图中:曲线 a 是入射波的波形;曲线 b 是起伏浮子的垂直位移曲线,浮子质量很大,其固有频率与波浪的频率相匹配(理想的共振条件);曲线 c 是具有较小质量物体的垂直位移,因此具有较高的固有频率,在行程的极限处被锁定。当波浪力达到合适的大小时,浮子将被释放,因此其速度将与波浪的激励力几乎同相,此时浮子的速度在波峰或波谷处达到最大值。

Budal 等^[38]分析了点吸收式 WEC,如果波浪的激励力与 WEC 的速度同相位,可以大大增加其能量的吸收,他们提出通过锁止控制的方法来调节 WEC 相位。因为在一个波浪周期 WEC 的动子速度有两次为 0,因此可以在一个周期内锁止 1~2 次。

Irina 等^[32]提出了两种在锁止控制释放阶段阻尼力的确定方法,分别叫做最优锁止和次优锁止控制。针对其应用的对象,采用了 5 kNs/m 阻尼步长,在 5~400 kNs/m 之间进行搜索,得到最大平均吸收功率时所对应的阻尼作为最优阻尼,这种控制称为最优锁止控制。而在释放阶段采用的阻尼为前述恒定阻尼控制下得到的最优阻尼,则称为次优锁止控制。仿真结果表明,不管是最优还是次优锁

止,效果都要优于恒定阻尼的最优控制,而最优锁止控制在这 3 种控制方案中效果最佳,这为以后的研究和设计提供了十分有益的参考。但是,Irina 等认为锁止控制增加了 WEC 损坏的风险。因为在强激励波浪下,这种控制方式较恒阻尼控制方式,其能量转换结构的动子会产生更大的位移幅值,容易造成更大的冲击,对 WEC 结构的耐冲击能力提出了更高的要求。

Liu 等^[39]提出了一种用于双浮体波浪能发电装置的反馈锁止控制策略,他们采用永磁直线发电机,在不规则的波浪条件下建立了一种基于锁止力计算的反馈控制策略。结果表明,所提出的反馈锁止控制非常有效地提高了双浮体波浪能发电装置的吸收能量效率。Li 等^[40]开发了一种预测波浪力的实时锁止控制器,并将其应用于点吸收式波浪能发电装置,以最大化其能量吸收。

2.2 波能转换的结构参数调节

对于点吸收式 WEC,海洋波浪的波长变化对能量转换的效率不会产生非常显著的影响。但是,对于蛇形波浪能采集装置,其浮筒的长度直接影响了 WEC 对不同波长波浪的响应。显然,浮筒长度等于波浪波长的 1/2 是最优的长度尺寸,这种长度正好能够与波浪波长匹配,以使其达到最大的响应。但是在不同的天气条件下,海洋波浪的参数会发生很大的变化,这使得固定长度浮筒的 WEC 很难适应这种变化。因此,本文提出一种可以在一定时间内、以一定时间间隔调节浮筒长度的方案。通过传感器实时测量海洋波浪的相关参数,反馈给控制器自适应调整浮筒的长度,以适应海浪波长的变化。

此外,对波能转换结构参数的调节还包括对弹簧刚度的调节等。Chen 等^[41]提出一种新型的全封闭双质量-弹簧-阻尼器浮子系统。随着系统共振频率的变化从而改变系统内部物体的质量与弹簧刚度,以适应波浪的变化,提高捕获功率。Peng 等^[42]利用辅助弹簧进行调谐,使得系统可以在变化的波浪中保持较宽频带内的高能量捕获。

3 波能发电的电能管理系统

与振动能量和电磁辐射能量回收等方式不同,海洋波浪能回收的能量大,可用于向市电网供电。但是,波浪能的收集很大程度上受气候条件影响,具有间歇性且不可控。如果直接使用波浪能收集装置供电,其供电质量很难满足用户的需求。可以将回收到的储能元件上的电通过逆变送入交流电网,但是这样做需要通过相应 DC-AC、AC-DC 等电力电子器件构成的多级能量变换装置。若接入合适电压等级的直流微电网,将省去部分交直流变换装置,可减小成本、降低损耗。由于直流微电网技术并不涉及无功补偿和频率调整的问题,所以可以有效提高系统的安全运行能力,可接入储能系统,还能大大降低成本。因此,研究可向直流微电网供电的波能发电的电源管理技术具有重要意义。

通过电源管理将波浪发电系统与直流微电网连接是当前的研究热点。Fang 等^[43]针对小规模分布式发电机,提出了一种基于模糊决策的方法和控制器设计方法,用于解决近海工业微电网中的能量分配问题,充分考虑了发电和消耗关系,淡水剩余量与存储单元的充电状态。Perez 等^[44]提出了一种控制策略,通过超级电容器调节微电网直流母线的电压,控制律适用于将超级电容器连接到直流电网的双

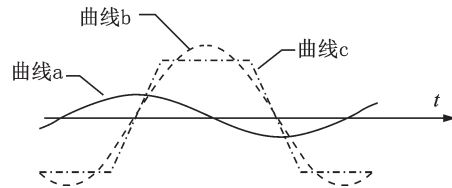


图9 锁止控制原理图

Fig.9 Schematic diagram of latching control

向升压转换器。控制方案基于动态反馈线性化,包括在不同的时间尺度动态中分离系统,从而创建简化的模型。Du等^[45]提出了一种协调微电网系统能量管理的最优分布式模型预测控制策略。通过系统之间的信息交换,网络中的每个微电网可以保持其自身的系统供需平衡,并保证分布式微电网系统的闭环稳定性。Heymann等^[46]通过引入非线性、连续时间、滚动范围公式,提出了一种新的微电网能量管理问题的方法,将能源管理问题制定为确定性最优控制问题。对于动态规划原理方法,实施半拉格朗日方案,该方案适用于处理柴油发电机的开/关模式的切换时间的优化。梁海峰等^[47]提出带有电压补偿环节的“虚拟电抗法”改进传统下垂控制方法,功率按容量分配,电压并不大幅减少;同时提出了“以曲代直”的“反S”下垂控制策略,可以解决下垂控制中大功率或大负荷微源投切时的频率越限问题。刘英培等^[48]提出了一种非线性下垂控制策略,来解决混合多端直流输电系统功率协调控制问题。该策略可以协调分配各换流站有功功率,有效降低各换流站直流电压的静态偏差,同时提高了系统的响应速度。冯伟等^[49]基于分层控制提出了一种微电网并网电能质量主动提升控制策略,可以减少微电网向电网注入的稳态谐波电流,降低由于并网开关闭合导致电网对微电网的谐波电流冲击。

4 总结与展望

研究波浪能发电技术的目的在于解决能源的匮乏以及沿海区域的供电问题,目前国内外在该领域已经取得了一些研究进展。鉴于传统波浪发电具有能量转换效率低、结构复杂、耐冲击能力差等缺点,目前研究热点已经逐渐转移到直接式波浪发电的研究上。研究内容涉及到能量转换结构、能量转换控制、电源管理等。未来需要研究的内容和发展趋势主要表现在:

(1) 直接式波能发电结构将成为WEC的主流,它也是最具发展前途和实用性的波能发电结构之一。

(2) 为了满足增加输出功率,以及大规模应用、减少成本等需求,直接式波能发电结构向阵列式发展。

(3) 通过参数调节和阻尼控制,进行波能转换效率在线跟踪优化等方法将会吸引越来越多的研究者。

(4) 结合波能采集结构动力学、水动力学、电磁学及电学等学科的多学科优化问题将成为设计高效WEC必须解决的问题。

(5) 波能发电结构如何耐受极端海洋气候条件、耐腐蚀和长期可靠工作等问题,是实现WEC大规模应用必须解决并受到高度重视的问题。

相信在未来,波浪能发电技术将会在世界范围内普及应用,推动新能源开发的进步与发展。

参考文献:

- [1] 任铭,张超,刘畅.新型网状波浪能发电装置的设计及初步试验结果[J].可再生能源,2018,36(9):1409-1414.
Ren Ming, Zhang Chao, Liu Chang. Design and preliminary experiment results of a novel network structured ocean wave power generation device[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(9): 1409-1414.
- [2] 郭辉,岳良明,王海文.大型水平轴风力机风轮模型风洞试验[J].太阳能学报,2018(1):253-257.
Guo Hui, Yue Liangming, Wang Haiwen. Wind tunnel test for rotor model of a large scale horizontal-axis wind turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018(1): 253-257.
- [3] 侯欣宾,王立,李庆民,等.空间太阳能电站高压大功率电力传输关键技术综述[J].电工技术学报,2018,33(14):3385-3395.
Hou Xinbin, Wang Li, Li Qingmin, et al. Review of key technologies for high-voltage and high-power transmission in space solar power station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3385-3395.
- [4] Yao Y X, Li H L, Wu J M, et al. Numerical simulation of duck wave energy converter[J]. Key Engineering Materials, 2016,

693: 484-490.

- [5] 吴金明. 鸭式波浪能转换单元的锁定控制与阵列布局设计的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Wu Jinming. Research on Latching Control of the solo duck wave energy converter and its array layout design[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [6] 李永国, 汪振, 王世明, 等. 国外波浪能开发利用技术进展[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2014, 6(4): 371-382.
Li Yongguo, Wang Zhen, Wang Shiming, et al. Progress in the development and utilization of wave energy technology abroad [J]. Journal of Engineering Studies, 2014, 6(4): 371-382.
- [7] Muller N, Kouro S, Malinowski M, et al. Cascaded H-bridge multilevel converter interface for wave dragon energy conversion system[C]// Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.]: IEEE, 2013.
- [8] Vicinanza D, Nørgaard J H, Contestabile P, et al. Wave loadings acting on overtopping breakwater for energy conversion[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 65(S2): 1669-1674.
- [9] 周宇, 宁德志, 张崇伟, 等. "蘑菇型" 振荡水柱式波能转换装置水动力性能的解析研究[C]// 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京: 中国海洋工程学会, 2017.
Zhou Yu, Ning Dezhi, Zhang Chongwei, et al. Analytical study on hydrodynamic performance of "mushroom type" oscillating water column wave energy conversion device[C]// Papers of the 18th China Ocean (Coastal) Engineering Symposium (Part I). Beijing: Chinese Society for Oceanography, 2017.
- [10] Martinelli L, Pezzutto P, Ruol P, et al. Experimentally based model to size the geometry of a new OWC device with reference to the mediterranean sea wave environment[J]. Energies, 2013, 6: 4696-4720.
- [11] Falcao A F O, Gato L M C, Henriques J C C, et al. A novel twin-rotor radial-inflow air turbine for oscillating-water-column wave energy converters[J]. Energy, 2015, 93: 2116-2125.
- [12] 陈仁文, 任龙, 蒋小川, 等. 海洋波浪能量采集技术研究进展与展望[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(6): 831-837.
Chen Renwen, Ren Long, Jiang Xiaochuan, et al. Recent advances and prospects of ocean wave energy harvesting technology [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(6): 831-837.
- [13] 肖晓龙, 肖龙飞, 李扬. 基于非线性能量俘获机制的直驱浮子式波浪能发电装置研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 156-162.
Xiao Xiaolong, Xiao Longfei, Li Yang. A directly driven floater type wave energy converter with nonlinear power-take-off mechanism in irregular waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 156-162.
- [14] 马鹏磊, 王勇, 刘海宾, 等. 摆式振荡水翼的水动力性能分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(3): 665-672.
Ma Penglei, Wang Yong, Liu Haibin, et al. Analysis on hydrodynamic performance of flapping foil with swing motion[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2018, 39(3): 665-672.
- [15] 唐友刚, 赵青, 黄印, 等. 筏式波浪能发电装置浮体水动力相互作用与能量俘获研究[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(4): 87-92.
Tang Yougang, Zhao Qing, Huang Yin, et al. Study on the hydrodynamic interaction and energy capture for raft wave energy converter[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(4): 87-92.
- [16] 岳旭辉, 陈启卷, 许志翔, 等. 2 kW 波力发电液压力输出系统设计和仿真分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 113-120.
Yue Xuhui, Chen Qijuan, Xu Zhixiang, et al. Design and simulation of 2 kW hydraulic power take-off system for wave power generation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 113-120.
- [17] 宁艳春, 曹常贞, 梁兴, 等. 波浪发电液压系统[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(5): 57-60.
Ning Yanchun, Cao Changzhen, Liang Xing, et al. Study on hydraulic system of wave power generation[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018, 38(5): 57-60.
- [18] Halder P, Mohamed M H, Samad A. Wave energy conversion: Design and shape optimization[J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 337-351.
- [19] 范亚宁, 彭伟, 郑金海. 多功能型波浪能装置研究进展[J]. 可再生能源, 2018, 36(4): 617-625.
Fan Yaning, Peng Wei, Zheng Jinhai. Advances in multifunctional wave energy devices research[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(4): 617-625.
- [20] Xia T, Yu H, Guo R, et al. Research on the field-modulated tubular linear generator with quasi-Halbach magnetization for ocean wave energy conversion[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-5.

- [21] Farrok O, Islam M R, Sheikh M R I, et al. A split translator secondary stator permanent magnet linear generator for oceanic wave energy conversion[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 99: 1.
- [22] Drew B, Plummer A R, Sahinkaya M N. A review of wave energy converter technology[J]. *Journal of Power and Energy*, 2009, 223:887-902.
- [23] Trapanese M, Boscaino V, Cipriani G, et al. A permanent magnet linear generator for the enhancement of the reliability of a wave energy conversion system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(6): 4934-4944.
- [24] Pan J F, Li Q, Wu X, et al. Complementary power generation of double linear switched reluctance generators for wave power exploitation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 106: 33-44.
- [25] 吴林键, 郑学琴, 杨阳, 等. 基于直线电机的“章鱼”型波浪能发电装置[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(1): 149-153.
Wu Linjian, Zheng Xueqin, Yang Yang, et al. Octopus wave energy conversion system based on linear generators[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2012, 31(1): 149-153.
- [26] Wachter A, Nielsen K. Mathematical and numerical modeling of the AquaBuOY wave energy converter[J]. *Mathematics-in-Industry Case Studies*, 2010(2): 16-33.
- [27] Woodbridge T C. Reciprocating generator wave power buoy: U.S. 6-791-205[P]. 2004-09-01.
- [28] 潘超. 多浮筒直驱式海发电装置设计及参数优化[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
Pan Chao. Structural design and parameter optimization of multiple floating body direct driven ocean wave energy harvesting devices[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [29] 陈仁文, 任龙, 夏桦康, 等. 一种铰接式链条形波浪能发电装置: CN106655622A[P]. 2017-05-10.
Chen Renwen, Ren Long, Xia Huakang, et al. A articulated chain wave energy generating device: CN106655622A[P]. 2017-05-10.
- [30] Korde U A. Efficient primary energy conversion in irregular waves[J]. *Ocean Engineering*, 1999, 26(7): 625-651.
- [31] Budal K, Falnes J. A resonant point absorber of ocean-wave power[J]. *Nature*, 1975, 256: 478-479.
- [32] Irina T, Jennifer L, Boel E, et al. Economic aspects of latching control for a wave energy converter with a direct drive linear generator power take-off[J]. *Renewable Energy*, 2018, 128: 57-67.
- [33] Son D, Yeung R W. Real-time implementation and validation of optimal damping control for a permanent-magnet linear generator in wave energy extraction[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 571-579.
- [34] Jama M, Wahyudie A. Online damping strategy for controlling heaving wave energy converters using three-phase bridge boost rectifier[J]. *IEEE Access*, 2017, 99:1.
- [35] Lekube J, Garrido A, Garrido I, et al. Flow control in wells turbines for harnessing maximum wave power[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 535.
- [36] Lettenmaier T, von Jouanne A, Brekken T. A new maximum power point tracking algorithm for ocean wave energy converters [J]. *International Journal of Marine Energy*, 2017, 17: 40-55.
- [37] Falnes J. *Ocean waves and oscillating systems*[C]//*Ocean Waves and Oscillating Systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002: 286.
- [38] Budal K, Falnes J. Interacting point absorbers with controlled motion[J]. *Power from Sea Waves*, 1980: 381-399.
- [39] Liu K, Wang D J, Qiu S Q, et al. A feedback latching controller for two-body wave energy converters under irregular wave conditions[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(8): 1114-1126.
- [40] Li L, Gao Y, Yuan Z. Real-time latching control of wave energy converter with consideration of wave force prediction[C]//2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). [S.l.]: IEEE, 2018: 1-6.
- [41] Chen Z, Zhang L, Yeung R W. Analysis and optimization of a dual mass-spring-damper (DMSD) wave-energy convertor with variable resonance capability[J]. *Renewable Energy*, 2019, 131: 1060-1072.
- [42] Peng W, Huang X, Fan Y, et al. Numerical analysis and performance optimization of a submerged wave energy converting device based on the floating breakwater[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2017, 9(4): 044503.
- [43] Fang X, Yang Q, Dong W. Fuzzy decision based energy dispatch in offshore industrial microgrid with desalination process and multi-type DGs[J]. *Energy*, 2018, 148: 744-755.

- [44] Perez F, Iovine A, Damm G, et al. DC microgrid voltage stability by dynamic feedback linearization[C]//2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). [S.l.]: IEEE, 2018: 129-134.
- [45] Du Y, Wu J, Li S, et al. Distributed MPC for coordinated energy efficiency utilization in microgrid systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017:1.
- [46] Heymann B, Bonnans J F, Martinon P, et al. Continuous optimal control approaches to microgrid energy management[J]. *Energy Systems*, 2018, 9(1): 59-77.
- [47] 梁海峰, 郑灿, 高亚静, 等. 微网改进下垂控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(17): 24-33.
Liang Haifeng, Zheng Can, Gao Yajing, et al. Research on improved droop control strategy for microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(17): 24-33.
- [48] 刘英培, 杨小龙, 梁海平, 等. 适用于混合多端直流输电系统的非线性下垂控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(22): 263-276.
Liu Yingpei, Yang Xiaolong, Liang Haiping, et al. Nonlinear droop control strategy for hybrid multi-terminal HVDC transmission system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(22): 263-276.
- [49] 冯伟, 孙凯, 关雅娟, 等. 基于分层控制的微电网并网谐波电流主动抑制控制策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(6): 1400-1409.
Feng Wei, Sun Kai, Guan Yajuan, et al. An active harmonic grid-connecting current suppression strategy for hierarchical control based microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(6): 1400-1409.

作者简介:



陈仁文(1966-),男,教授,博士生导师,研究方向:测试技术、无线传感器及网络、能量收集、减振降噪智能结构等, E-mail: rwchen@nuaa.edu.cn。



刘川(1993-),男,博士研究生,研究方向:环境能量采集技术, E-mail: chuanliu@nuaa.edu.cn。



张宇翔(1991-),男,博士研究生,研究方向:能量回收与振动控制技术, E-mail: yxzhang@nuaa.edu.cn。

(编辑:张黄群)