

海洋能开发的多能互补装置及分布式发电系统

毛亚郎, 陈国波, 章怡

(浙江工业大学海洋研究院 杭州 310014)

摘要: 海洋能种类多、储量大、可再生、污染少,是可持续开发的重要清洁能源。针对海洋能具有波动性、能量密度低的特点,利用不同能源之间的互补性开展多能互补装置及分布式发电系统研究的意义重大。文章根据各种海洋能的开发利用特点,阐述当前多能互补发电装置的理论模型及其基本结构,为海洋能综合发电装置设计和降低海洋能开发成本提供参考;利用各种海洋能、风能和太阳能之间的互补性,优化多种能源的配置,构建分布式发电微网,使系统获得稳定的电力输出,可实现海洋能的有效利用;多能互补模式能提高海洋能开发的经济性和能量利用率,具有较大的发展前景。

关键词: 海洋能; 新能源; 电力产业; 海洋工程; 多能互补

中图分类号: P74 文献标志码: A 文章编号: 1005-9857(2016)11-0048-07

Hybrid Power Equipment and Distributed Generation System of Ocean Energy

MAO Yalang, CHEN Guobo, ZHANG Yi

(Institute of Ocean Research, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Ocean energy is an important clean energy for sustainable development, which has the characteristics of various forms, large reserves, renewable and less pollution. According to the characteristics of the energy fluctuation and the low energy density of the ocean energy, it is significant to carry out the research of hybrid power equipment and systems with multi-energy sources. In view of the development and utilization characteristics of ocean energy, the theoretical models of the hybrid power equipment and its basic structure were elaborated to reduce the cost of ocean energy development and provide reference for the design of hybrid equipment. In order to acquire the stable output of the power generation system and realize the effective utilization of ocean energy, the configuration optimization of multi-energy sources has been studied and the distributed generation systems has been established. It could be concluded that the pattern of hybrid power will be more economic and a better utilization ratio of ocean energy, which will also have great development prospects.

Key words: Ocean energy, New energy, Electric industry, Oceanographic engineering, Hybrid power

收稿日期: 2016-07-01; 修订日期: 2016-10-08

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y201328678).

作者简介: 毛亚郎, 讲师, 博士, 研究方向为海洋机械装备, 电子信箱: myl@zjut.edu.cn

海洋能具有无污染、可再生、储量大等优势,开发利用前景广阔。海洋能种类丰富,主要包括潮汐能、潮流能、波浪能、温差能和盐差能,其中海水受太阳和月亮引潮力的作用会产生有规律的运动,竖直方向的涨落称为潮汐势能(潮汐能)、水平方向的流动称为潮流能,能量强度主要受潮汐现象和海洋地势地貌的影响;波浪能是指海洋表面的波浪所具有的动能和势能,受海面风速的影响较大,随季节变化明显;温差能由海洋表层和深层的水温度差而形成;盐差能是指海水与淡水或含盐浓度不同的海水之间的化学电位差能^[1]。

海洋能资源丰富、自然可再生、对环境影响小,是清洁能源开发利用的重要发展方向。但海洋能本身会随着自然环境的变化而变化,存在较大的波动性,这对其开发利用带来一定挑战。采用多种能源共同开发、互补的方式,可以降低开发成本,提高能源利用率,获得较为稳定的能源输出,从而实现海洋能的有效利用。

1 海洋能开发利用特点

1.1 潮汐能

潮汐能利用潮起潮落的势能发电,其原理与水力发电相似。和水电相比,潮汐发电的能量密度低、随海水水位的变化而变化,即潮汐电站是在变工况下工作的。与其他海洋能相比,潮汐能呈周期变化、可预测、发电原理清晰,潮汐电站投入运行早、技术比较成熟、后期维护费用低。建设潮汐电站需要围海造坝,前期投入较大,对海域的通航和生态环境影响也较大;为提高潮汐电站能量利用率和降低前期投入,通常选择潮差大的海湾、河口、弯中湾建设电站。当前潮汐电站向大型化发展,已建成并运行的大型潮汐电站有法国的朗斯(1966 年)、苏联的基斯洛(1968 年)、中国的江厦(1980 年)、加拿大的安那波利斯(1984 年)等^[2]。

1.2 潮流能

潮流能利用潮汐作用下海水流动的动能发电,发电装置与风能发电相似。与潮汐发电相比,潮流能发电不需要拦海筑坝,对海洋航运和生态环境影响较小。目前潮流能发电装置已基本成熟,但发电效率较低,且装置的可靠性尤其是密封、抗腐蚀、防

生物附着和机械结构刚度等方面有待提高;潮流发电装置一般选择流速较大的区域,以提高发电效率。潮流能发电起步较晚,还处于项目应用示范阶段,如英国于 2008 年建成的 SeaGen 潮流能电站单机容量达 1.2 MW^[3-4],我国初装机容量达 3.4 MW 的大型海洋潮流能发电机组于 2016 年在舟山岱山县下海安装。

1.3 波浪能

波浪能储量巨大、分布广泛,但由于受自然条件影响大、波浪运动周期短,是海洋能中最不稳定的一种能源,开发利用难度较大。当前波浪能发电装置在可靠性、成本控制和输出稳定性等方面有待提高。英国 Pelamis 波浪能电力公司研制的筏式“海蛇”波浪能发电装置于 2004 年 8 月成功实现并网发电,美国科学应用及研究联合会开发磁流体波浪能装置以解决深海区域波浪发电装置生存能力差等问题^[5-6]。

1.4 温差能

温差能发电是利用表层海水加热某些低沸点工质并使之汽化以驱动汽轮机发电,同时利用深层冷水将做功后的乏汽冷凝重新变成液体,形成系统循环;由于温差小,能量转化效率低,通常只有 4%~5%。海洋温差能发电装置在制造淡水、制冷、制氢和海水养殖等方面有综合利用前景,已从试验示范项目逐渐向商业项目推广。印度政府与日本佐贺大学海洋能源研究中心于 2001 年建造 1 MW 的漂浮闭式循环示范电站,美国洛克希德马丁公司建造的夏威夷州柯纳 40 kW 实验电厂于 2012 年 4 月运营^[7],这些发电装置都能向电网输出净功率。

1.5 盐差能

盐差能发电是利用淡水通过半透膜向海水渗透的渗透压发电,发电装置的核心是渗透膜,成本高、设备投资大、能量转化效率低,且要求发电装置设在河流的入海口,需要同时利用淡水和海水资源。目前盐差能的利用还处于研究和试验阶段,Statkraft 公司于 2003 年建成世界上第一个专门研究盐差能的实验室,挪威 Buskerud 公司于 2008 年建成世界上第一座盐差能发电站^[8]。

综上所述,由于海洋能具有不稳定、能量密度

低的特点,单一能源很难得到持续的输出,海洋能发电对电网和用电都有较大挑战。与此同时,海洋能都有自身的规律和周期,同时开发和利用多种能源形成互补即可实现持续均衡供电。当前能量互补的形式主要有各种海洋能之间的互补,以及海洋能与风能、太阳能等其他能源之间的互补。多能互补的模式,一种是采用混合发电装置实现装置互补,通过共享基础平台、海底电缆等方式降低投资成本;另一种是根据多种海洋能的互补特性,构建分布式发电网络,利用多能互补系统实现电力的稳定输出,提高海洋能的稳定性和利用率。

2 海洋能多能互补装置

2.1 波浪能与海上风能的互补装置

Pérez-Collazo 等^[9]对波浪能和海上风能的不同组合方式开展研究,将组合方式分为同一位置协同发电、同一海域混合发电和孤岛发电,并列举适用于不同海水深度的混合发电的基础装置,包括单桩式、多桩式、框架式、半潜式(图 1)。

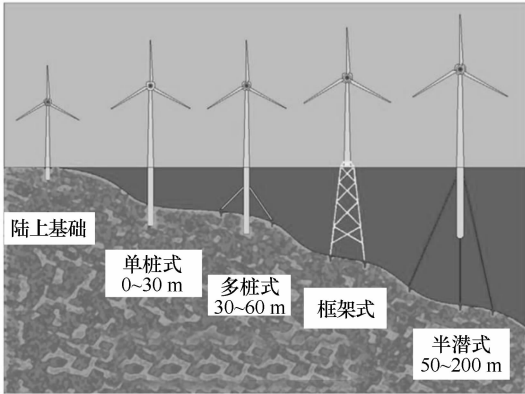


图 1 波浪能和海上风能互补装置的基础结构

Muliawan 等^[10]提出在半潜式平台上通过花托式结构将 Hywind 风力发电装置与 Wavebob 波浪能发电装置组合为风—浪混合发电装置(STC),在波浪能的作用下花托沿着桅杆上下运动实现发电(图 2)。同时,通过对该装置进行空气动力学和流体动力学分析并对其经济性进行评估,认为相比单独的风力或波浪能发电装置,STC 在资金投入和总电能产出上更有优势。

深海浮式风力发电装置受波浪起伏的影响会增大装置的负载并减弱风力发电效果,需要通过增

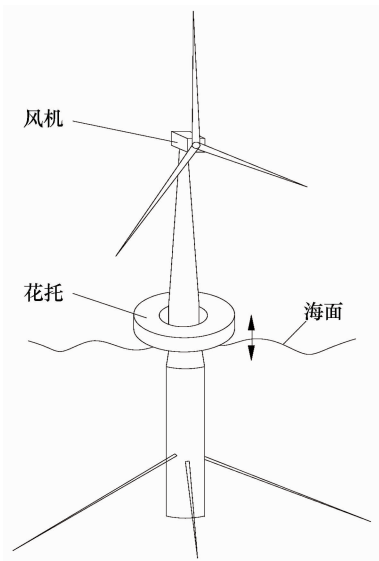


图 2 STC 风—浪混合发电装置示意

加阻尼装置以减弱波浪对装置的影响,为此 Borg 等^[11]提出将波浪能发电机作为阻尼装置,将波浪能有效利用起来,提高浮式风力发电装置的稳定性。该风力发电装置的平台采用 3 个浮子的半潜式装置^[12](图 3),根据英国多格滩的风场和波谱特征对假定的波浪能发电机的参数进行设计,分别分析实现波浪能发电量最大的参数和阻尼最大的参数。Astariz 等^[13]对此开展进一步研究,为提高风—浪发电装置的经济性,对西班牙特纳利夫岛海域的风能和波浪能进行仿真分析,确定风—浪发电装置的最佳配置区域。

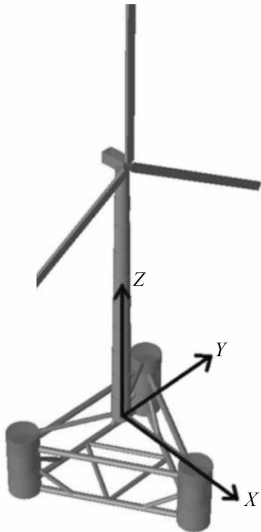


图 3 三浮子半潜式风—浪发电装置

苏格兰绿色海洋能源公司在其研制的 Ocean Treader 振荡浮子式波浪能发电技术的基础上,结合风力发电技术研制 Wave Treader 波浪能风能综合发电装置^[14](图 4)。该装置安装在海上风力发电平台上,提供风—浪混合电能并通过风力发电的海底电缆输送到岸上电网。该技术更具商业可行性,有效降低技术风险^[15],节省单独波浪能发电装置固定平台和电缆的铺设成本;由于波浪能主要受海面风力的影响,风能丰富的海域波浪能密度也高,具有较高的可行性。



图 4 Wave Treader 风—浪发电装置

2.2 潮流能与海上风能的互补装置

魏东泽^[16]提出多桩式潮流能与海上风能互补装置(图 5)。

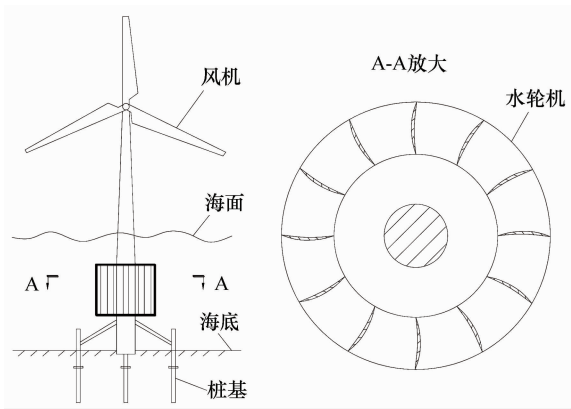


图 5 潮流能与风能混合发电装置

该装置主要包括 1 个风机和 1 个竖轴潮流能水

轮机,利用下部潮流能水轮机进行发电,以弥补风电的不稳定性,此外通过采用集成线路还可以节省输电线等设备成本;适用于风能和潮流能都比较丰富的海域。

Rahman 等^[17-18]提出近海风能和潮流能的混合发电装置(HOTT)(图 6)。该装置顶部安装 1 个风能涡轮发电机、底部安装 4 个潮流能涡轮发电机,4 个涡轮发电机组可实现转向 180°,用于潮流反向流动的情况;设置升降装置,水下发电机可以提升

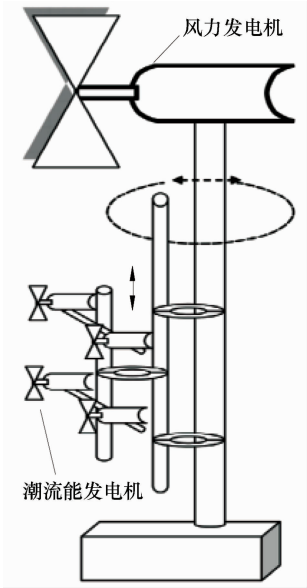


图 6 HOTT 型潮流能与风能混合发电装置

2.3 潮流能、波浪能与海上风能的互补装置

秦川等^[19]提出近海潮流能、波浪能和风能的混合发电装置(图 7)。该装置采用导管架式基础平台,将水平轴式风力发电装置安装于平台顶部、直驱式波浪能发电装置安装于海面并固定于基础平台内部、水平轴式潮流能发电装置安装于基础平台下部,并对 3 种发电装置的汇流和并网方式进行研究。

柳博瀚等^[20]提出一种将海上潮流能、波浪能、风能转化为液压能,利用液压系统实现稳定的功率输出和发电的装置(图 8)。该装置每个模块都采用驱动液压,将分散的能量以液压能的形式集聚推动发电机转动,实现多种能量的耦合互补,从而提高

发电效率和稳定性。

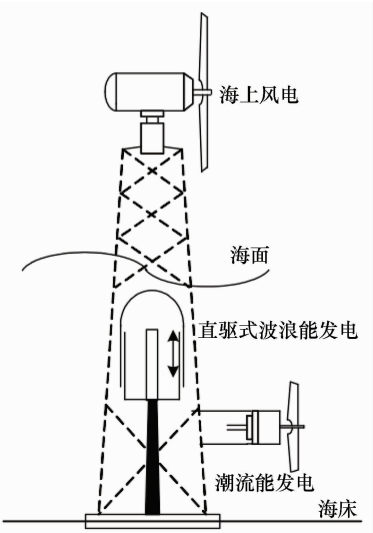


图 7 近海潮流—波浪—风力混合发电装置

的综合利用。

杨先亮等^[22]构建一套全天候工作的海洋温差能—太阳能联合热发电系统,利用太阳能进一步加热以提高汽轮机入口的温度和压力,从而提升系统热效率。该系统由有光照工作子系统和无光照工作子系统组成,利用高、低压泵的联合使用实现高压循环子系统和低压循环子系统。通过系统热力学的计算分析,联合系统的效率大大提高。

Straatman 等^[23]提出利用浮动近海太阳能池(OSP)增加海洋温差能发电装置(OTEC)的海水溫差的理论装置(OSP-OTEC),经理论计算该装置可使 OTEC 的能量利用率提高到 12%,远大于普通 OTEC 仅 3%的能量利用率。OSP 由低成本的塑料薄膜制造,经济性大大提高,适用于阳光充足的沿海区域。

日本的日立造船和里见产业在印度用发动机冷却水和海水的温差发电作为船用发电设备,该技术大型化后可达核电水平,是有发展前途的发电方式^[24]。

3 分布式发电的多能互补系统

通过多能互补装置可以共用部分设备和平台并实现一定程度的能量互补,可提高海洋能发电的经济性和电能输出的稳定性。但很多海洋能受到自然条件的限制往往分布于不同区域,需要构建各个分布式发电装置的多能互补系统,以实现发电系统的稳定输出和并网,这对独立海岛的多能供电系统具有重要现实意义。

Lund^[25]根据丹麦能源系统中风能、太阳能和波浪能的不同波动模式,利用 EnergyPLAM 系统能量仿真模型,对多能的最佳组合方式开展研究,发现当风电占比在 50%时达到最优,而太阳能和波浪能发电量占比与总发电量的变化有关:当总发电量小于总需求电量的 20%时,太阳能发电占 40%、波浪能发电占 10%;当总发电量大于总需求电量的 80%时,太阳能发电占 20%、波浪能发电占 30%。同时认为多能互补是解决各种能源波动的较好方式。

Halamay 等^[26]分析靠近犹他州的邦纳维尔的太平洋西南部海域的风能、太阳能和波浪能混合发

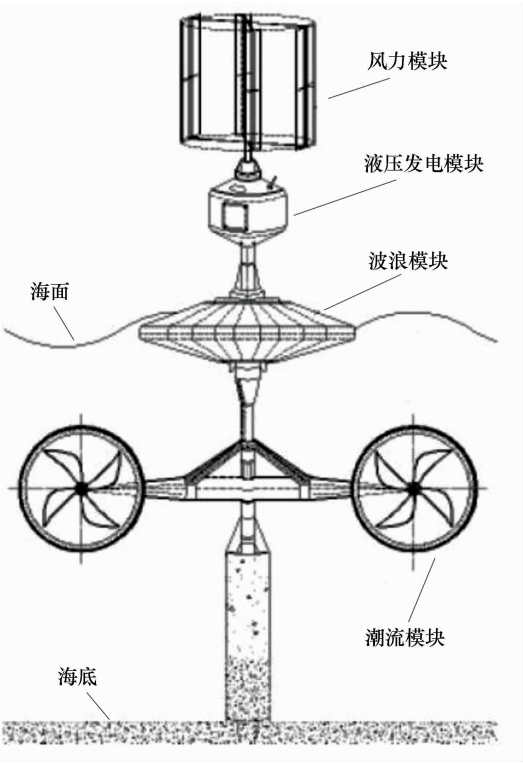


图 8 基于液压能的混合发电装置

2.4 其他多能互补装置

胡佳林^[21]提出一种利用海洋温差能和风能联合发电的装置。由于表层和深层海水的温差较小、能量利用率低,结合风能发电驱动热泵增大大海水温差可提高温差能发电效率,实现海洋温差能和风能

电对电能储备装置的影响,与单独风力发电相比,采用多能互补的方式可以减少发电系统所需电力储备装置的容量,并且可以降低各种能量波动对系统的影响。Astariz 等^[27]对潮汐能、波浪能和海上风能的发电成本进行分析,结果表明每种海洋能源的发电成本均远高于常规能源的发电成本,但利用多能互补的协同效应可降低单位资金投入和维护费用,提高系统电能输出的稳定性,从而降低海洋能源的发电成本。

张熙霖等^[28]对山东即墨大管岛的风能、太阳能和波浪能的多能互补系统进行研究并构建相关发电系统(图 9),指出可再生能源的优化配置是解决海岛用电问题的有效途径。

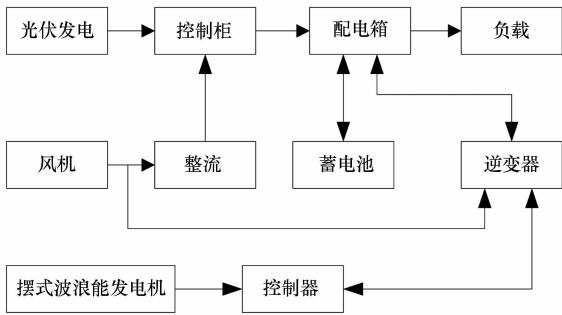


图 9 大管岛风力/光伏/波浪能发电系统

熊焰等^[29]对大管岛的多能互补系统开展进一步的研究,提出系统电能的输出、并流、储能和用户负荷的设计思路,并针对电力需求与波浪能、太阳能、风能资源的季节性变化进行多能互补的供电效果分析,提出在用电较少的冬季关闭低效率的波浪能发电系统,而在夏季用电高峰时再开启的策略。目前由国家海洋技术中心承担的总装机容量为 205 kW(波浪能 130 kW、风能 60 kW、太阳能 15 kW)的大管岛多能互补示范电站已正式投入运行。

珠海市担杆岛可再生独立能源电站采用海上风能、波浪能、太阳能多能互补的形式,并以柴油机发电作为备用、以海水淡化装置作为可控负载,根据资源特征设计 5 kW 太阳能电池、10 kW 波浪能发电和 90 kW 风电机组,以及 100 kW 备用柴油发电机、30 kW 海水淡化装置^[30]。陈一诚等^[31]对舟山嵊泗县嵊山岛的波浪能、太阳能和风能多能互补发电系统开展研究,分析系统在经济性、环境效益

和可靠性影响下的多能配置方案,通过对系统年发电曲线和海岛年负荷曲线的比较分析,确定备用柴油发电系统的容量。中国海洋大学联合多家单位对青岛市斋堂岛潮流能、风能和太阳能 500 kW 多能互补示范工程开展研究^[32]。

由于海洋能、风能、太阳能的间歇性和波动性,多能互补系统的电力输出仍然存在较大的波动,而用户的电力需求是相对稳定的,因此在实际应用时往往需要配备储能系统以调节发电和用电之间的平衡,从而提高可再生能源的利用率^[33]。众多学者对多能互补系统的储能方法和技术开展研究^[34-36]。

4 结语

海洋能是一种新型、清洁、可再生的能源,开发利用前景广阔,但普遍存在波动大、密度低的特点,单一能源的开发成本高、利用难,而多能互补方式是海洋能开发利用的有效方式。本文从各种海洋能的开发利用特点出发,综述各种共享发电平台的多能互补装置和分布式多能互补系统,发现:装置共享能大大减少硬件投资、降低发电成本,同时提高电能输出的稳定性;根据不同能源波动的差异性,构建分布式发电的多能互补系统并结合储能装置,可使电能稳定输出、实现海洋能的有效利用和并网。

参考文献

[1] 褚同金. 海洋能资源开发利用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

[2] 李书恒,郭伟,朱大奎. 潮汐发电技术的现状与前景[J]. 海洋科学,2006,30(12):82-86.

[3] 白杨,杜敏,周庆伟,等. 潮流能发电装置现状分析[J]. 海洋开发与管理,2016,33(3):57-63.

[4] 赵伟国,刘玉田,王伟胜. 海洋可再生能源发电现状与发展趋势[J]. 智能电网,2015,3(6):493-499.

[5] 姚琦,王世明,胡海鹏. 波浪能发电装置的发展与展望[J]. 海洋开发与管理,2016,33(1):96-92.

[6] 李居跃,何宏舟. 波浪能采集装置技术研究综述[J]. 海洋开发与管理,2013,30(10):67-71.

[7] 苏佳纯,曾恒一,肖钢,等. 海洋温差能发电技术研究现状及在我国的发展前景[J]. 中国海上油气,2012,24(4):84-98.

[8] 刘伯羽,李少红,王刚. 盐差能发电技术的研究进展[J]. 可再生能源,2010,28(2):141-144.

- [9] PÉREZ-COLLAZO C, GREAVES D, IGLESIAS G. A review of combined wave and offshore wind energy[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42(42): 141–153.
- [10] MULIAWANA M J, KARIMIRAD M, MOAN T. Dynamic response and power performance of a combined spar-type oating wind turbine and coaxial oating wave energy converter[J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 47–57.
- [11] BORG M, COLLU M, BRENNAN F P. Use of a wave energy converter as a motion suppression device for floating wind turbines[J]. *Energy Procedia*, 2013, 35(9): 223–233.
- [12] LEFEBVRE S, COLLU M. Preliminary design of a floating support structure for a 5 MW offshore wind turbine[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 40: 15–26.
- [13] ASTARIZ S, PÉREZ-COLLAZO C, ABANADES J, et al. Towards the optimal design of a co-located wind-wave farm[J]. *Energy*, 2015, 84: 15–24.
- [14] Green Ocean Energy. Green Ocean Energy Wave Treader, United Kingdom[EB/OL]. (2011–05–30)[2016–06–23]. <http://www.power-technology.com/projects/greenoceanenergywav/greenoceanenergywav2.html>.
- [15] 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.
- [16] 魏东泽, 吴国荣, 郭欣, 等. 潮流能开发技术研究进展[J]. *可再生能源*, 2014, 32(7): 1067–1074.
- [17] RAHMAN M L, SHIRAI Y. Hybrid offshore-wind and tidal turbine (HOTT) energy conversion (6-pulse GTO rectifier and inverter)[C]//IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore: IEEE, 2008: 650–655.
- [18] RAHMAN M L, OKA S, SHIRAI Y. Hybrid power generation system using offshore-wind turbine and tidal turbine for power fluctuation compensation (HOT-PC)[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1(2): 92–98.
- [19] 秦川, 鞠平, 闻丹银, 等. 近海可再生能源综合发电的系统构建与并网方式[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(13): 2013–2021.
- [20] 柳博瀚, 付宗国, 颜盛汉, 等. 黄聪汉新型海洋能综合利用发电平台设计[J]. *科技创新与应用*, 2015(35): 30–31.
- [21] 胡佳林. 一种海洋能及风能联合发电装置[J]. *东方汽轮机*, 2014(3): 55–59.
- [22] 杨先亮, 黄文辉, 秦志明. 全天候工作海洋温差能—太阳能联合热发电系统[J]. *节能*, 2015(6): 33–37.
- [23] STRAATMAN P J T, WILFRIED G J H, MVAN S. A new hybrid ocean thermal energy conversion shore solar pond (OTEC-OSP) design: a cost optimization approach[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(6): 520–527.
- [24] 刘伟民, 陈风云. 海洋温差能发电现状综述[C]//中国可再生能源学会海洋能专业委员会第三届学术讨论会论文集. 西安: 中国可再生能源学会, 2010: 185–194.
- [25] LUND H. Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(4): 503–515.
- [26] HALAMAY D A, BREKKEN T K A, SIMMONS A, et al. Reserve requirement impacts of large-scale integration of wind, solar, and ocean wave power generation[J]. *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, 2011, 2(3): 1–7.
- [27] ASTARIZ S, VAZQUEZ A, IGLESIAS G. Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind energy[J]. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2015, 7(5): 320–333.
- [28] 张熙霖, 武鑫, 吴志民, 等. 风力/光伏/波浪能混合发电系统的应用研究[J]. *可再生能源*, 2004(2): 42–44.
- [29] 熊焰, 王海峰, 崔琳, 等. 大管岛多能互补独立供电系统总体设计研究[J]. *海洋技术*, 2008, 27(4): 78–82.
- [30] 王坤林, 游亚戈, 张亚群. 海岛可再生独立能源电站能量管理系统[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(14): 13–17.
- [31] 陈一诚, 王志新. 适用于海岛的独立供电电源规划设计[J]. *电网与清洁能源*, 2013, 29(4): 78–84.
- [32] 邵萌. 海洋能多能互补智能供电系统总体开发方案研究及应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [33] 赵波, 王成山, 张雪松. 海岛独立型微电网储能类型选择与商业模式探讨[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(4): 21–27.
- [34] 武震. 分布式储能系统关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [35] 陈海生, 刘畅, 齐智平. 分布式储能的发展现状与趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2016(2): 224–231.
- [36] 赵阳, 董永军, 郭景富, 等. 一种应用于海岛多能互补发电系统的新型储能状态估计方法的实现[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(5): 872–880.