

基于海洋能的淡-氢联供系统方案及仿真模拟

刘宏伟,任和,李伟

浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室,杭州 310027

摘要 能耗与淡水资源是制约电解水制氢发展的瓶颈问题,利用海洋能发电来制取淡水及氢气,是实现海能海用、海洋效益最大化的重要途径之一。提出一种潮流能发电制取淡水和氢气的集成技术方案。海水淡化后首先满足生活需求,冗余的淡水用于电解制氢。为验证系统方案的可行性,建立了系统模型并进行了仿真和部分试验验证,重点对发电装备的能量控制策略和制氢单元的高效能控制方法进行了研究,以 60 kW 潮流能发电机组单机系统为例,仿真结果表明,基于潮流能发电的制淡制氢系统具有较好的稳定性且理论上可日产淡水约 90 t,同时制取氢气约 55 Nm³。

关键词 海洋能发电;淡氢联供;能量控制

近年来,中国的海洋能发电技术取得了显著进展,潮流能和波浪能已进入百千瓦级机组的海上示范运行阶段,而兆瓦级机组乃至潮流能发电场的建设也进入设计或规划阶段,如中国科学院广东能源研究所的 100 kW 鹰式波浪能^[1]、浙江大学 650 kW 水平轴潮流能发电装置^[2]等。输配电系统是海洋能发电装备的重要组成部分,然而昂贵的海上电缆及施工成本严重制约了分布式海洋能发电技术的发展^[3]。如果将海洋能或其转换后的电力就地使用,实现“海能海用”,可有效提升海洋能装备的经济效益和社会生态效益。

利用海洋能制淡、制氢是开拓海洋能与海水资

源综合利用的新途径^[4]。通过海洋能直接进行海水淡化,并利用海洋能发出的电力进行电解制氢,在获得宝贵淡水的同时制取氢燃料,建成海上淡水与氢气综合供给站,从而解决沿海地区或无水无燃料岛屿岛礁的淡水和燃料供给问题。目前国际上这方面的研究尚处于起步阶段,如何将海洋能发电装备与制淡制氢有效集成形成高效能、高可靠的示范系统意义重大。事实上利用海上风能制氢已在国际上得到了极大的重视,如近年来法国 ENGIE 制定的 4 GW 海上风机制氢项目^[5]、荷兰基于油气平台建成的全球首个海上风电制氢项目 PosHYdon 项目^[6]等,欧洲海洋能中心也计划开展海洋能制氢

收稿日期:2020-10-12;修回日期:2020-12-21

作者简介:刘宏伟,副教授,研究方向为海洋能及风能发电装备的机电液技术,电子信箱:zju000@163.com

引用格式:刘宏伟,任和,李伟. 基于海洋能的淡-氢联供系统方案及仿真模拟[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 66-71; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.009

方面的研究。

与应用常规电力制取淡水和氢气不同,用具有明显间歇性特点的风能或海洋能制取氢气时,由于发电装备输出功率和供给电压的不断波动,往往会导致制氢设备无法工作在高效率工况点。Dutton等^[7]开发了一套风电制氢系统,发现波动的输入功率会导致电解槽效率下降,同时对风力机的运行策略进行修改以产生平滑的功率输出。Aouali等^[8]建立了电解槽的数学模型,在实验验证的基础上分析不同工作温度对其极化曲线的影响。Guilbert等^[9]设计了一种多电解槽单元的风电制氢系统,使最大数量电解槽在额定功率下运行,以提高法拉第效率。有必要对间歇性能源制氮制氢的系统优化集成设计方法和稳定运行控制策略进行研究,实现系统低成本、机组高效率、制淡制氢高效能等目标。基于此,基于前期的潮流能和制淡制氢负载的功率特性,提出潮流能制淡制氢系统方案,以60 kW机组为例,进行系统方案设计和建模,并通过仿真验证所提方案的可行性。

1 潮流能功率特性及淡氢负载特性

潮流能的能量捕获特性与风力机类似,机组发电功率与流速的立方成正比,即

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 c_p \quad (1)$$

式中, P 为叶轮捕获功率; ρ 为海水密度; R 为叶轮半径; v 为潮流流速; c_p 为叶轮的功率捕获系数。

图1为浙江大学650 kW机组的功率输出特性,可以看出功率随流速的变化趋势,即使针对特定的流速,由于湍流作用、水流与叶片的耦合非线性等也会导致机组输出功率的不稳定。

然而潮流能发电机组的输出功率的大小不仅与来流流速有关,而且与叶轮转速 ω 、叶片安装角 β 有很大的关系。当来流流速小于机组额定功率对应的流速时,需要控制叶轮转速使其运行在最佳尖速比 λ (叶尖线速度与来流流速之比 $\omega R/v$)状态下,此时叶轮才能捕获最大的功率(图2),这也是机组高效运行的必要条件之一。当来流流速大于额定

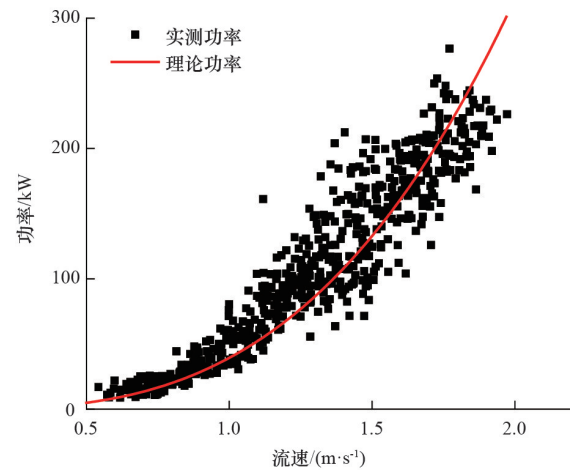


图1 潮流能机组的功率输出特性

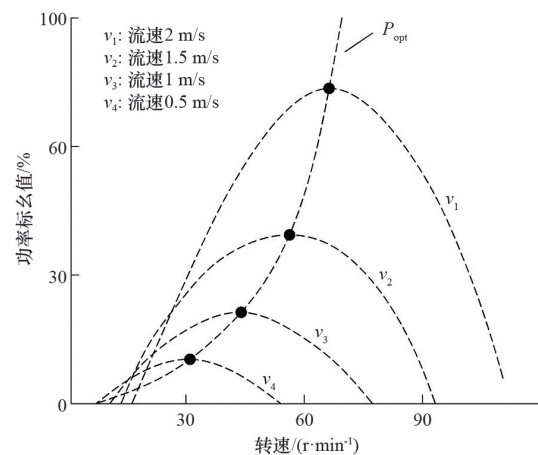


图2 潮流能机组最大功率运行曲线

流速时,为保护机组安全,通常采用变桨的方式使其运行在额定功率附近,极端情况下使用电气/液压制动使机组停机。限于篇幅,仅考虑机组正常运行时的功率调节和制淡制氢系统的应用,二者相辅相成。

图3为实现机组最佳功率捕获时的整机控制策略,其原理是通过控制发电机的负载转矩,间接调节叶轮的转速使其运行在最佳尖速比附近。为了使潮流能制淡制氢系统效能最大化,需要针对潮流能机组的最佳功率捕获特性,制定合理的负载搭配及其切入切出控制策略。从电解效率、总制氢效率及技术成熟度考虑,拟采用反渗透膜(RO)制取淡水与质子交换膜(PEM)电解制氢相结合的方案。图4所示为单个质子交换膜电解制氢单元的负载

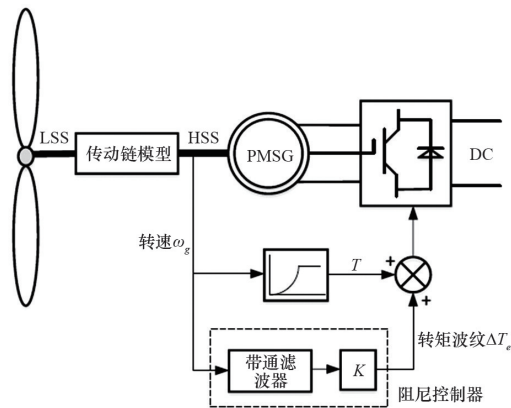


图3 潮流能机组控制策略

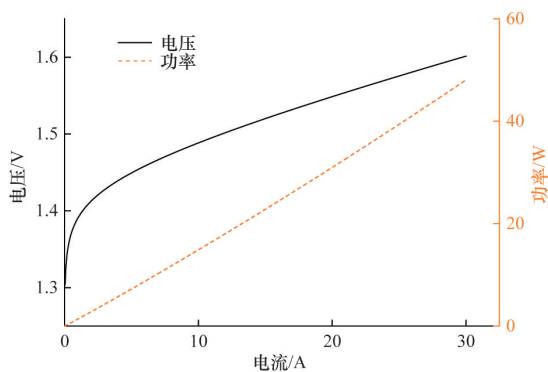


图4 质子交换膜电解制氢单元的负载特性

特性^[10]，可以看出，电解槽在初始阶段需要建立电解电压外，其功率特性与电流近似成正比，从而为发电机组功率调节提供了较好的条件。与电解制氢装置的功率特性相比，RO制淡系统的负载特性取决于制淡系统的压力和流量，故对于潮流能发电机组而言，也可以通过调节制淡系统的压力或流量实现对潮流能机组的功率控制。具体潮流能机组功率调节方案将取决于淡氢联供系统的拓扑结构和控制系统方案。

2 基于潮流能的淡氢联供系统设计

以常用的反渗透膜海水淡化为例，通过潮流能制淡有两种拓扑结构，其一是利用发电机组将潮流能转化为电能，再通过电动机、高压泵来对海水增

压^[11]。该过程中发电机组输出功率通过蓄电池、超级电容等能量存储元件进行功率波动抑制后，再带动电动机。利用该方式可以给反渗透系统一个较为稳定的能量供应，反渗透系统可以工作在高效区间，并且减少系统维护成本，延长使用寿命，缺点是能量转换环节较多。另一种方式是用潮流能机组的机械能直接驱动高压泵为海水增压并透过反渗透膜^[12]，该方案的优点是减少了能量转换环节，提高了系统的能量利用率，但由于潮流能机组捕获的功率会随潮流流速波动，导致反渗透部分的功率会发生较大的变化，而过于剧烈的功率变化会对渗透膜造成一定的潜在损伤。基于上述方案比较，制定了潮流能机械直驱海水淡化与质子交换膜电解制氢相结合的淡氢联供系统方案，如图5所示。

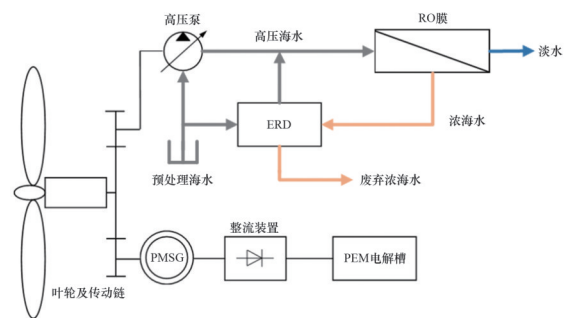


图5 基于潮流能装备的淡氢联供系统方案

在图5方案中，制淡水用的高压泵采用轴向变量柱塞泵，可通过变排量调节对叶轮转速控制，从而保证机组的最大能量捕获。系统的工作原理为，叶轮在潮流的驱动下旋转，通过增速机构带动并联布置的高压变量泵和发电机工作，实现功率的分流。高压变量泵将预处理后的海水泵入反渗透膜进水口处，海水进入膜组进行淡化，产出的淡水被存储收集；浓海水从反渗透膜进入能量回收装置（ERD），利用压力交换式能量回收系统将高压浓海水的压力能用于原料海水的供给。这里反渗透膜组件采用单级单段结构，回收率较低，但浓差极化风险较小，减少膜结垢的概率，适用于海水淡化。发电机输出端接整流调压装置，直接与PEM电解槽耦合。

3 60 kW 淡氢联供系统建模及仿真

根据前面所述的叶轮能量捕获原理、PEM 电解槽、反渗透膜负载特性及淡氢联供整机系统方

案,以现有的 60 kW 潮流能机组为例,在 AMESim 和 Simulink 中搭建潮流能淡氢联供系统的联合仿真模型(图 6),整个系统模型包括了叶轮机模型、电解系统模型和制淡系统模型(图 7)。

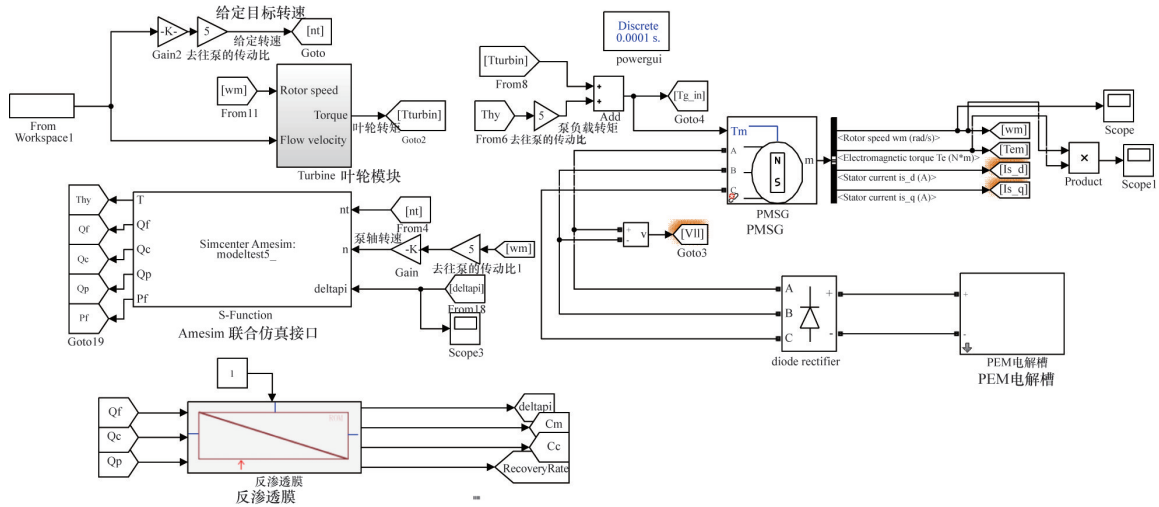


图 6 AMESim-Simulink 联合仿真模型

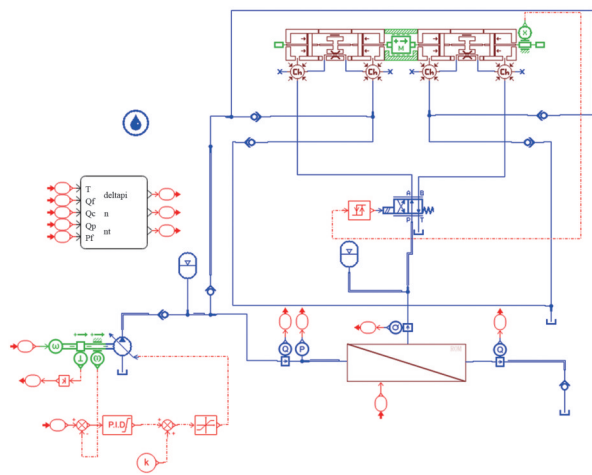
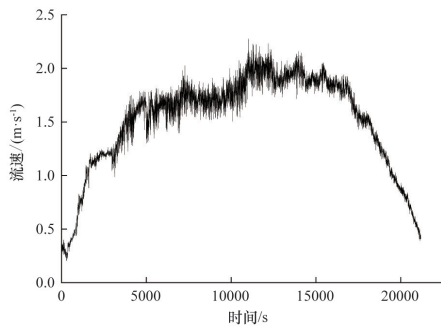


图 7 AMESim 制淡子系统仿真模型

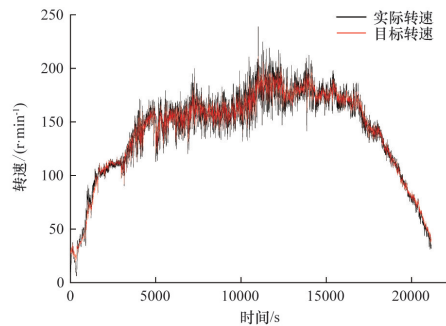
在制淡水子模型系统中,考虑到回收效率,采用液压增压缸作为浓海水压力的能量回收组件,其工作过程可以由一个两位四通方向阀来控制。

为验证潮流能系统最大能量捕获控制与淡氢联产系统的可行性,以舟山市某海域实测的潮流流速作为仿真模型的输入流速。以 6 h 退潮周期的流速数据为例,得到潮流能机组的叶轮转速跟踪曲线及功率捕获系数 C_p 、各环节的功率分配曲线如图 8 所示。

由图 8(b)可以看出,随着海流流速的波动,叶轮实际转速可以较好地跟踪给定目标转速,从而实现了机组的最大能量捕获,这在图 8(d)中也得到



(a) 潮流流速曲线



(b) 转速跟踪曲线

图 8 潮流能机组的运行功率特性

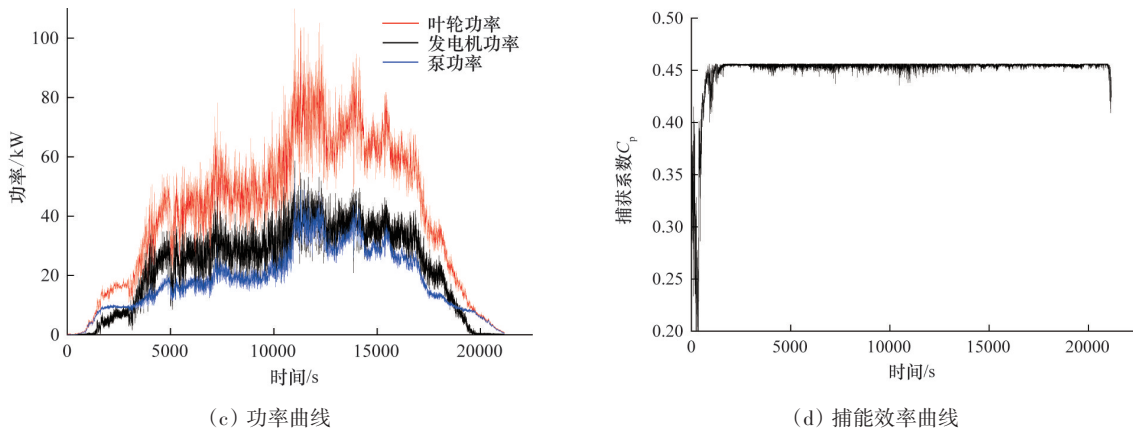


图8 潮流能机组的运行功率特性(续)

了较好的验证,仿真结果表明叶轮的捕获系数可以达到0.45左右。图9给出了这一个运行周期内的仿真得到的淡水及氢气产量数据,可以看出,6 h内叶轮捕获能量折算为238.5 kW·h,总淡水产

量累计达到约45 m³,产氢量累计达到约27.9 Nm³,系统具有较高的能量利用率,但在实际中受器件特性的影响,能量利用率会有所变化。

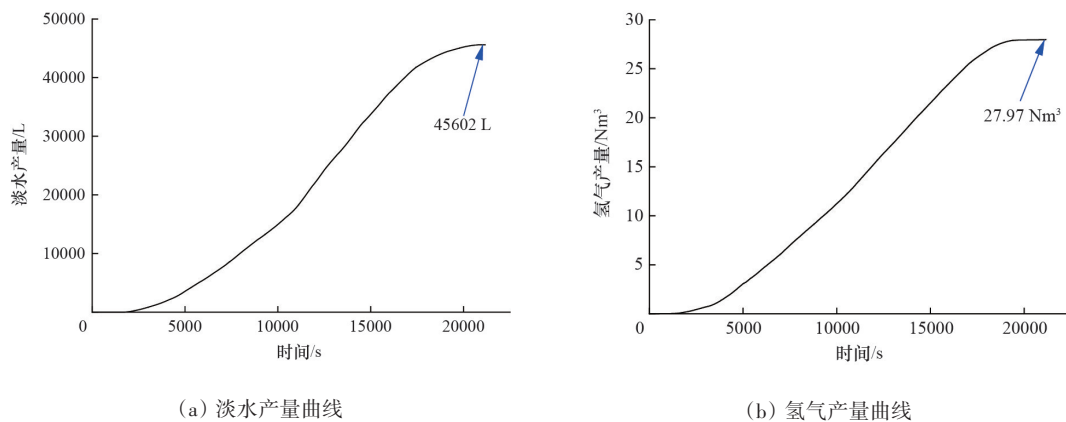


图9 潮流能淡氢联供系统淡水和氢气产量仿真结果

4 结论

将海洋能发电技术、海上制淡、制氢技术相结合,提出一种基于潮流能发电的淡氢联供应用系统方案。在分析潮流能机组功率特性、淡氢负载特性的基础上,完成了潮流能淡氢联供技术方案和参数设计,并以60 kW潮流能机组为例,通过仿真验证了系统的可行性,在理想负载模型的情况下,机组在一个发电周期内(半日潮6 h)可产淡水约45 t,同时可制取氢气28 Nm³,基本可满足一个小型岛礁的日常生活需要。

然而不可否认,实际系统需要根据所选部件的特性,考虑系统的沿程压力损失、输出背压、元件效率乃至温度变化等方面的影响因素,故后续的研究将围绕实验展开,形成的研究成果将有望拓展海洋能应用,显著提升中国沿海岛屿或远洋岛礁的综合开发水平。

参考文献(References)

- [1] 盛松伟,张亚群,王坤林,等. 鹰式装置“万山号”总体设计概述[J]. 船舶工程, 2015, 37(增刊1): 10-14.

- [2] Li Y, Liu H, Lin Y, et al. Design and test of a 600-kW horizontal-axis tidal current turbine[J]. *Energy*, 2019, 182: 177-186.
- [3] Effiom S O, Nwankwojike B N, Abam F I. Economic cost evaluation on the viability of offshore wind turbine farms in Nigeria[J]. *Energy Reports*, 2016, 2: 48-53.
- [4] 李伟, 杨易嘉, 顾亚京, 等. 基于海洋能的海水资源综合利用研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(6): 33-38.
- [5] 氢能观察[EB/OL]. [2020-05-31]. <http://chuneng.ne21.com/show-15511.html>.
- [6] Peters R, Vaessen J, Van D M R. Offshore hydrogen production in the north sea enables far offshore wind development[C]. *Annual Offshore Technology Conference*, Houston, May 4-7, 2020.
- [7] Dutton A G, Bleijs J A M, Dienhart H, et al. Experience in the design, sizing, economics, and implementation of autonomous wind-powered hydrogen production systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000, 25 (8): 705-722.
- [8] Aouali F Z, Becherif M, Ramadan H S, et al. Analytical modelling and experimental validation of proton exchange membrane electrolyser for hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(2): 1366-1374.
- [9] Guilbert D, Gianpaolo V. Improved hydrogen-production-based power management control of a wind turbine conversion system coupled with multistack proton exchange membrane electrolyzers[J]. *Energies*, 2020, 13(5): 1239.
- [10] Falcão D S, Pinto A M F R. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121184.
- [11] Mito M T, Ma X H, Albuflasa H, et al. Reverse osmosis (RO) membrane desalination driven by wind and solar photovoltaic (PV) energy: State of the art and challenges for large-scale implementation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 112: 669-685.
- [12] Jarquin-Laguna A, Greco F. Integration of hydraulic wind turbines for seawater reverse osmosis desalination [C]/2019 Offshore Energy and Storage Summit. Brest: IEEE, 2019, doi: 10.1109/OSES.2019.8867343.

Design and simulation of an ocean energy based desalination-hydrogen cogeneration system

LIU Hongwei, REN He, LI Wei

State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract The energy and fresh water resources restrain the development of the hydrogen production by the electrolysis of the water. The production of the fresh water and the hydrogen by using the ocean energy can best use the marine resources. An integrated system is proposed for generating the fresh water and the hydrogen from the tidal current energy to meet the daily requirement of the fresh water and also the demand of the hydrogen produced from the water by the electrolysis. A simulation model is established to verify the feasibility of the system. The control strategy of the power generation equipment and the operation mode for high efficiency is discussed. The simulation results of a 60 kW tidal current power generator integrated with the reverse-osmosis units and the electrolyzers show that the system enjoys a good stability and can theoretically produce about 90 tons of the fresh water and about 55 Nm³ of the hydrogen per day.

Keywords tidal current energy conversion; desalination-hydrogen cogeneration; energy management ●



(责任编辑 刘志远)