

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.01.012

海上风力潮流联合发电系统的容量配置研究

胡恩德, 杨欢*, 赵荣祥, 郑太英
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对海上可再生能源的有效利用问题,对新型海上风力潮流联合发电系统进行了研究。定性分析了海上风电与潮流发电在时间、空间上的互补性,简要分析了二者共用桩柱式基础平台的优势。分析了海上风力潮流联合发电系统的拓扑,建立了系统的仿真模型,介绍了系统的主要评价指标。以舟山龟山水道为例,利用 HOMER 软件对风力潮流联合发电系统进行了容量配置的寻优。研究表明:在满足所设定的约束条件时,风力潮流联合发电系统具有更好的经济性;灵敏度分析结果表明了风力、潮流独立发电与风力潮流联合发电系统的适用情况。

关键词:海上风力潮流联合发电;容量配置;HOMER;灵敏度分析

中图分类号:TM614

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)01-0062-06

Capacity allocation of hybrid offshore wind and tidal current power generation system

HU En-de, YANG Huan, ZHAO Rong-xiang, ZHENG Tai-ying
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at using offshore renewable energy effectively, hybrid offshore wind and tidal current power generation system was researched. Complementarity of offshore wind and tidal current power was analyzed from the perspective of time and space qualitatively, and advantages of the pile platform common used by the two generation systems were explained briefly. Topology of hybrid offshore wind and tidal current power generation system was analyzed, simulation model of the system was build, and main evaluation indexes were introduced. Capacity allocation optimization of hybrid offshore wind and tidal current power generation system in Guishan waterway of Zhoushan was accomplished by HOMER. Sensitivity analysis of wind and tidal current speed was conducted. The optimization results indicate that hybrid offshore wind and tidal current power generation system is more cost-effective when the system satisfies the set constraint condition. The results illustrate the applicability of offshore wind power generation system, tidal current power generation system and hybrid offshore wind and tidal current power generation system.

Key words: hybrid offshore wind and tidal current power generation system; capacity allocation; HOMER; sensitivity analysis

0 引言

海洋蕴含着巨大的能量^[1]。开发利用海洋能的主要形式有海上风电、潮汐能发电、潮流能发电和波浪能发电等^[2]。海上风电项目受到陆上风电项目的带动,研究与开发起步较早^[3]。1991年,丹麦建立第

一个海上风电工程,到2001年海上风电已进入商业化示范阶段^[4]。到2015年,全球海上风电总装机容量已达12 GW^[5],预测到2020年,全球海上风电总装机容量将达55 GW^[6]。截止到2015年底,我国已完成安装海上风机总装机容量超过1 000 MW,在建2 300 MW,待开工1 240 MW^[7]。但是海上风电发展

收稿日期:2017-05-02

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401044)

作者简介:胡恩德(1993-),女,山西忻州人,硕士研究生,主要从事新能源并网方面的研究。E-mail: ende_hu@zju.edu.cn

通信联系人:杨欢,男,副教授,博士生导师。E-mail: yanghuan@zju.edu.cn

也存在一些瓶颈问题,主要是安装维护费用较高,造价约为陆上风电的2倍^[8],且海上风力单一能源发电时,出力波动性较大,可预测性较差,海上风电接入电网将直接影响陆地电网的电压稳定与功率平衡^[9]。而另一种成功应用的海洋能-潮流能输出能量的波动具有周期性,便于预测^[10]。因此,海上风力潮流联合发电系统开始引起人们的关注,Rahman等^[11]提出了一种海上风力潮流联合发电系统(HOTT),给出了一种新颖的系统布局方式与发电控制方式,可以有效降低系统总成本,并提高出力稳定性;在此基础上,通过控制潮流电机的转速和逆变器频率使得潮流电机在发电状态和电动状态平滑切换,从而可以补偿风功率的波动,使得系统输出功率更加平滑^[12];文献[13]中提出了一种带有飞轮储能装置的海上风力潮流联合发电系统,并通过仿真验证了该系统的动静态稳定性。

本研究主要进行海上风力潮流联合发电系统的容量配置的研究。

1 海上风力潮流联合发电系统的特点

浙江海上风能和潮流能具有较好的互补特性。从时间上来看,以舟山为例,该市岱山县衢山岛月平均风速如图1所示^[14]。

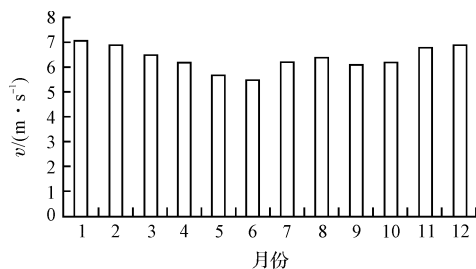


图1 舟山市岱山县衢山岛月平均风速图

该市岱山县龟山航门水道月平均潮流流速如图2所示^[15-16]。

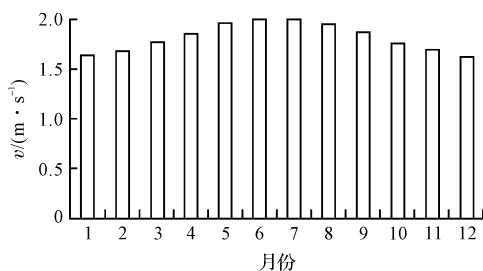


图2 舟山龟山航门水道月平均潮流流速图

可以看出,将风能和潮流能联合利用有利于提高发电系统的出力稳定性。

2020年前,舟山市规划近海风电场总容量为

1 550 MW^[17]。同样,舟山市潮流能资源也十分丰富,海上风电和潮流发电的地理位置接近,将二者建立在同一平台可有效降低建设成本。考虑到装置的可靠性和安全性,一般采用基础强度较高的桩柱式基础平台结构^[18]。

风潮联合发电系统平台示意图如图3所示^[19]。

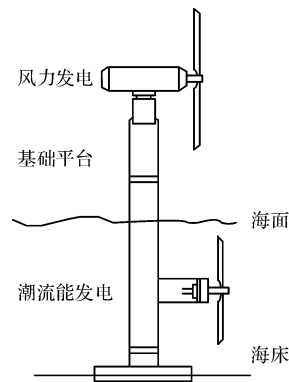


图3 风力潮流联合发电系统平台示意图

风轮机和潮流水轮机采用发电效率较高的水平轴式涡轮机。风力发电和潮流发电的发电机类型主要有双馈感应电机和永磁同步电机。

2 海上风力潮流联合发电系统的建模

海上风力潮流联合发电系统的组网方式分为直流母线组网方式、交流母线组网方式和交直流混合母线组网方式^[20]。直流母线组网方式不存在各分布式电源同步并网的问题,且使用统一的DC/AC变换器,采用直流母线可以增强系统的可控性与抗扰性。因此,该系统采用直流母线组网方式。海上风力潮流联合发电系统包括风力发电机、潮流发电机、蓄电池、逆变器、负荷、电网,系统拓扑如图4所示。

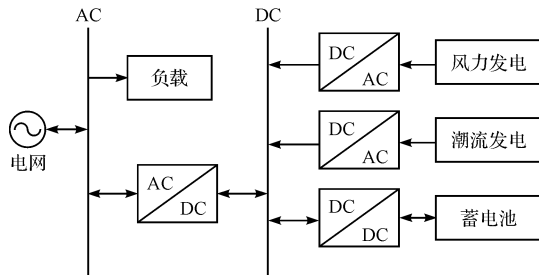


图4 系统拓扑

2.1 风速模型

风机的输出功率与风速的大小密切相关。短时间内,风速的变化是随机的,从长期来看,风速的概率分布可以用威布尔分布来模拟^[22],威布尔分布的概率密度如下式所示:

$$f(v) = \begin{cases} \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] & v \geq 0 \\ 0 & v < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: v —实际风速; k —形状参数; c —尺度参数。

2.2 风力机模型

风力机的叶片半径为 r_w , 空气密度为 ρ_w , 风速为 v_w , 由风轮机空气动力学可知, 风力机轴上输出的机械功率如下式所示^[23]:

$$P_{wt} = 0.5 \rho_w C_{pw}(\lambda_w, \beta_w) \pi r_w^2 v_w^3 \quad (2)$$

式中: $C_{pw}(\lambda_w, \beta_w)$ —风能利用系数; λ_w —风机的最佳叶尖速比; β_w —风机的桨距角。

稳态运行条件下变桨距风机输出功率与风速的关系可用如下式所示的分段函数近似表示^[24]:

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ \frac{P_r (v^2 - v_{ci}^2)}{(v_r^2 - v_{ci}^2)} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中: v —实际风速; v_{ci} —切入风速; v_{co} —切出风速; v_r —额定风速; P_r —风力发电机组额定输出功率。

2.3 潮流流速模型

潮流流速的波动具有周期性。潮流流速存在半日、半月、月、年、18.61 年等多个周期, 本研究考虑半日周期、半月周期和年周期。忽略流速的不对称性, 潮流流速的变化规律可由下式表示:

$$V_t = V_m \left(1 + k \sin \frac{2\pi t}{T'}\right) \sin \frac{2\pi t}{T} \left(1 + k' \sin \frac{2\pi t}{T''}\right) \quad (4)$$

式中: V_m —指平均最大流速; k, k' —波动系数; T'' —年周期 ($T'' = 8\,760\text{ h}$); T' —大小潮周期 ($T' = 354\text{ h}$ 22 min 14 s); T —潮流周期 ($T = 12\text{ h}$ 25 min 14 s)。

2.4 潮流电机模型

潮流电机的出力特性与风力机类似, 潮流能水轮机的叶片半径为 r_t , 海水密度为 ρ_t , 海水流速为 v_t , 则叶轮轴上输出的机械功率为:

$$P_u = 0.5 \rho_t C_{pt}(\lambda_t, \beta_t) \pi r_t^2 v_t^3 \quad (5)$$

式中: $C_{pt}(\lambda_t, \beta_t)$ —潮流能利用系数; λ_t —潮流能水轮机的最佳叶尖速比; β_t —水轮机的桨距角。

3 联合发电系统的评价指标

3.1 年度容量缺额比例

年度容量缺额比例表征系统的供电可靠性, 是联合发电系统设计的主要评价指标之一, 其表示方式如

下式所示^[25]:

$$f_{ACS} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{\text{loss}}(t_i)}{\sum_{i=1}^N P_{LD}(t_i)} \quad (6)$$

$$P_{\text{loss}}(t_i) = \begin{cases} P_L(t_i) - P_{La}(t_i) & P_L(t_i) > P_{La}(t_i) \\ 0 & P_L(t_i) \leq P_{La}(t_i) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{loss}}(t_i)$ —第 i 个小时的功率缺额; $P_{LD}(t_i)$ —第 i 个小时的负荷功率; $P_L(t_i)$ —第 i 个小时的负荷功率与运行备用功率之和; $P_{La}(t_i)$ —第 i 个小时风力机、潮流电机、电网、蓄电池可以提供的功率之和; N —一年中的采样点数, 取 8 760。

3.2 可再生能源供电比例

可再生能源供电比例表征系统的可再生能源利用率, 其表示方式为:

$$f_{re} = \frac{W_{wt} + W_u}{W_{wt} + W_u + W_{gd}} \quad (8)$$

式中: W_{wt}, W_u, W_{gd} —风力机、潮流机、电网的年度供电量。

3.3 系统成本

系统总净现成本 (net present cost, NPC) 是进行寻优的最主要经济性指标, 在进行仿真时, 首先得到满足系统约束条件的可行方案, 再按照 NPC 从小到大的顺序进行最优化排序。系统总净现成本为:

$$C_{NPC} = C_{\text{int}} + C_{\text{opt}} + C_{\text{rep}} + C_{\text{gdp}} + C_{\text{pet}} - C_{\text{gds}} - C_{\text{sav}} \quad (9)$$

式中: $C_{\text{int}}, C_{\text{opt}}, C_{\text{rep}}, C_{\text{gdp}}, C_{\text{pet}}, C_{\text{gds}}, C_{\text{sav}}$ —系统初始投资, 运行维护投资、设备更换投资、从电网购电投资、从电网购电造成等效污染处罚投资、售电给电网获得的收入、系统残值。其中系统残值为系统各设备残值之和, 设备残值定义为:

$$R_{\text{sav}} = C_{\text{repu}} \frac{R_{\text{rem}}}{R_{\text{comp}}} \quad (10)$$

式中: C_{repu} —某设备的更换投资; R_{rem} —该设备的剩余生存时间; R_{comp} —该设备的使用寿命。

需要注意的是计算 NPC 时要考虑折现率, 即将除初始年份外的其他年份的成本值按一定比例折算到初始年份, 折现率一般取 6%。

4 算例仿真分析

为了验证海上风力潮流联合发电系统的可行性, 基于 HOMER 软件, 以浙江舟山龟山水道为参考

区域,搭建了海上风力潮流联合发电系统的仿真模型。

算例中的负荷功率 P_{load} 利用 HOMER 软件的典型负荷曲线生成,平均负荷为 6.16 MW,峰值负荷为 20 MW。风速曲线由 HOMER 软件将舟山市岱山县衢山岛月平均风速数据按威布尔分布离散生成;潮流流速以岱山县龟山水道为例,最大流速取 3.76 m/s,忽略潮流不对称性, k 取 0.2, k' 取 0.1, V_m 取 2.86 m/s,按照式(4) 离散生成潮流流速曲线。

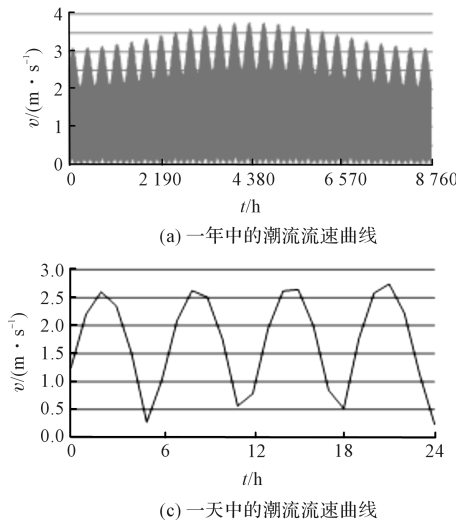


图 6 风速和潮流流速曲线

风力机采用华锐风电公司的 SL3 000/121 机型,风力机的出力曲线由式(3) 计算得到。现阶段海上风力发电造价为 16 000 元~22 000 元/kW^[26],本文取 19 000 元/kW,年运行维护费用取初始投资的 5%,生命周期取 20 年^[27]。

SL3000/121 风力机的参数如表 1 所示^[28]。

表 1 SL3000/121 风力机参数

参数	数值
额定功率/kW	3 000
初始成本/(万元/台)	5 700
更换成本/(万元/台)	5 700
运行维护成本/(万元/台/年)	285
轮毂高度/m	90
切入风速/(m·s ⁻¹)	3
额定风速/(m·s ⁻¹)	10.5
切出风速/(m·s ⁻¹)	22

软件中的成本计算以美元为单位,成本参数按照汇率 1 美元等于 6.88 元换算。潮流能发电水轮机采用 MCT 公司的 SeaGen-S 机型,其出力曲线由 HOMER 给出。潮流能发电的初始投资取 26 300 元/kW^[29],年运行维护费同样取初始投资的 5%,生命周期取

年负荷曲线如图 5 所示。

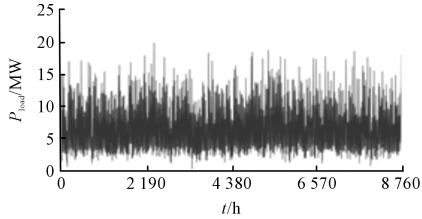
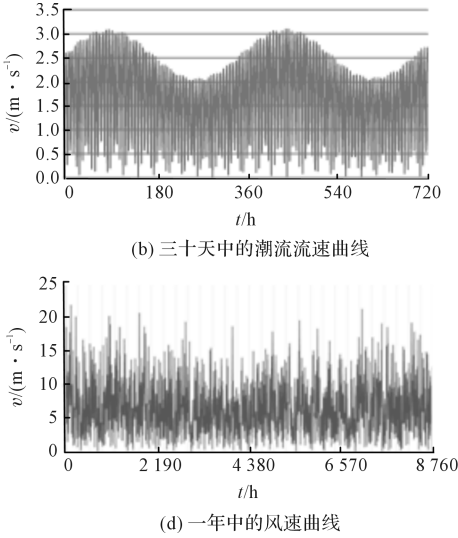


图 5 年负荷曲线

潮流流速和风速的曲线如图 6 所示。



20 年^[30]。

SeaGen-S 机型的参数如表 2 所示。

表 2 SeaGen-S 水轮机参数

参数	数值
额定功率/(kW)	2 000
初始成本/(万元/台)	5 259
更换成本/(万元/台)	5 259
运行维护成本/(万元/台/年)	263
使用寿命/年	20
切入潮流流速/(m·s ⁻¹)	1
额定潮流流速/(m·s ⁻¹)	2.5

蓄电池采用锂离子电池。

仿真中使用的逆变器参数^[31] 如表 3 所示。

表 3 逆变器参数

参数	数值
初始成本/(元·kW ⁻¹)	1 720
更换成本/(元·kW ⁻¹)	1 720
运行维护成本/(元/kW/年)	69
使用寿命/年	20
逆变器效率/(%)	90

蓄电池参数如表 4 所示。

表 4 蓄电池参数

参数	数值
电池容量/kWh	100
初始成本/(万元/台)	48.16
更换成本/(万元/台)	48.16
运行维护成本(万元/台/年)	6.88
使用寿命/年	15
充放电效率/%	90
完整充放电次数/次	3 000
初始充电状态	100%
最小电池深度/%	20

系统中设置向电网购电的最大功率设置为20 MW,购电价为0.66元/kWh^[32],电网回购电量的最大功率设置为20 MW,回购电价为0.85元/kWh^[33],忽略分时电价,采用平均电价。此外还需考虑购电等效污染物罚款,污染物排放量与对应罚款如表5所示。系统的生命周期取25年。该系统中的负荷为重要负荷,设置最大年度容量缺额比例为1%;为了充分利用可再生能源进行发电,本研究设置最小可再生能源供电比例为80%。

表 6 容量配置优化结果

风机数量	潮流电机数量	电池组数量	逆变器容量/kW	NPC/(百万元)	可再生能源供电比例	是否并网
6	1	0	20 000	603.4	80	是
6	1	1	20 000	604	80	是
8	0	0	20 000	611.6	81	是
8	0	1	20 000	612.3	81	是
0	10	0	20 000	659.1	82	是
0	10	1	20 000	659.8	82	是
3	8	437	20 000	1 465.4	100	否
0	11	688	20 000	1 706.2	100	否
4	4	0	20 000	635	86	是

表6中前8行为系统以NPC排序的优化结果。并网运行时,系统取6台风力机与1台潮流机时NPC最小,可再生能源供电比例为80%。当系统只有风力机时,系统需要8台风力机,可再生能源供电比例为81%;当系统只有潮流机时,系统需要10台潮流机,可再生能源供电比例为82%。可见风潮联合发电系统可以减少系统装机台数,减小系统所占水域面积,从而降低系统成本。

但NPC的值不是系统寻优的唯一指标,表6中最后一行为仿真结果中4台风力机与4台潮流机的方案。与NPC最小的方案相比,该方案的NPC值上升了约5%,但是采用该方案可以节省2台风机所占水域面积,且风力机和潮流机共用同一基础平台,总项目投资与维护费用都会有所下降,且该方案的可再生能源供电比例为86%,减少了向电网的购电量。在具体系统中,可以根据实际情况合理选择方案。

由于系统并网运行时,向电网售电可以获得更多

系统备用容量设置为当前负荷的10%加上风机输出功率的50%,以应对负荷与风机输出功率的波动。

表 5 污染物排放量与对应罚款

污染物种类	二氧化碳	二氧化硫	氮氧化物
污染物排放量/g·(kWh ⁻¹)	632	2.74	1.34
污染物罚款/(元/吨)	10	1 000	2 000

本研究在以上设置的基础上对系统进行寻优仿真。HOMER软件中系统的整体结构如图7所示。

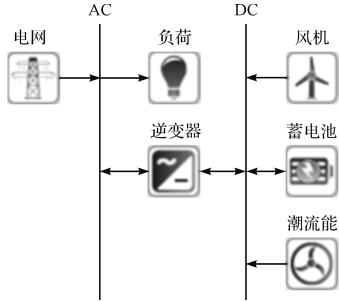


图 7 系统整体结构

容量配置优化结果如表6所示。

的经济利益,且增加蓄电池的投资较大。在系统独立运行时,为了满足最大年度容量缺额比例的约束,必须向系统添加蓄电池。此时系统的NPC值远大于并网运行时的值。

HOMER软件可进行对系统参数的灵敏度分析,在本系统中对风速和潮流流速进行灵敏度分析可为实际系统的方案选择提供重要判断依据。

灵敏度分析结果如图8所示。

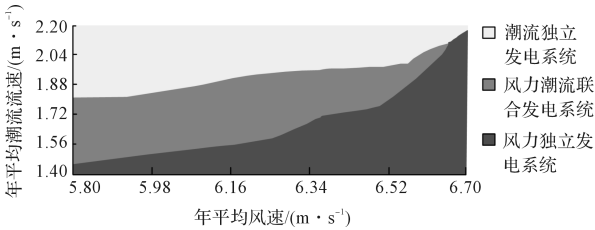


图 8 灵敏度分析结果

在具体系统中,可根据相应海域风速及潮流流速数据选择合适的发电方案。

5 结束语

本研究从时间和空间角度定性分析了海上风电和潮流发电的互补性,说明了二者联合发电平台的优势;并以其龟山为例,应用 HOMER 对风力潮流联合发电系统进行了寻优和灵敏度分析。

结果表明:在满足所设定的最大年度容量缺额比例与最小可再生能源供电比例的情况下,风潮联合发电系统的经济性更好;对风速与潮流流速进行的灵敏度分析,指明了风力、潮流独立发电与风力潮流联合发电系统的适用情况。

参考文献 (References):

- [1] 吴峰,鞠平,秦川,等.近海可再生能源发电研究综述与展望[J].河海大学学报:自然科学版,2014,42(1):80-87.
- [2] 秦川,闻丹银,鞠平,等.近海可再生能源综合发电系统模型对比[J].河海大学学报:自然科学版,2015,43(6):574-581.
- [3] 周荣卫,何晓凤,朱蓉,等.中国近海风能资源开发潜力数值模拟[J].资源科学,2010,32(8):1434-1443.
- [4] 施刚.海上风力发电接入孤立电网的仿真研究[D].上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院,2009.
- [5] ANONYM. Global wind report annual market update 2015 [EB/OL]. [2016. 04. 22]. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf
- [6] KING R, EKANAYAKE J B. Harmonic modelling of offshore wind farms[C]. Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis: IEEE, 2010.
- [7] 刘林,葛旭波,张义斌,等.我国海上风电发展现状及分析[J].能源技术经济,2012,24(3):66-72.
- [8] 陈皓勇,谭科,席松涛,等.海上风电的经营期成本计算模型[J].电力系统自动化,2014,38(13):135-139.
- [9] 林春霖,施泰.福建省海上风电场接入问题的思考[J].水利科技,2010(4):46-48.
- [10] 张勇,崔蓓蓓,邱宇晨.潮流发电——一种开发潮汐能的新方法[J].能源技术,2009(4):223-227.
- [11] RAHMAN M L, SHIRAI Y. Hybrid offshore-wind and tidal turbine (HOTT) energy conversion I (6-pulse GTO rectifier and inverter)[C]. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore: IEEE, 2009.
- [12] 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.
- [13] WANG L, LI C N, CHEN Y T, et al. Analysis of a hybrid offshore wind and tidal farm connected to a power grid using a flywheel energy storage system[J]. IEEE, 2011, 19(5):1-8.
- [14] 石一民,吴金林,王雷,等.岱山风能资源开发研究[J].浙江海洋学院学报:自然科学版,2005,24(2):135-139.
- [15] 侯放,于华明,鲍献文.舟山群岛海域潮流能数值估算与分析[J].太阳能学报,2014,35(1):125-133.
- [16] 吴峰,张弘.大规模潮流能发电接入电网的调峰充裕性评估[J].可再生能源,2015,33(2):326-332.
- [17] 俞凯耀,席东民,胡玲静.舟山群岛风力发电产业发展的现状与问题分析[J].浙江电力,2014(3):25-27+53.
- [18] 秦川,鞠平,闻丹银.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.
- [19] DA Y, KHALIGH A. Hybrid offshore wind and tidal turbine energy harvesting system with independently controlled rectifiers[C]. 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON 2009), Porto: IEEE, 2009.
- [20] 徐林,阮新波,张步涵.风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J].中国电机工程学报,2012,32(25):88-98,14.
- [21] 黄文寿,邵能灵,范春菊,等.微电网结构性分析与设计[J].电力系统保护与控制,2012(18):149-155.
- [22] 蒋平,严栋,吴熙.考虑风光互补的间歇性能源准入功率极限研究[J].电网技术,2013,37(7):1965-1970.
- [23] 陈跃燕.风光储协调控制策略研究[D].北京:华北电力大学控制与计算机学院,2014.
- [24] 陈健.风/光/蓄(柴)微电网优化配置研究[D].天津:天津大学电气与自动化工程学院,2014.
- [25] 赵长龙.微网运行经济型及 HOMER 软件应用研究[D].成都:西南交通大学电气工程学院,2015.
- [26] 文锋.我国海上风电现状及分析[J].新能源进展,2016,4(2):152-158.
- [27] 陈皓勇,谭科,席松涛,等.海上风电的经营期成本计算模型[J].电力系统自动化,2014,38(13):135-139.
- [28] ANONYM. 华锐风电 3MW 系列风力发电机组技术参数 [EB/OL]. <http://www.sinovel.com/content/?108.html>.
- [29] 于汀,李志川.潮流能发电能源成本研究[J].应用能源技术,2017(2):28-32.
- [30] LI Y, FLORIG H K. Modeling the operation and maintenance costs of a large scale tidal current turbine farm[C]. Oceans, Boston: IEEE, 2006.
- [31] GOGULA R R. A sustainable hybrid/off grid power generation systems suitable for a remote coastal area in Oman [C]. 2015 IEEE 8th GCC Conference and Exhibition, Muscat: IEEE, 2015.
- [32] ANONYM. 浙江省电网销售电价表 [EB/OL]. [2016-05-09]. http://www.zj.sgcc.com.cn/html/main/col642/column_642_1.html.
- [33] ANONYM. 国家发展改革委关于海上风电上网电价政策的通知 [EB/OL]. [2014. 06. 05]. http://www.sdpc.gov.cn/gzdt/201406/t20140619_615709.html.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

胡恩德,杨欢,赵荣祥,等.海上风力潮流联合发电系统的容量配置研究[J].机电工程,2017,35(1):62-67.

HU En-de, YANG Huan, ZHAO Rong-xiang, et al. Capacity allocation of hybrid offshore wind and tidal current power generation system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 35(1):62-67.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>