

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.004

基于特性指标聚类的海洋能发电场景简约与容量优化配置

孙铨萌¹, 秦川¹, 唐颖¹, 赵紫璇², 姜安妮³

(1. 河海大学电气与动力工程学院; 2. 国网江苏省电力有限公司淮安供电分公司;
3. 国网江苏省电力有限公司仪征市供电分公司)

摘要: 针对海洋能发电的强随机波动性, 计算了波浪能和潮流能发电功率的幅值稳定性、持续时间稳定性和变异系数等指标, 基于功率特性指标形成的特征向量对海洋能发电功率时序数据进行降维聚类, 得到了海洋能发电典型出力场景; 以消纳率最优为目标, 构建了海洋能发电容量优化配置模型并转换为线性规划问题求解。基于实际数据的算例结果表明, 基于功率特性指标的降维聚类方法可实现海洋能发电场景简约, 功率特性指标聚类后的优化配置结果与实测出力数据场景基本一致, 验证了优化配置模型的有效性。

关键词: 波浪能; 潮流能; 特性指标聚类; 能发电场景简约; 容量优化配置

Simplification of ocean energy power generation scenarios and optimal capacity allocation based on characteristic index clustering

Sun Yimeng¹, Qin Chuan¹, Tang Ying¹, Zhao Zixuan², Jiang Anni³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Hohai University;
2. State Grid Jiangsu Power Supply Company Huai'an Power Supply Branch;
3. State Grid Jiangsu Power Supply Company Yizheng Power Supply Branch)

Abstract: Aiming at the strong random volatility of ocean energy generation, power characteristic indexes, including amplitude stability, duration stability, and the coefficient of variation, were calculated for wave and tidal current power generation. A feature vector constructed from these power characteristic indexes was then used to perform dimensionality reduction and clustering of the time-series data of ocean energy generation power, thereby obtaining typical output scenarios of ocean energy generation. With the goal of optimizing the consumption rate, a model for optimizing the allocation of ocean energy generation capacity is constructed and transformed into a linear programming problem for solution. The calculation results based on actual data show that the optimized configuration results after clustering of characteristic indicators are basically consistent with the measured output data scenario, which verifies the effectiveness of the method.

Key words: wave energy; tidal current energy; characteristic indexes clustering; power generation scenario simplification; optimal allocation of capacity

中国海岸线漫长, 海洋能资源储量丰富^[1-6]。根据 2020 年国家海洋技术中心《中国海洋可再生能源发展年度报告》, 中国近海海洋能资源蕴藏量约为 16.7 亿 kW, 海洋能电站可装机容量达 8.1MW。中国沿海岛屿众多, 多数海岛存在化石燃料紧缺、难以与大陆联网等问题^[7-9], 近百万海岛居民长期处于缺电、少电状态。因此, 针对海岛用电需求与海岛电网特点, 合理开发海洋能发电资源, 既可有效缓解海岛一次能源短缺的问题, 实现海岛的开发建设, 也有利于保护海洋生态环境, 促进区域节能减排^[10-13]。

海洋能发电功率具有较强的随机波动性, 因此, 在海洋能资源优化配置过程中, 需对其发电典型出力场景进行分析。场景分析方法主要包括: ①场景生成。根据统计特征或概率分布进行抽样, 获得尽可能准确描述场景随机性和波动性的大量场景, 主要有蒙特卡罗洛抽样法、拉丁超立方抽样法、ARMA 误差模型法、场景树法、非参数的概率预测法、对抗生成网络法等。②场景缩减。通过提取场景关键特征, 减少周期内的相似场景, 以降低计算复杂度。要金铭等^[14]采用改进的 K-means 聚类算法, 将大量原始场景分成不同的类簇, 并

作者简介: 孙铨萌(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事波浪能发电系统控制理论研究。E-mail: 3299592280@qq.com

通信作者: 秦川(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事广域电力系统建模、可再生能源发电系统控制理论研究。E-mail: cqin@hhu.edu.cn

利用考虑 Kantorovich 距离的同步回代缩减算法,将每个类簇内的场景集缩减为唯一的典型场景;王戌洁^[15]采用混合度量改进的 K -means 聚类算法判定聚类数与聚类中心,完成风电出力聚类并构建典型场景;闫晔^[16]围绕风电不确定性展开分析,采用基于粒子群的核极限学习机模型预测风功率区间,基于随机抽样法选取场景以处理风功率的不确定性,再通过二分 K -means 聚类算法优选典型场景以减小计算量。

在资源优化配置方面,目前研究多集中于风电、光伏、储能等能源类型。王晰等^[17]以投资收益最大化为目标,构建水下抽水蓄能(UPHS)容量优化配置模型,结合算例风速条件,求解风电机组与水下储能的最优容量及实时出力方案;田雪沁等^[18]以内层产氢量最大为目标,优化典型日各时刻的电解槽串、并联运行结构,外层以规划周期收益最高为目标,得到容量配置结果,并提出基于改进遗传算法的 PVE 直接耦合系统双层容量优化配置方法;端木陈睿等^[19]采用三电池组分组控制的电化学储能运行策略,建立了多时间尺度嵌套的双层储能容量优化配置模型。相较而言,针对波浪能、潮流能的发电资源优化配置研究较为有限,其中崔杨等^[20]采用高斯混合模型生成海洋能发电的出力场景,并进行了海洋能资源的优化配置。

针对海洋能发电功率的强随机波动性,本文采用发电功率的幅值稳定性、持续时间稳定性和变异系数 3 个特性指标^[21]对海洋能发电的功率时序数据开展降维聚类分析,得到海洋能的典型出力场景;以海岛电网为研究对象,以消纳率最优为目标构建海洋能发电容量优化配置模型,并将模型转化为线性规划问题求解,以确定最优容量配置方案。

1 海洋能发电功率计算

1.1 波浪能发电

以某型号摆式波浪能转换器为样本,该转换器输出波浪发电功率为^[22]:

$$P = \eta B \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T' \approx \eta B H_{1/3}^2 T'_{1/3}$$
 (1)

式中: P 为输出功率; B 为转换器的摆宽,本文取 5 m; ρ 为海水密度; H 为波高; T' 为波周期; g 为重力加速度; $H_{1/3}$ 为有效波高; $T'_{1/3}$ 为有效波周期; η 为转换效率,本文取 0.441。

1.2 潮流能发电

潮流能发电装置的输出功率可以表示为^[23]:

$$P_t = \begin{cases} 0 & v < 0.5 \\ \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p & 0.5 \leq v \leq 1.5 \\ \frac{1}{2} \rho A C_p \times 1.5^3 & v > 1.5 \end{cases}$$
 (2)

式中: P_t 为潮流能发电功率; v 为潮流流速; A 为水轮机叶片面积,选取叶片直径为 10 m; C_p 为潮流能利用系数,取 0.31。潮流可发电流速上、下界分别为 1.5、0.5 m/s。装置参数设置如下:摆式波浪能转换器使用寿命为 20 a,额定容量为 40 kW;潮流能发电装置使用寿命为 20 a,额定容量为 100 kW。

2 海洋能发电功率特性指标

波浪能与潮流能都具有较强的随机波动性,直接基于功率时序数据聚类生成典型出力场景效果较差。因此,从发电功率稳定性角度出发,采用幅值稳定性、持续时间稳定性和变异系数对波浪能与潮流能发电的功率时序数据进行特征提取,再进行聚类分析,进而得出典型时序出力场景集合。

a. 幅值稳定性:为周期内发电功率标准化后的最大值与最小值之差,可理解为周期内发电功率振荡值的大小。

b. 持续时间稳定性:指发电持续时间稳定性值的大小,可理解为周期内发电功率振荡次数。对发电功率标准化处理后,功率会在零点上下波动。为了量化该指标值,定义持续时间稳定性为发电功率在标准化处理后经过零点的个数。

c. 变异系数:反映发电功率离散程度的大小。

3 基于特性指标聚类的海洋能发电典型场景简约

选择基于划分的 K (聚类数)均值聚类算法提取场景特征^[24],对提取的大量场景进行缩减,筛选得出典型出力场景。由于波浪出力具有极强的随机性与波动性,直接依据发电功率时序聚类生成典型出力场景效果并不理想。因此先对发电功率时序数据进行特征提取,根据海洋能发电功率的 3 个特性指标构建特征向量,再进行 K -means 聚类分析,最终得到典型时序出力场景。

最佳聚类数的确定是聚类算法研究的难点及重点之一, K -means 聚类算法需在聚类前人为设定 K ;而在数据集标签未知时,仅能依据经验估算 K ,所得结果不具说服力且因人而异。因此,采用如下聚类评价指标^[24]选择最佳聚类数:①CHI 指标,该指标值越大,聚类效果越好;②DBI 指标,该指标值越小,聚类效果越好;③轮廓系数 s_i ,取值介于 $-1 \sim 1$, s_i 越接近 1,对样本 i 的聚类越合理, s_i 越接近 -1 ,对样本 i 的聚类越不合理;④KL 散度,其值越大,说明类间相似度越低,聚类效果越好;⑤Hart 指标,小于等于 10 的该指标最小值所对应的 K 值为最佳聚类数;⑥Wint 指标,同时考虑类内与类间聚类效果,其值越大,聚类效果越好;⑦紧密型分散性综合指标,同一类内的数据距离越近,不同类的中心距离越远,效果越好。

确定聚类评价指标后,对海洋能发电功率特性指标数据集进行多次重复聚类,每次均采用“拐点法”^[25]确定各聚类评价指标对应的最优聚类数;最后统计多次聚类结果,选取最多聚类评价指标共同对应的 K ,作为最终 K 。

确定最优聚类数并完成聚类后,所得聚类中心即为海洋能发电功率的典型出力场景,总体流程如图 1 所示。在此基础上,以各聚类中心替代该类各日发电功率时序数据,即可获得基于典型出力场景代替的海洋能发电功率时序数据,以应用于后续的资源优化配置研究。

4 基于消纳率最优的海洋能发电容量配置

4.1 优化配置方法

现有研究中,新能源微电网规划多以综合成本最优为目标进行资源优化配置。然而,海洋能发电开发利用的关键在于解决其消纳问题。因此,针对难以与陆地电网互联的海岛电网,本文以消纳率最优为目标,建立海洋能发电容量优化配置模型。

在配置与评估过程中,需要综合考量消纳率、渗透率和源荷匹配度^[26]3 项容量优化配置指标。其中,消纳率指能源计划出力占其实际出力的比值,表征计划出力与理论出力的接近程度;渗透率指能源计划出力占负荷的比值,反映新能源出力对负荷的供给水平;源荷匹配度则为理论总出力落在负荷上下特定区间的概率,表征了理论出力与用能需求的贴近程度。在进行资源优化配置时,不仅需要考虑消纳率最优,同时也需要结合渗透率与源荷匹配度进行综合分析,保证配置方案的可行性。

4.2 目标函数

以消纳率最优为目标,可表示为:

$$\max \left(\frac{\sum_{t=1}^T (N_w P_{w,t} + N_c P_{c,t})}{\sum_{t=1}^T (N_w P_{wt,t} + N_c P_{ct,t})} \right) \tag{3}$$

式中: N_w 、 N_c 分别为波浪能与潮流能发电机组数; $P_{w,t}$ 、 $P_{c,t}$ 分别为波浪和潮流在 t 时刻的计划出力; $P_{wt,t}$ 、 $P_{ct,t}$ 分别为波浪和潮流在 t 时刻的理论出力; T 为总时间。

4.3 约束条件

a. 功率平衡约束。假设电网中,仅当新能源出力小于负荷时由其他电源或外网平衡系统功率缺额,因

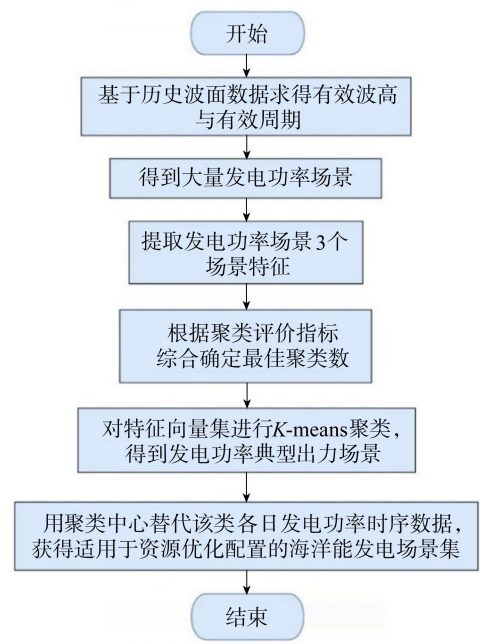


图 1 典型出力场景生成流程
Fig. 1 Implementation flow chart of typical scenarios

此任意时刻新能源总出力均不大于负荷。

b. 新能源出力约束。新能源理论出力是其计划出力的上限,因此每个时刻新能源计划出力均必须不大于理论出力。

c. 新能源渗透率。为提高系统的发电清洁性以及新能源场站的收益,要求新能源渗透率不低于某设定值。

4.4 函数求解

式(3)中,若以波浪能和潮流能的发电机组数(N_w 、 N_c)计划出力($N_w P_{w,t}$ 、 $N_c P_{c,t}$)作为决策变量,优化约束条件为线性约束,目标函数为决策变量的线性分式形式,则模型求解属于混合整数线性分式规划问题。通过变量代换将该分式规划转换为线性分式规划,借助 YALMIP 工具与 CPLEX 求解器,求得原问题的最优解。

使用 Charnes-Cooper 法,将以下非线性分式规划问题转为线性分式规划问题:

$$\left. \begin{aligned} &\min \left(\frac{\mathbf{p}^T \mathbf{x} + \alpha}{\mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta} \right) \\ &\text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta > 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中: $\mathbf{x}$ 为需要求解的优化变量向量; $\mathbf{p}$ 、 $\mathbf{q}$ 分别为分子、分母的系数向量; α 、 β 分别为分子、分母的常数项, $\mathbf{A}$ 为约束矩阵; $\mathbf{b}$ 为约束右端向量。对于任意满足约束条件的 $\mathbf{x}$ 均有 $\mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta > 0$,可作变量代换 $t = 1/(\mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta)$ 、 $\mathbf{y} = t\mathbf{x}$,则式(4)变为:

$$\left. \begin{aligned} &\min(\mathbf{p}^T \mathbf{y} + \alpha) \\ &\text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{y} - \mathbf{b}t = \mathbf{0} \\ \mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta t = 1 \\ \mathbf{y} \geq \mathbf{0}, t \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

变换后的规划问题为线性规划问题,可采用线性规划算法得到其最优解($\mathbf{y}, t$),进而计算原线性分式规划的最优解 $\mathbf{x} = \mathbf{y}/t$ 。

因此,按照 Charnes-Cooper 法进行变量代换,令:

$$z = 1 / \sum_{t=1}^T (N_w P_{wt,t} + N_c P_{ct,t}) \tag{6}$$

则:

$$\begin{cases} P'_{w,t} = N_w P_{wt,t} z \\ P'_{c,t} = N_c P_{ct,t} z \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} N'_{w,t} = N_w z \\ N'_{c,t} = N_c z \end{cases} \tag{8}$$

式中: $P'_{w,t}$ 、 $P'_{c,t}$ 分别为经 Charnes-Cooper 法变换后的波浪能和潮流能计划出力; $N'_{w,t}$ 、 $N'_{c,t}$ 分别为经 Charnes-Cooper 法变换后的波浪能和潮流能机组数。

此时目标函数以及约束条件表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} &\max \sum_{t=1}^T (P'_{w,t} + P'_{c,t}) \\ &\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{t=1}^T (P'_{w,t} + P'_{c,t}) \leq P_{load,t} z \\ P'_{w,t} \leq N'_{w,t} P_{wt,t} \\ P'_{c,t} \leq N'_{c,t} P_{ct,t} \\ \sum_{t=1}^T (P'_{w,t} + P'_{c,t}) \leq \alpha \sum_{t=1}^T P_{load,t} z \end{cases} \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

式中: $P_{load,t}$ 为 t 时刻海岛电网负荷有功功率; α 为新能源渗透率要求。

现在需要解决一个线性分式规划问题,使用 YALMIP 和 CPLEX 求解器求解得到 N'_w 、 N'_c ,通过式(10)求出对应的波浪和潮流发电机组数,求出配置容量:

$$\begin{cases} N_w = N'_w/z \\ N_c = N'_c/z \end{cases}$$

(10)

5 算例分析

5.1 算例概况

以我国东海某海岛供电场景作为仿真算例。该海岛所在海域全年实测波浪有效波高见图 2,实测潮流流速数据见图 3,海岛全年负荷数据见图 4。该海岛用电高峰集中在夏季与冬季,用电低谷出现在秋季;夏、冬季最大用电负荷为 3.6 MW,用电高峰期最小负荷为 2.25 MW;秋季最大负荷为 0.8 MW,最小负荷为 0.2 MW。

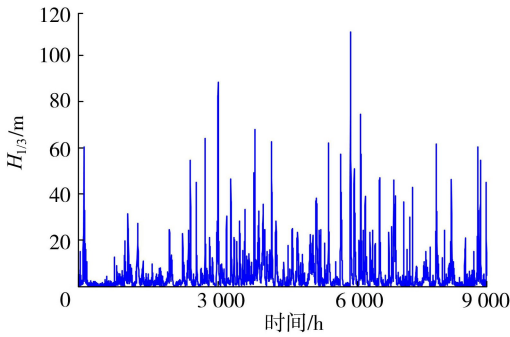


图 2 全年实测波浪有效波高

Fig. 2 Annual effective wave height

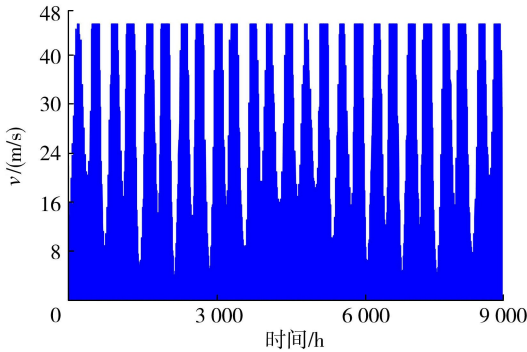


图 3 全年实测潮流流速

Fig. 3 Annual current velocity

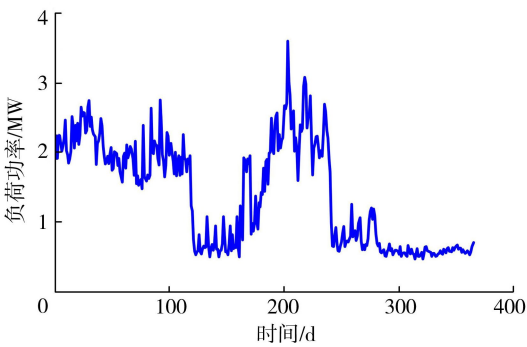


图 4 全年负荷

Fig. 4 Annual load data

5.2 发电功率特性指标聚类结果

5.2.1 波浪能发电

对波浪能发电功率的幅值稳定性、持续时间稳定性及变异系数 3 个特性指标数据集进行 50 次聚类,根据聚类评价指标随 K 的变化曲线,寻找其最优对应的曲线极值点处的 K 值作为最佳聚类数,得到各聚类评价指标最佳聚类数占比情况如表 1 所示。

表 1 波浪能发电各聚类评价指标最佳聚类数占比

Table 1 Proportion of optimal clustering numbers for each clustering evaluation index of wave power generation

指标	最佳聚类数占比/%						最终聚类数/个
	2	3	4	5	6	>7	
CHI 指标	0	84	2	2	2	10	3
DBI 指标	100	0	0	0	0	0	2
轮廓系数	0	4	20	44	14	18	5
KL 散度	0	16	52	14	2	16	4
Hart 指标	10	72	18	0	0	0	3
Wint 指标	2	22	24	34	10	8	5
紧密型分散性综合指标	0	4	28	42	16	8	5

综合分析各聚类评价指标对应的最佳聚类数可知,轮廓系数、Wint 指标和紧密型分散性综合指标指向的最佳聚类数均为 5,因此最终选取 $K=5$ 。对特征向量数据集进行 $K=5$ 的聚类数均值聚类分析,聚类中心与聚类结果分别见图 5 和图 6。可见,5 个聚类中心反映了波浪能日发电功率数据的典型波动规律与出力水平。其中,聚类中心 2 功率量级最大,聚类中心 5 波动较为频繁,但功率量级较小,其余 3 个聚类中心均呈现各自独立的出力波动特征。

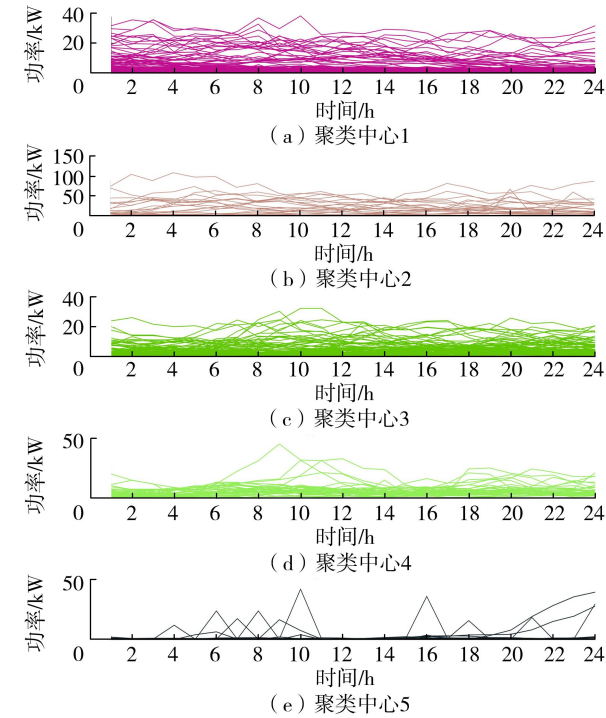


图 5 波浪能发电典型场景

Fig. 5 Wave power generation typical scenarios

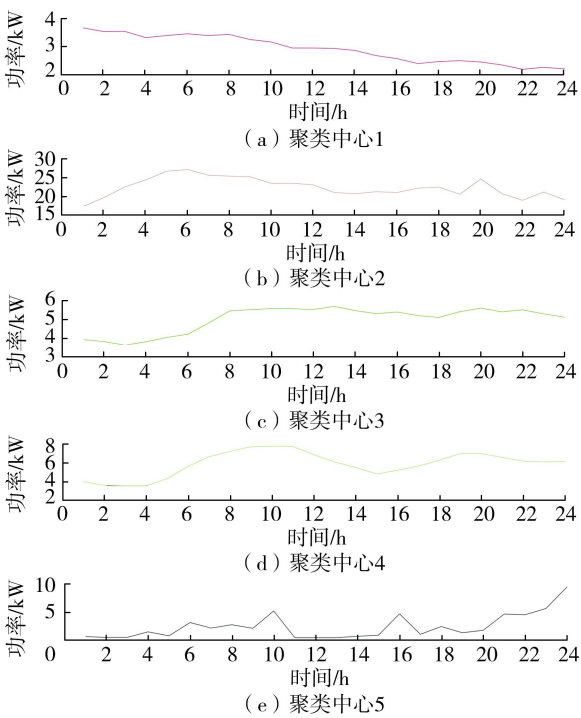


图 6 波浪能发电聚类结果

Fig. 6 Clustering results of wave power generation

5.2.2 潮流能发电

对潮流能发电功率幅值稳定性、持续时间稳定性及变异系数 3 个特性指标数据集重复进行 50 次试验,得到各聚类评价指标最佳聚类占比情况如表 2 所示。

表 2 潮流能发电各聚类评价指标最佳聚类数占比

Table 2 Proportion of optimal clustering numbers for each clustering evaluation index of tidal current power generation

指标	最佳聚类数占比/%						最终聚类数/个
	2	3	4	5	6	>7	
轮廓系数	100	0	0	0	0	0	2
DBI 指标	44	4	48	4	0	0	4
CHI 指标	0	0	0	4	0	96	7
KL 散度	68	0	0	4	0	8	2
Hart 指标	36	20	32	12	0	0	2
Wint 指标	0	36	28	20	8	4	3
紧密型分散性综合指标	100	0	0	0	0	0	2

综合分析表 2 中各聚类评价指标对应的最佳聚类数,根据轮廓系数、KL 散度、Hart 指标和紧密型分散性综合指标指向的最佳聚类数均为 2,选取 $K=2$,由此获得潮流能发电的聚类中心及聚类结果,分别见图 7 和图 8。可见潮流能功率变化的相对规律,两个聚类中心功率量级不同,可能分别对应大小潮差。

5.3 优化配置结果分析

以研究区海岛全年的实际负荷数据作为用电场景,波浪能与潮流能发电场景分别采用全年实测数据计算得到的时序出力曲线(实测出力数据场景)和基于特性指标聚类生成的典型出力场景(以各聚类中心替代对应类别逐日发电功率时序数据),基于消纳率最优的海洋能发电容量优化配置模型,开展海岛电网海洋能发电容量优化配置。

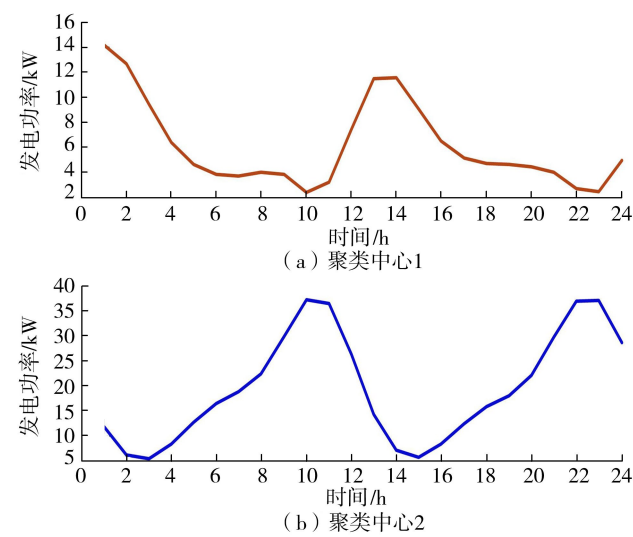


图 7 潮流能发电典型出力场景

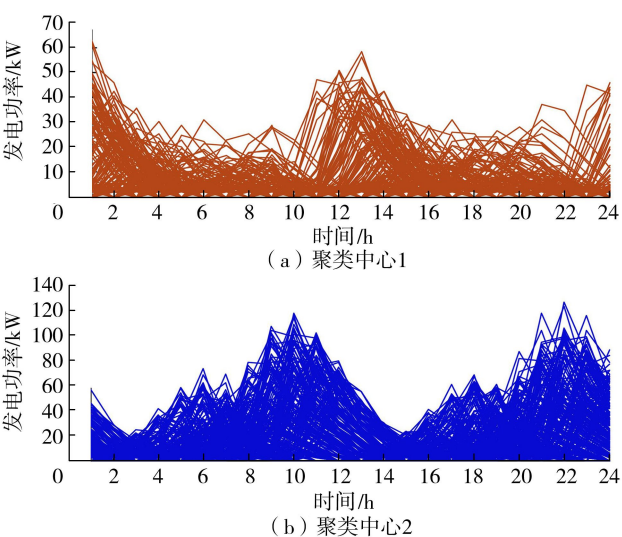


图 8 潮流能发电聚类结果

Fig. 7 Typical scenarios of tidal current power generation Fig. 8 Clustering results of tidal current power generation

由于渗透率取值不同,对应的资源优化配置结果存在差异。图 9 为实测出力数据消纳率、聚类数据消纳率和源荷匹配度随渗透率变化的关系曲线。为便于对比,图中消纳率和源荷匹配度均进行了归一化处理;计算源荷匹配度指标时,范围系数 γ 取 0.6。

由图 9 可以看出,随着渗透率逐步增大,消纳率逐渐下降,源荷匹配度则表现为先上升后下降。当渗透率为 0.6 时,源荷匹配度达到最大值 0.430 7,此时实测出力数据的消纳率为 0.549 9,聚类数据消纳率为 0.620 8;当渗透率增至 0.8 时,源荷匹配度降至 0.353 2,实测出力数据的消纳率为 0.292 0,聚类数据的消纳率为 0.472 2。可见,随着渗透率的增大,源荷匹配度反而降低,此时需要更多的常规发电机组或大陆联网供电。因此,在进行海洋能资源优化配置时,选择渗透率在 0.5~0.6 之间,可获得最优源荷匹配效果。

进一步以实测出力数据场景为例,图 10 为不同 γ 的源荷匹配度随渗透率变化曲线。可见,当 $0.2 < \gamma < 0.6$ 时,源荷匹配度均在渗透率约为 0.6 时最大,此时理论出力与负荷贴合程度最高;当 $0.6 < \gamma < 0.8$ 时,源荷匹配度在渗透率为 0.5~0.6 时最大,进一步验证了渗透率最优取值区间的合理性。表 3 为不同渗透率约束下源荷匹配度和消纳率的变化情况。可以看出,随着渗透率约束的增大,实测出力数据场景与典型出力场景下的消纳率均呈下降趋势,而源荷匹配度呈先增大后减小的变化特征。

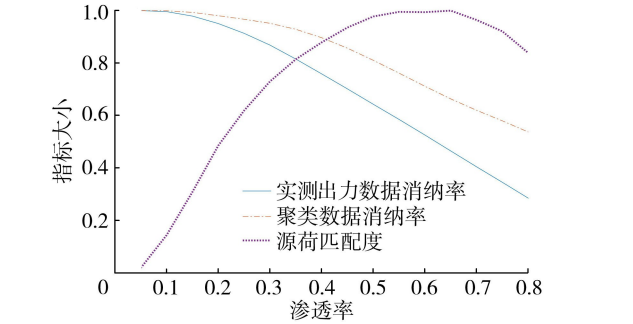


图 9 容量优化配置指标随渗透率变化曲线

Fig. 9 Curves of capacity optimal allocation indicators varying with penetration rate

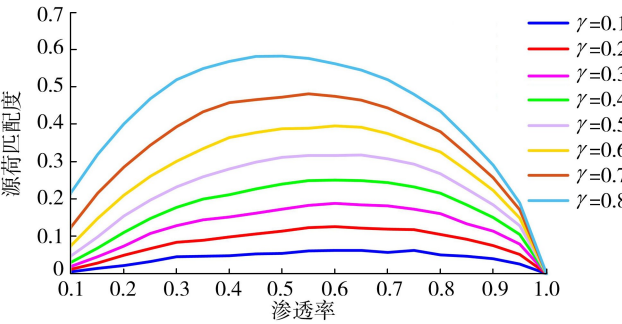


图 10 源荷匹配度随渗透率变化曲线

Fig. 10 Curve of source-load matching degree with penetration rate

综上,为了实现海洋能资源的充分利用,实现出力与海岛负荷最优匹配,宜将渗透率设定为 0.5~0.6,此时资源优化配置结果如表 4 所示。由表 4 可见:①渗透率取 0.6 时,两种场景下海洋能资源配置结果差异最大,波浪能、潮流能发电容量配置差异分别为 440、400 kW。但总体而言,渗透率在 0.5~0.6 时,两种场景的优化配置结果相差不大,且随渗透率变化的趋势一致。②不同渗透率下,实测出力数据场景的波浪能配置容量均略大于典型出力场景,潮流能配置容量略小于典型出力场景,其主要原因在于典型出力场景与实测出力数据场景之间存在一定的差异。渗透率越大,资源优化配置对典型出力场景要求越高,两种场景的配置结果

表 3 源荷匹配度和消纳率随渗透率变化情况

Table 3 Variation of source-load matching degree and consumption rate with penetration rate

渗透率	源荷匹配度	消纳率	
		实测出力数据场景	典型出力场景
0.1	0.0603	0.9445	0.8744
0.2	0.1981	0.9360	0.8569
0.3	0.2972	0.9144	0.8394
0.4	0.3661	0.8141	0.7695
0.5	0.4092	0.7110	0.7170
0.6	0.4307	0.5944	0.6208
0.7	0.4221	0.4028	0.5596
0.8	0.3532	0.2920	0.4722

表 4 消纳率最优配置结果

Table 4 Optimal allocation results of consumption rate

场景	波浪能/kW			潮流能/kW			消纳率			源荷匹配度		
	渗透率 为 0.50	渗透率 为 0.55	渗透率 为 0.60	渗透率 为 0.50	渗透率 为 0.55	渗透率 为 0.60	渗透率 为 0.50	渗透率 为 0.55	渗透率 为 0.60	渗透率 为 0.50	渗透率 为 0.55	渗透率 为 0.60
实测出力 数据场景	1800	2160	3400	3400	4000	4500	0.7110	0.6558	0.5944	0.4263	0.4317	0.4307
典型出力场景	1600	2040	2960	3500	4200	4900	0.7233	0.6752	0.6208	0.4306	0.4402	0.4398

差异也随之增大。因此,本文所提基于特性指标典型出力场景,在最优渗透率取值区间内是有效的。

6 结 语

本文针对海洋能发电的强随机波动性导致直接聚类效果不佳的问题,提出从发电功率稳定性角度出发,提取发电功率特性指标构建特征向量,对海洋能发电功率时序数据进行降维聚类,进而得到发电功率典型出力场景;以消纳率最优为目标,开展海岛微电网海洋能发电容量优化配置研究。算例结果表明,典型出力场景与实测出力数据场景的优化配置结果差异较小且变化趋势一致,验证了基于发电功率特性指标聚类得到的海洋能出力场景的有效性;当海洋能发电容量优化配置模型中的渗透率取 0.5~0.6 时获得最优的容量配置结果,可实现较高的源荷匹配度。

参考文献:

[1] 孙科,陈天宇. 海洋潮流能发电技术研究现状与趋势[J]. 船舶工程,2024,46(1):16-27. (Sun Ke,Chen Tianyu. Current status and trends of research on ocean tidal energy generation technology [J]. Ship Engineering, 2024, 46 (1): 16-27. (in Chinese))

[2] 陈俊. 新能源发电技术在电力系统中的应用[J]. 光源与照明,2023(9):231-233. (Chen Jun. Application of new energy generation technology in power system[J]. Lamps & Lighting,2023(9):231-233. (in Chinese))

[3] 李文清,罗稜,齐晓曼,等. 海洋能技术发展现状及其在上海地区的适应性[J]. 电力与能源,2022,43(6):518-520. (Li Wenqing,Luo Ling,Qi Xiaoman,et al. Development status of marine energy technology and its adaptability in Shanghai area[J]. Power & Energy,2022,43(6):518-520. (in Chinese))

[4] 李伟,史宏达,刘臻,等. 中国海洋能研究现状及未来发展建议[J]. 太阳能,2024(7):79-88. (Li Wei,Shi Hongda,Liu Zhen,et al. Research progress of ocean energy in China and its development proposals[J]. Solar Energy,2024(7):79-88. (in Chinese))

[5] 郑洁,杨淑涵,柳存根,等. 海洋可再生能源装备技术发展研究[J]. 中国工程科学,2023,25(3):23-32. (Zheng Jie,Yang Shuhan,Liu Cungen,et al. Development of marine renewable energy equipment and technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2023,25(3):23-32. (in Chinese))

[6] 杨泽华,李猛,伍儒康,等. 振荡水柱波浪能发电技术研究进展[J]. 新能源进展,2023,11(4):381-387. (Yang Zehua,Li Meng,Wu Rukang,et al. Research progress of oscillating water column wave energy generation technology[J]. Advances in New and Renewable Energy,2023,11(4):381-387. (in Chinese))

[7] 刘帆,肖健梅. 基于岛屿互联的远洋海岛群微电网系统优化设计[J]. 电气工程学报,2024,19(2):268-278. (Liu Fan,Xiao Jianmei. Optimized design of microgrid system for pelagic island group based on island interconnection[J]. Journal of Electrical

- Engineering,2024,19(2):268-278. (in Chinese))
- [8] 詹政东. 海岛型微电网系统规划与运行控制研究[D]. 北京:北方工业大学,2023.
- [9] 马宁,孙柏刚,罗庆贺. 绿氢内燃机及其在边无海岛地区的供电系统应用前瞻[J]. 中国电机工程学报,2024,44(5):1894-1904. (Ma Ning,Sun Baigang,Luo Qinghe. Prospects of green hydrogen internal combustion engine and its application in power supply system of remote uninhabited island[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(5):1894-1904. (in Chinese))
- [10] 陈虹宇,李星梅,王玉玮. 含电动船充电站的海岛光储微网系统容量优化配置[J]. 智慧电力,2024,52(2):48-54. (Chen Hongyu,Li Xingmei,Wang Yuwei. Optimal capacity configuration of island photovoltaic storage microgrid system with electric ship charging station[J]. Smart Power,2024,52(2):48-54. (in Chinese))
- [11] Miao Huiying,Yu Yadong,Kharrazi A,et al. Multi-criteria decision analysis for the planning of island microgrid system;a case study of Yongxing island,China[J]. Energy,2023,284:129264.
- [12] Li Hui,Ren Zhuoyang,Trivedi A,et al. Optimal planning of dual-zero microgrid on an island towards net-zero carbon emission [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2023,15(2):1243-1257.
- [13] Psarros G N,Papathanassiou S A. Generation scheduling in island systems with variable renewable energy sources;a literature review[J]. Renewable Energy,2023,205:1105-1124.
- [14] 要金铭,赵书强,韦子瑜,等. 基于场景分析的电力系统日前调度及其快速求解方法[J]. 电力自动化设备,2022(9):46-52. (Yao Jinming,Zhao Shuqiang,Wei Ziyu,et al. Day-ahead dispatch and its fast solution method of power system based on scenario analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2022(9):46-52. (in Chinese))
- [15] 王戎洁. 含风电机组的多场景配电网无功优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [16] 闫晔. 考虑风电不确定性的分时电价研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [17] 王晰,苏开元,谢小荣. 面向海上风电高效利用的水下抽水蓄能容量优化配置分析[J]. 电网技术,2024,48(4):1428-1436. (Wang Xi,Su Kaiyuan,Xie Xiaorong. Underwater hydro pumped storage optimized capacity configuration for offshore wind power utilization[J]. Power System Technology,2024,48(4):1428-1436. (in Chinese))
- [18] 田雪沁,姚红雨,袁铁江,等. 考虑动态调节特性的光伏直接耦合制氢系统容量优化配置[J]. 中国电机工程学报,2024,45(17):6764-6777. (Tian Xueqin,Yao Hongyu,Yuan Tiejiang,et al. Capacity optimization configuration of photovoltaic hydrogen production direct coupling system considering dynamic regulation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE,2024,45(17):6764-6777. (in Chinese))
- [19] 端木陈睿,史林军,蹇德平,等. 计及多时间尺度的梯级水-风-光互补基地储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2024(7):173-179. (Duanmu Chenrui,Shi Linjun,Jian Deping,et al. Optimization of energy storage capacity allocation in multi-time scales cascaded hydro-wind-solar base[J]. Electric Power Automation Equipment,2024(7):173-179. (in Chinese))
- [20] 崔杨,杨海威,李鸿博. 基于高斯混合模型的风电场群功率波动概率密度分布函数研究[J]. 电网技术,2016,40(4):1107-1112. (Cui Yang,Yang Haiwei,Li Hongbo. Probability density distribution function of wind power fluctuation of a wind farm group based on the gaussian mixture model[J]. Power System Technology,2016,40(4):1107-1112. (in Chinese))
- [21] 解蛟龙. 风/光/负荷典型场景缩减方法及在电网规划中的应用[D]. 安徽:合肥工业大学,2017.
- [22] 刘延俊,武爽,王登帅,等. 海洋波浪能发电装置研究进展[J]. 山东大学学报(工学版),2021,51(5):63-75. (Liu Yanjun,Wu Shuang,Wang Dengshuai,et al. Research progress of ocean wave energy converters[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science),2021,51(5):63-75. (in Chinese))
- [23] 项雯,顾晓庆,李慧,等. 风浪流发电功率计算方法与综合发电评估新概念[J]. 能源与环境,2017,39(12):100-104. (Xiang Wen,Gu Xiaoqing,Li Hui,et al. Calculation method and new evaluation concepts for integrated power generation of wind,wave and tidal current[J]. China Energy and Environmental Protection,2017,39(12):100-104. (in Chinese))
- [24] 张亚迪,孙悦,刘锋,等. 结合密度参数与中心替换的改进 K-means 算法及新聚类有效性指标研究[J]. 计算机科学,2022,49(1):121-132. (Zhang Yadi,Sun Yue,Liu Feng,et al. Study on density parameter and center-replacement combined K-means and new clustering validity index[J]. Computer Science,2022,49(1):121-132. (in Chinese))
- [25] 万志伟,张翼,王聪,等. 基于生成对抗网络和改进均值漂移聚类的微电网运行场景生成方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2024,36(11):110-117. (Wan Zhiwei,Zhang Yi,Wang Cong,et al. An operational scenarios generation method for microgrids based on generative adversarial networks and improved mean-shift clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2024,36(11):110-117. (in Chinese))
- [26] 万家豪,苏浩,冯冬涵,等. 计及源荷匹配的风光互补特性分析与评价[J]. 电网技术,2020,44(9):3219-3226. (Wan Jiahao,Su Hao,Feng Donghan,et al. Analysis and evaluation of the complementarity characteristics of wind and photovoltaic considering source-load matching[J]. Power System Technology,2020,44(9):3219-3226. (in Chinese))