

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.02.013

基于高斯混合模型的海洋能发电资源优化配置研究

唐成虹^{1,2,3}, 余良辉^{1,2}, 孙树敏⁴, 于芑⁴, 赵紫璇⁵, 秦川⁶

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 211106;2. 国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 211106;3. 南瑞集团有限公司智能电网保护和运行控制国家重点实验室,江苏 南京 211106;4. 国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250002;
5. 国网江苏省电力有限公司淮安供电分公司,江苏 淮安 223002;
6. 河海大学能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:为了充分利用波浪、潮流等海洋可再生能源,针对海洋能资源丰富的海岛电网,文中提出了以消纳率最优为目标的海洋能发电资源优化配置方法。首先,采用高斯混合模型(GMM)描述海洋能发电的随机波动性,并生成出力场景;其次,以海洋能消纳率最优为目标构建了海岛电网的海洋能发电资源优化配置模型;然后,对渗透率、消纳率及源荷匹配度3个指标进行综合分析,获得最优配置方案;最后,基于实际海岛负荷、波浪和潮流数据构建了海洋能发电资源优化配置算例,并重点分析了资源优化配置过程中渗透率约束的取值范围。结果表明:在不同的渗透率约束下,源荷匹配度呈现先升后降的趋势;在最优渗透率约束取值范围内,GMM出力场景与实测数据场景的优化配置结果相差不大且趋势一致,验证了GMM生成海洋能出力场景的有效性。

关键词:波浪能;潮流能;消纳率;高斯混合模型;源荷匹配度;资源优化配置

中图分类号:TM715

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)02-0097-08

0 引言

我国海岸线漫长,海洋能资源丰富,近海海洋能资源蕴藏量约为16.7亿kW,技术可开发量超6亿kW^[1]。与此同时,我国沿海岛屿众多,但多数海岛面临化石燃料短缺、运输困难、地域偏远难以与大陆联网等问题。因此,面向海岛电网合理开发利用海洋能发电资源,不仅能有效解决海岛的一次能源短缺问题,也有助于保护海洋环境、促进节能减排^[2]。

在现有技术条件下,可利用的海洋能发电资源主要包括波浪能和潮流能。其中,波浪能发电的随机性、波动性较强^[3-4];潮流能相对平稳,但也具有一定的随机波动性。为实现海洋能资源的优化配置,首先需要考虑海洋能出力的随机波动性,生成其出力场景。目前,描述可再生能源出力随机性的方法主要有2种^[5-6]:一是建立其时间序列模型;二是建立其概率密度模型。在时间序列模型方面,文献[7-8]均采用基于自回归滑动平均模型的时间序列法形成可再生能源出力的时间序列模型;文献[9]采用K-means聚类算法对初始场景集进行场景缩减,生成风电时序联合出力典型场景;在概率密

度模型方面,文献[10]通过对风、光联合出力的概率分布进行拉丁超立方抽样,得到模拟风、光出力波动的初始场景;文献[11]基于隐马尔可夫模型进行多风电场出力时间序列建模,并通过蒙特卡洛仿真生成具有时空相关性的风电场出力场景;文献[12]运用随机微分方程对风电场出力随机波动性建模,重构风电出力场景。归纳而言,现有的随机波动性建模与场景生成研究主要针对风电、光伏,对波浪能和潮流能发电功率的随机波动建模仅有一些初步研究^[13-17]。

在资源优化配置方面,文献[18]以综合成本最小为目标,满足系统的基本性能为约束条件,通过改进的微分进化算法对风/光互补发电系统进行了优化配置;文献[19]以年净收益最优为目标,建立了风/光/储微网规划经济性模型;文献[20]以风/光互补发电的消纳率和渗透率为目标,依次进行容量优化配置,并从优化结果中选出消纳率最高的一组作为最终配置结果;文献[21]通过先投入所有风电再逐步增加光伏投入比重的方法,观察比重对年发电时间、日发电波动率和年累积发电的影响,得到风电容量和光伏容量最佳配比。总体而言,国内外在资源优化配置上的研究多集中在风电、光伏等常规可再生能源上,在波浪、潮流等海洋能发电资源优化配置方面的研究还较少。

为此,针对海洋能发电的强随机波动性,文中

收稿日期:2021-11-07;修回日期:2022-01-23

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“分布式海洋可再生发电并网控制关键技术研究及示范”

采用高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)进行概率建模,并生成资源优化配置所需的出力场景。考虑到海洋能发电尚未实现商业化运营,文中以海洋能资源丰富的海岛电网为研究对象,以消纳率最优为目标构建资源优化配置模型,并对渗透率、消纳率及源荷匹配度等多个指标进行综合分析,获得最优的渗透率约束取值范围以及相应的资源优化配置方案。基于实测数据的仿真算例验证了文中方法的有效性。

1 海洋能发电

1.1 波浪能发电

文中用某一型号的摆式波浪能量转换器作为样本分析海域波浪能发电的实际情况,波能转换器的输出功率为^[22]:

$$P_w = \eta B \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T_H \approx \eta B H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (1)$$

式中: η 为转换效率,取0.441; B 为浮动型波能转换器的摆宽,取5 m; ρ 为标准海水密度; g 为重力加速度; H 为波高; T_H 为波周期; $H_{1/3}$ 为1/3大波平均波高,称为有效波高,其周期为 $T_{1/3}$,称为有效波周期。

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]:

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

式中: P_T 为潮流能发电功率; v 为潮流流速; A_s 为水轮机叶片面积,取叶片直径为10 m; C_p 为潮流能利用系数,取0.31。潮流发电流速下界为0.5 m/s,流速上界为1.5 m/s。

2 基于GMM的海洋能发电功率场景生成

一般的概率密度模型有:威布尔分布、极值分布、正态分布、 t location-scale 分布、核密度分布、瑞利分布等。但由于波浪出力的波动性较强,常规分布难以较好地拟合波浪出力概率,因此文中选用GMM来描述海洋能发电出力的随机波动性。

2.1 GMM

GMM以多个高斯子模型的线性组合来拟合复杂随机变量,并通过调整各子模型的权重系数、均值、方差、协方差等参数使误差达到最小,其概率密度函数可以表示为^[24]:

$$p(x) = \sum_{k=1}^K (\omega_k \varphi(x | \theta_k)) \quad (3)$$

式中: $\varphi(x | \theta_k)$ 为第 k 个高斯子模型的概率密度函数; θ_k 为选定第 k 个高斯子模型后,该模型产生 x 的概率; ω_k 为第 k 个高斯子模型的权重,满足 $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$; K 为GMM的阶数。

GMM含有隐含变量,无法使用最大似然估计法求解。而最大期望(expectation maximization, EM)算法^[25]可用于求解存在隐含变量的概率模型参数,因此文中采用该算法求解GMM的参数。EM算法每次迭代都包含2步:E步,求期望;M步,求极大值。其基本步骤为:

(1) 输入实测数据 X ,取参数的初始值开始迭代。

(2) E步。根据当前模型参数,计算第 j 个实测数据来自第 k 个高斯子模型的概率:

$$\hat{\gamma}_{jk} = \omega_k \varphi(x_j | \theta_k) / \sum_{k=1}^K (\omega_k \varphi(x_j | \theta_k)) \quad j = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

式中: N 为数据维度。

(3) M步。计算下一步迭代的模型参数:

$$U_k = \sum_{j=1}^N (\hat{\gamma}_{jk} X_j) / \sum_{j=1}^N \hat{\gamma}_{jk} \quad (5)$$

$$C_k = \frac{\sum_{j=1}^N [\hat{\gamma}_{jk} (X_j - U_k)^T (X_j - U_k)]}{\sum_{j=1}^N \hat{\gamma}_{jk}} \quad (6)$$

$$\omega_k = \sum_{j=1}^N \hat{\gamma}_{jk} / N \quad (7)$$

式中: U_k 为第 k 个高斯子模型的均值矩阵; C_k 为第 k 个高斯子模型的协方差矩阵; X_j 为第 j 个实测数据矩阵。

(4) 重复步骤(2)和步骤(3),直到相邻2次迭代之间的参数满足式(8),终止迭代。

$$\|\theta_{i+1} - \theta_i\| < \varepsilon \quad (8)$$

式中: ε 为给定的较小正数,一般取 $10^{-10} \sim 10^{-5}$ 。

2.2 拟合效果指标

文中采用残差平方和(sum of squares for error, SSE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)及决定系数^[14]等指标值对GMM的拟合效果进行综合量化评价。

SSE为每个数组各样本数据与该组均值的误差平方和,反映每个样本各观测值的离散情况。

$$E_{SSE} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{P_{Cap}} \right)^2 \quad (9)$$

式中: E_{SSE} 为SSE指标; \hat{y}_i 为一个水平下的分布函数模型对应的函数值; y_i 为一个水平下的原数据对

应的函数值; P_{Cap} 为装机容量。 E_{SSE} 越小, 分布函数模型的拟合效果越好。

RMSE 也称回归系统的拟合标准差, 其计算为:

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{P_{\text{Cap}}} \right)^2} \quad (10)$$

式中: E_{RMSE} 为 RMSE 指标。 E_{RMSE} 越接近 0, 模型的拟合效果越好。

决定系数是一个无单位、可进行模型比较且可直观判断拟合优劣的统计量。

$$R = \sqrt{\frac{E_{\text{SSR}}}{E_{\text{SST}}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}} \quad (11)$$

式中: R 为决定系数指标; E_{SSR} 为回归模型数据与原始数据之差的平方和; E_{SST} 为原始数据和均值 \bar{y}_i 之差的平方和。决定系数取值范围为 $[0, 1]$, 越接近 1, 表明模型对样本的解释能力越强, 模型对数据拟合的效果也越好。

根据上述拟合指标选择 GMM 阶数, 得到海洋能发电功率的 GMM, 利用得到的权重系数、均值、协方差参数生成符合该分布的随机数据, 从而生成海洋能出力场景。

3 海洋能发电资源优化配置模型

3.1 优化配置方法

现有的研究中, 新能源微电网规划大多是基于综合成本最优进行资源优化配置。然而对于海洋能发电的开发利用, 关键还是要解决其消纳问题。因此, 文中考虑以消纳率最优来配置波浪和潮流发电的装机容量。

消纳率为能源计划出力占能源实际出力的比值, 其描述的是计划出力与实际出力的接近程度, 即:

$$L_{\text{AR}} = \sum_i^I \sum_t^T P_i(t) / \sum_i^I \sum_t^T P_{\text{ai}}(t) \quad (12)$$

式中: L_{AR} 为消纳率指标; I 为能源种类; T 为总时间; $P_i(t)$ 为第 i 种新能源计划出力; $P_{\text{ai}}(t)$ 为第 i 种新能源实际出力。

除消纳率指标外, 文中在进行资源优化配置时, 还将综合考虑新能源渗透率和海岛电网的源荷匹配度指标, 以确定最终的优化配置方案。

渗透率为能源计划出力占负荷的比值, 可以理解为计划出力与负荷的贴近程度, 即:

$$L_{\text{P}} = \sum_i^I \sum_t^T P_i(t) / \sum_t^T P_{\text{load}}(t) \quad (13)$$

式中: L_{P} 为渗透率指标; $P_{\text{load}}(t)$ 为负荷。

源荷匹配度^[15]表示实际出力与负荷的贴近程度, 因此可以定义为实际总出力在负荷上、下一定范围内的概率, 即:

$$L_{\text{LMD}} = P \left(\left| \sum_{i=1}^I P_{\text{ai}} - P_{\text{load}} \right| \leq \gamma P_{\text{load}} \right) \quad (14)$$

式中: L_{LMD} 为源荷匹配度指标; γ 为范围系数; $P(\cdot)$ 为事件出现概率。

3.2 目标函数

以消纳率最优为目标, 可表示为:

$$\max \frac{\sum_{t=1}^T (N_{\text{W}} P_{\text{W}}(t) + N_{\text{C}} P_{\text{C}}(t))}{\sum_{t=1}^T (N_{\text{W}} P_{\text{Wa}}(t) + N_{\text{C}} P_{\text{Ca}}(t))} \quad (15)$$

式中: N_{W} , N_{C} 分别为波浪发电机组和潮流发电机组的数目; $P_{\text{W}}(t)$, $P_{\text{C}}(t)$ 分别为波浪和潮流在 t 时刻的计划出力; $P_{\text{Wa}}(t)$, $P_{\text{Ca}}(t)$ 分别为波浪和潮流在 t 时刻的实际出力。

3.3 约束条件

(1) 功率平衡约束。假设文中模型只在新能源出力小于负荷时出现其他电源或外网平衡系统功率缺额, 因此在任意时刻的新能源总出力都要不大于负荷。

$$N_{\text{W}} P_{\text{W}}(t) + N_{\text{C}} P_{\text{C}}(t) \leq P_{\text{load}}(t) \quad t \in [1, T] \quad (16)$$

(2) 新能源出力约束。新能源实际出力是其计划出力的上限, 因此每个时刻的新能源计划出力均须不大于实际出力。

$$\begin{cases} P_{\text{W}}(t) \leq P_{\text{Wa}}(t) \\ P_{\text{C}}(t) \leq P_{\text{Ca}}(t) \end{cases} \quad (17)$$

(3) 新能源渗透率约束。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。

$$\sum_{t=1}^T (N_{\text{W}} P_{\text{W}}(t) + N_{\text{C}} P_{\text{C}}(t)) \geq \eta \sum_{t=1}^T P_{\text{load}}(t) \quad (18)$$

3.4 模型求解

在上述优化模型中, 若以波浪、潮流发电机组的数目 N_{W} , N_{C} 和波浪、潮流发电机组的出力 $N_{\text{W}} P_{\text{W}}(t)$, $N_{\text{C}} P_{\text{C}}(t)$ 作为决策变量, 则优化的约束条件是线性约束, 而目标函数是关于决策变量的线性分式, 该问题是混合整数分式线性规划。文中通过变量代换将该规划转换成线性规划, 并使用 Yalmip 和 Cplex 求解器求得原问题的最优解。

使用 Charnes-Cooper 方法求解分式线性规划

问题:

$$\begin{cases} \min [(p^T x + \alpha)/(q^T x + \beta)] \\ \text{s.t. } Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

其中, A 为参数矩阵。当对于任意满足约束条件的 x 均有 $q^T x + \beta > 0$, 则可作变量代换 $t = 1/(q^T x + \beta)$, $y = tx$, 式(19)的规划问题变为:

$$\begin{cases} \min (p^T y + \alpha) \\ \text{s.t. } Ay = bt \\ q^T x + \beta t = 1 \\ y \geq 0, t \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

变换后的规划问题为线性规划问题, 可以使用线性规划算法进行计算。得到其最优解 (y, t) 后, 可得到原线性分式规划的最优解 $x = y/t$ 。

按照 Charnes-Cooper 方法进行变量代换, 令:

$$z = 1 / \sum_{i=1}^T (N_w P_{wa}(t) + N_c P_{ca}(t)) \quad (21)$$

则:

$$\begin{cases} P'_w(t) = N_w P_w(t) z \\ P'_c(t) = N_c P_c(t) z \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} N'_w(t) = N_w z \\ N'_c(t) = N_c z \end{cases} \quad (23)$$

利用上述变量代换, 则目标函数变为:

$$\max \sum_{i=1}^T (P'_w(t) + P'_c(t)) \quad (24)$$

功率平衡约束变为:

$$\sum_{i=1}^T (P'_w(t) + P'_c(t)) \leq P_{load}(t) z \quad (25)$$

新能源出力约束变为:

$$\begin{cases} P'_w(t) \leq N'_w(t) P_{wa}(t) \\ P'_c(t) \leq N'_c(t) P_{ca}(t) \end{cases} \quad (26)$$

新能源渗透率约束变为:

$$\sum_{i=1}^T (P'_w(t) + P'_c(t)) \leq \eta \sum_{i=1}^T P_{load}(t) z \quad (27)$$

求解得到 N'_w, N'_c 后, 可通过式(28)求出对应的波浪、潮流发电机组的数目, 求出配置容量。

$$\begin{cases} N_w = N'_w / z \\ N_c = N'_c / z \end{cases} \quad (28)$$

4 算例分析

4.1 仿真算例

以某海岛的供电场景为仿真算例, 其海域实测波浪数据的全年有效波高见图 1, 其海域实测潮流流速数据见图 2。

图 3 给出了海岛全年的负荷数据。该岛主要由陆地主电网供电, 有居民 1 500 余户, 非居民 300 余

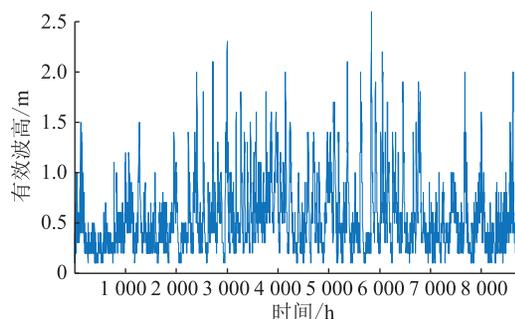


图 1 全年有效波高

Fig.1 Annual effective wave height

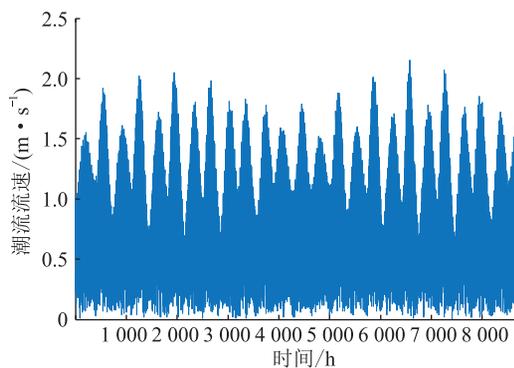


图 2 全年潮流流速

Fig.2 Annual current velocity

户。岛内建设了 1 座 110 kV 变电站, 通过 1 条联络线由岸上主网进行供电, 并配置 1 台 10 MV·A 主变, 1 台 20 MV·A 主变给岛内用户供电。用电高峰出现在夏、冬季, 用电低谷出现在秋季, 夏、冬季最大负荷为 3.6 MW, 用电高峰时期最小负荷也可达 2.25 MW; 秋季最大负荷为 0.8 MW, 最小负荷为 0.2 MW。

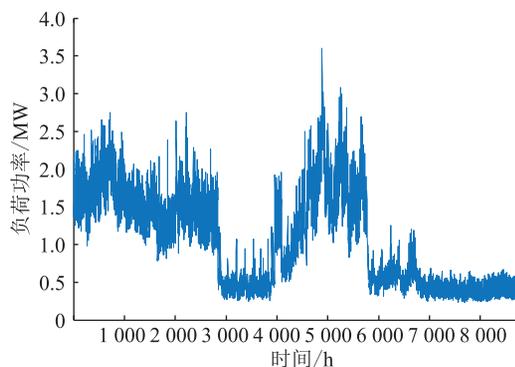


图 3 海岛全年负荷数据

Fig.3 Annual load data of islands

4.2 波浪发电功率 GMM 建模与场景生成

根据波浪实测数据, 计算出波浪出力数据, 用 GMM 拟合波浪发电功率波动概率密度分布, 利用拟合效果指标选择合适的阶数。表 1 为波浪 GMM 拟合效果评价指标值。

表 1 波浪 GMM 的拟合效果指标值

Table 1 Fitting effect index values of the wave GMM

模型	E_{RMSE}	E_{SSE}	R
2 阶 GMM	594.912 2	0.260 6	0.861 7
3 阶 GMM	2 162.928 1	0.496 9	0.837 6
4 阶 GMM	838.580 4	0.309 4	0.849 7
5 阶 GMM	13 335.019 0	1.233 8	0.592 1

从表 1 可知,波浪 2 阶 GMM 的 SSE 值及 RMSE 值最小且决定系数最大。将 2 阶 GMM 的拟合效果评价指标与对数正态分布、威布尔分布和瑞利分布的拟合效果评价指标进行比较,如表 2 所示。

表 2 波浪 2 阶 GMM 与其他模型拟合效果指标值

Table 2 Fitting effect index values of wave 2nd-order GMM and other models

模型	E_{RMSE}	E_{SSE}	R
2 阶 GMM	594.912 2	0.260 6	0.861 7
对数正态分布	3 742.154 9	0.653 6	0.644 0
威布尔分布	2 068.609 0	0.485 9	0.766 2
瑞利分布	2 309.815 6	0.513 5	0.719 8

由表 2 对比可知,2 阶 GMM 的拟合效果评价指标最优,因此选择 $K=2$ 建立波浪发电 GMM,如图 4 所示。

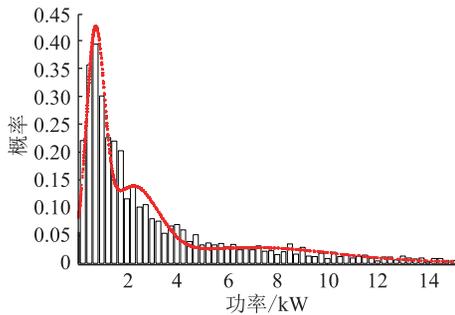


图 4 波浪发电 GMM 拟合

Fig.4 GMM fitting for wave power generation

由式(5)一式(7)计算模型参数,即均值 U 、协方差 C 、权重 ω ,如表 3 所示。

表 3 波浪发电功率的 GMM 参数

Table 3 GMM parameters for wave power

阶数	U	C	ω
1	1.531 2	1.227 6	0.681 3
2	12.540 0	137.310 3	0.318 7

利用构建的波浪发电功率的 GMM,生成波浪出力场景,如图 5 所示。

4.3 潮流发电功率 GMM 建模与场景生成

与波浪数据处理方式一致,对潮流发电功率数据进行处理,表 4 为潮流 GMM 拟合效果评价指标。

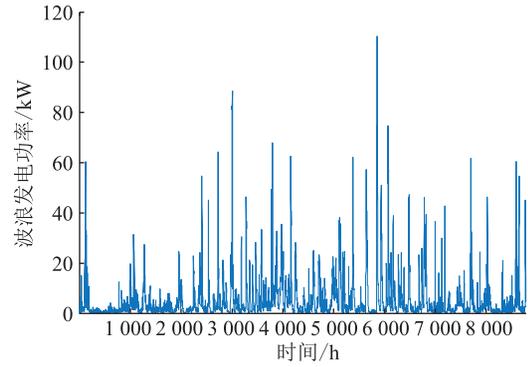


图 5 GMM 生成的波浪出力数据

Fig.5 Wave output data generated by GMM

表 4 潮流 GMM 的拟合效果指标

Table 4 Fitting effect index values of the tidal power GMM

模型	E_{RMSE}	E_{SSE}	R
2 阶 GMM	137.260 0	0.125 2	0.953 6
3 阶 GMM	58.438 0	0.081 7	0.988 2
4 阶 GMM	120.976 9	0.117 5	0.944 8
5 阶 GMM	168.890 0	0.138 9	0.895 8

由表 4 可知,潮流 3 阶 GMM 的 SSE 值及 RMSE 值最小且决定系数最大。将 3 阶 GMM 的拟合效果评价指标与正态分布、Logistic 分布和 Extreme Value 分布的拟合效果评价指标进行比较,结果如表 5 所示。

表 5 潮流 3 阶 GMM 与其他模型拟合效果指标

Table 5 Fitting effect index values of tidal power 3rd-order GMM and other models

模型	E_{RMSE}	E_{SSE}	R
3 阶 GMM	58.438 0	0.081 7	0.988 2
正态分布	272.264 4	0.176 3	0.710 6
Logistic 分布	201.868 6	0.151 8	0.819 3
Extreme Value 分布	307.272 6	0.187 3	0.667 6

由表 5 对比可知,潮流 3 阶 GMM 的拟合效果评价指标最优,因此选择 $K=3$ 建立潮流发电 GMM,如图 6 所示。

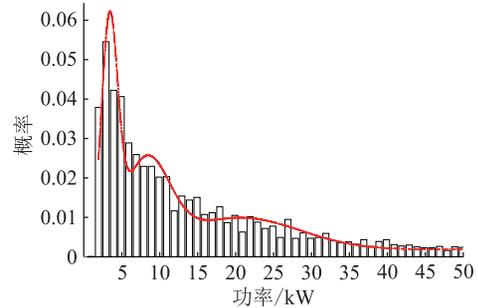


图 6 潮流发电 GMM 拟合

Fig.6 GMM fitting for tidal power generation

由式(5)一式(7)计算模型参数,如表6所示。

表6 潮流发电功率的 GMM 参数
Table 6 The GMM parameters for tidal power generation

阶数	U	C	ω
1	4.563 9	6.678 0	0.352 5
2	19.752 1	191.907 6	0.147 5
3	1.035 4	0.361 6	0.500 0

基于潮流 GMM 生成潮流出力场景,如图7所示。由于潮流发电流速有最大为 1.5 m/s 的限制,因此潮流发电功率具有上界。

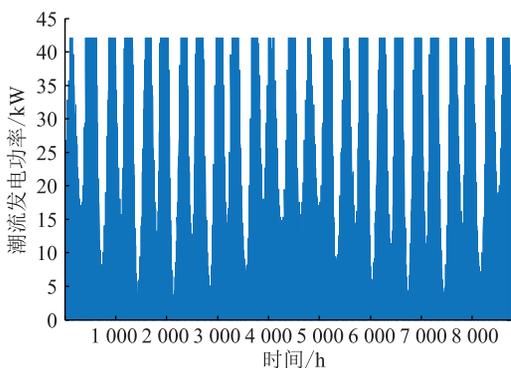


图7 GMM 生成的潮流出力数据

Fig.7 Tidal power output data generated by GMM

4.4 优化配置结果分析

将研究海岛的实际负荷数据作为用电场景,波浪能和潮流能发电场景(实际出力)可以分为2类:发电场景一,从实测数据计算得到的实际出力,如图1、图2所示;发电场景二,由 GMM 得到的出力场景,如图5、图7所示。

根据上文所述资源优化配置模型对海岛电网的海洋能发电进行资源优化配置。在优化配置模型中,渗透率约束取值不同,获得的资源优化配置结果不同。因此,对不同渗透率约束下配置结果及相应指标进行分析。图8给出了源荷匹配度和消纳率随渗透率约束变化的曲线。在计算源荷匹配度指标时,范围系数 γ 取 0.6。为便于对比,对2种指标进行归一化处理。

由图8可见,随着渗透率约束的不断提高,消纳率逐渐下降,源荷匹配度则是先上升后下降。当源荷匹配度达到最大值时,渗透率约束在 0.5~0.6 之间。因此,选择渗透率约束在 0.5~0.6 之间进行资源优化配置,此时获得的优化配置结果,其负荷和出力的匹配可以达到一个较高的程度。

进一步以实测数据为例,图9给出了不同范围系数 γ 下的源荷匹配度随渗透率约束变化的曲线。

从图9可以看出,当 $0.2 \leq \gamma \leq 0.6$ 时,源荷匹配

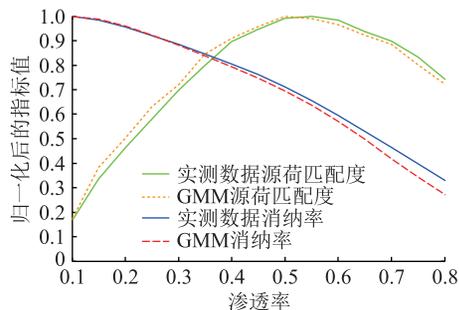


图8 2种指标随渗透率约束变化曲线

Fig.8 The curves of the two indexes changing with permeability constraint

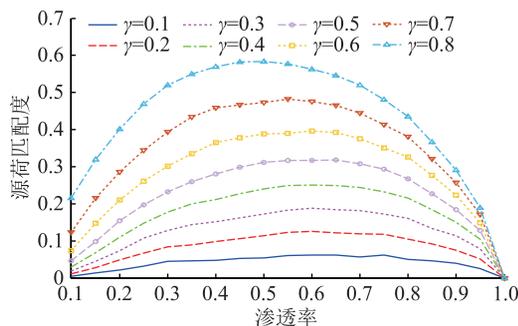


图9 源荷匹配度随渗透率约束变化曲线

Fig.9 The curves of load matching degree changing with permeability constraint

度指标均在渗透率为 0.6 左右时最大,即实际出力与负荷最贴近;当 $0.6 < \gamma \leq 0.8$ 时,源荷匹配度在渗透率为 0.5~0.6 之间时最大。

综上所述,若希望源荷匹配度达到最大,即实际出力与负荷最贴近时,应选择渗透率在 0.5~0.6 之间。此时的资源优化配置结果如表7所示。

表7 消纳率最优配置结果

Table 7 Optimal allocation results of absorption rate

渗透率约束	实测数据场景				
	波浪能/kW	潮流能/kW	消纳率	源荷匹配度	
0.50	1 800	3 400	0.711 0	0.426 3	
0.55	2 160	4 000	0.655 8	0.431 7	
0.60	3 400	4 600	0.594 4	0.430 7	
渗透率约束	GMM 生成场景				
	波浪能/kW	潮流能/kW	消纳率	源荷匹配度	
	0.50	1 640	3 600	0.693 9	0.391 3
	0.55	1 980	4 200	0.636 3	0.424 3
0.60	2 420	4 900	0.571 0	0.419 2	

结合表7与图8,可以得出以下结论:

(1) 在不同渗透率约束下,GMM 出力场景与实测数据场景的优化配置结果相差不大且趋势一致。在不同渗透率约束下,实测数据场景的波浪能配置

均稍大于 GMM,潮流能配置稍小于 GMM。出现上述现象的原因是:尽管 GMM 可以较好地描述海洋能发电功率的概率特性,但使用 GMM 生成的出力数据与实测出力数据还是有一定差异。在某一渗透率约束下,与实测数据相比,使用 GMM 得到的波浪能配置小、潮流能配置大,则改变渗透率约束时,由于 2 种出力场景、负荷场景没有发生变化,得到的配置结果均会出现此情况。

(2) 当渗透率约束较小时,GMM 与实测数据的最优消纳率差异不明显;但随着渗透率约束的增加,两者之间的差异越来越显著。其原因主要是 GMM 生成场景与实测数据之间存在一定的差异。若渗透率约束越大,则资源优化配置过程中对出力场景数据的要求越高,因此 GMM 和实测 2 种数据获得的配置结果差异越大。可见,采用 GMM 生成出力场景总体有效,但不适用于渗透率约束过大的情况。

(3) 当渗透率约束取在 0.5~0.6 之间时,基于 GMM 和实测数据获得的源荷匹配度均达到最大;且由表 7 可知,渗透率约束为 0.5~0.6 之间时,GMM 和实测数据的容量配置结果差距不大。因此,选择渗透率约束为 0.5~0.6 可获得较优的海洋能优化配置结果。

5 结语

文中针对常规概率分布拟合无法较好描述波浪随机性出力的特点,提出使用 GMM 来拟合波浪出力概率分布,从而生成海洋能发电出力场景;以消纳率最优为目标,对海岛电网进行海洋能发电的资源优化配置研究。算例结果表明,GMM 出力场景与实测数据场景的优化配置结果相差不大且趋势一致,验证了 GMM 生成海洋能出力场景的有效性。此外,当模型中的渗透率约束取 0.5~0.6 时,获得最优容量配置结果的源荷匹配度较高。

需要指出的是,因为波浪能和潮流能还未完全投入商业化运行,所以文中以消纳率最优为目标进行了资源优化配置研究,而未考虑经济性规划。在后续的研究中,将进一步考虑以综合成本最优为目标进行海洋能的资源优化配置。

参考文献:

- [1] 刘伟民,刘蕾,陈风云,等. 中国海洋可再生能源技术进展[J]. 科技导报,2020,38(14):27-39.
LIU Weimin, LIU Lei, CHEN Fengyun, et al. Technical progress of marine renewable energy in China[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(14): 27-39.
- [2] 洪岳,潘剑飞,刘云,等. 直驱波浪能发电系统综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(7):1886-1900.
HONG Yue, PAN Jianfei, LIU Yun, et al. A review on linear generator based wave energy conversion systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 1886-1900.
- [3] HUANG W, YANG J M. A novel piecewise velocity control method using passivity-based controller for wave energy conversion[J]. IEEE Access, 2020, 8: 59029-59043.
- [4] 刘元尊,管维亚,赵静波,等. 基于参数辨识的波浪发电场等效建模研究[J]. 电力工程技术,2019,38(2):69-74.
LIU Yuanzun, GUAN Weiya, ZHAO Jingbo, et al. Parameter identification based on equivalent modeling of AWS wave farm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 69-74.
- [5] KOU P, LIANG D L, GAO L. Stochastic energy scheduling in microgrids considering the uncertainties in both supply and demand[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(3): 2589-2600.
- [6] HANS C A, SOPASAKIS P, RAISCH J, et al. Risk-averse model predictive operation control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(6): 2136-2151.
- [7] BIZRAH A, AL-MUHAINI M. The impact of seasonal ARMA wind speed modeling on the reliability of power distribution systems[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA. IEEE, 2017: 1-5.
- [8] PANG D Z, LI G Y. Research on wind power output reconstruction technology based on multiple time scales[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Beijing, China. IEEE, 2018: 1-5.
- [9] 汤向华,李秋实,侯丽钢,等. 基于 Copula 函数的风电时序联合出力典型场景生成[J]. 电力工程技术,2020,39(5):152-161,168.
TANG Xianghua, LI Qiushi, HOU Ligang, et al. Generation of typical sequential joint output scenarios of wind power based on Copula function[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 152-161, 168.
- [10] 潘益. 综合能源系统多能流优化管理关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2020.
PAN Yi. Research on key technologies of multi-energy flow optimization and management in integrated energy system[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [11] 李湃,刘纯,黄越辉,等. 基于隐马尔科夫模型的多风电场相关性出力时间序列建模方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(19):5683-5691,5896.
LI Pai, LIU Chun, HUANG Yuehui, et al. Modeling correlated power time series of multiple wind farms based on hidden Markov model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5683-5691, 5896.
- [12] 丁明,宋晓皖,孙磊,等. 考虑时空相关性的多风电场出力场景生成与评价方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):39-47.
DING Ming, SONG Xiaowan, SUN Lei, et al. Scenario generation and evaluation method of multiple wind farms output con-

- sidering spatial-temporal correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 39-47.
- [13] 吴峰,王飞,顾康慧,等. 基于 MEEMD-ARIMA 模型的波浪能发电系统输出功率预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 65-70.
WU Feng, WANG Fei, GU Kanghui, et al. Output power prediction of wave energy generation system based on modified ensemble empirical mode decomposition-autoregressive integrated moving average model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 65-70.
- [14] WU F, ZHOU N P, JU P, et al. Wind-wave coupling model for wave energy forecast [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 586-595.
- [15] 周能萍,吴峰. 基于风-浪和灰色模型的波浪能发电系统输出功率短期预测[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 58-63.
ZHOU Nengping, WU Feng. Wind-wave and grey model based short-term output power prediction of wave energy generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 58-63.
- [16] 张亚群,盛松伟,游亚戈,等. 波浪能发电技术应用发展现状及方向[J]. 新能源进展, 2019, 7(4): 374-378.
ZHANG Yaqun, SHENG Songwei, YOU Yage, et al. Development status and application direction of wave energy generation technology [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(4): 374-378.
- [17] 王世明,李森森,李泽宇,等. 国际潮流能利用技术发展综述[J]. 船舶工程, 2020, 42(S1): 23-28, 487.
WANG Shiming, LI Miaomiao, LI Zeyu, et al. Development overview of international tidal energy utilization technology [J]. Ship Engineering, 2020, 42(S1): 23-28, 487.
- [18] S N D, SELLDURAI R, CHELLADURAI C, et al. Cost minimization in a microgrid connected with wind and PV generations using a hybrid cat swarm optimization and micro differential evolution [C]//2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). Perth, WA, Australia. IEEE, 2019: 1-6.
- [19] 谢桦,滕晓斐,张艳杰,等. 风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 70-76, 115.
XIE Hua, TENG Xiaofei, ZHANG Yanjie, et al. Analysis of economic influence factors in wind-photovoltaic-storage micro-grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 70-76, 115.
- [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.
- [21] 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.
- [22] 辛业春,徐广健,张一峰,等. 不同时间尺度下新能源联合发电特性及最优配比[J]. 吉林电力, 2020, 48(2): 11-14, 18.
XIN Yechun, XU Guangjian, ZHANG Yifeng, et al. Characteristics and optimum proportion of new energy combined power generation at different time scales [J]. Jilin Electric Power, 2020, 48(2): 11-14, 18.
- [23] 陈波,于楠,吴巍,等. 含潮流能/风/蓄/柴的孤岛微网容量优化配置[J]. 电力学报, 2018, 33(3): 207-212.
CHEN Bo, YU Nan, WU Wei, et al. Capacity configuration optimization for microgrid with tidal/wind/battery/diesel in insular islands [J]. Journal of Electric Power, 2018, 33(3): 207-212.
- [24] 叶林,张亚丽,巨云涛,等. 用于含风电场的电力系统概率潮流计算的高斯混合模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4379-4387, 4578.
YE Lin, ZHANG Yali, JU Yuntao, et al. Gaussian mixture model for probabilistic power flow calculation of system integrated wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4379-4387, 4578.
- [25] 汪惟源,窦飞,程锦闽,等. 一种风光联合出力概率模型建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 22-29.
WANG Weiyuan, DOU Fei, CHENG Jinmin, et al. A modeling method for a wind and photovoltaic joint power probability model [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 22-29.

作者简介:



唐成虹

唐成虹(1971),女,硕士,研究员级高级工程师,从事新能源并网与配电自动化技术相关工作(E-mail: tangchenghong@sgepri.sgcc.com.cn);

余良辉(1988),男,硕士,工程师,从事新能源并网与储能技术相关工作;

孙树敏(1968),男,硕士,研究员级高级工程师,从事新能源发电、分布式电源及微网技术相关工作。

(下转第 127 页)

Optimal operation of hybrid energy storage integrated micro-energy network considering carbon quote

QIU Chun¹, YING Zhanfeng¹, FENG Yi², YAN Jianhu³

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. College of Economics and Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The impact of carbon trading policies is rarely considered in the current optimal operation strategy of integrated micro-energy network system. For this reason, a optimization operation model of hybrid energy storage micro-energy network that takes into account the cost of carbon emissions is proposed in this paper. The model first combines source-load-storage and energy conversion devices for an integrated micro-energy network system configuration, and establishes an optimal objective function considering carbon allowances according to the implementation scheme for carbon emission allowance allocation. The simulation is then carried out on the basis of data from a certain region, and the results of the optimized operation of the system to meet the minimum cost of carbon emissions are obtained by using Gurobi. The results of the calculation examples show that the free carbon emission allowance can reduce the operating cost of the integrated micro-energy network system and affect the system operation strategy. The model proposed in this paper can reflect the impact of carbon emission cost factors on energy consumption structure, and provide reference and basis for the configuration and operation of the energy structure of the integrated micro-energy network system.

Keywords: integrated micro-energy network system; hybrid energy storage; carbon emission quota; Gurobi; optimized operation; energy structure configuration

(编辑 陆海霞)

(上接第 104 页)

Gaussian mixture model based optimal allocation of marine energy power generation resources

TANG Chenghong^{1,2,3}, YU Lianghai^{1,2}, SUN Shumin⁴, YU Peng⁴, ZHAO Zixuan⁵, QIN Chuan⁶

(1. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology

Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation Control, NARI

Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 4. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan

250002, China; 5. State Grid Huai'an Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Huai'an

223002, China; 6. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to make full use of marine renewable energy such as waves and tidal power generations, an optimal allocation method of marine energy power generation resources with the objective of optimal absorption rate is proposed for the island power grid. Firstly, Gaussian mixture model (GMM) is used to describe the random fluctuation of marine energy generation and generate the output scene. Secondly, the optimal allocation model of marine energy power generation resources for island power grid is constructed with the objective of optimal marine energy absorption rate. Then, the permeability, absorption rate and source-load matching degree are comprehensively analyzed to obtain the optimal allocation scheme. Finally, based on actual island load, wave and tidal current data, an example of optimal allocation of marine energy power resources is built, and the value range of permeability constraint in optimal allocation of resources is analyzed. The results show that the source-load matching degree increases at first and then decreases under different permeability constraints. Within the range of the optimal permeability constraint, there are little difference and same trend between the optimal configuration results of the GMM and the measured data scenes, which verify the effectiveness of the GMM to generate marine energy output scenes.

Keywords: wave energy; tidal current energy; absorption rate; Gaussian mixture model; source-load matching degree; resource optimal allocation

(编辑 陆海霞)