

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2017.03.022

# 直驱式波浪能发电场的布局优化研究

顾丽玲<sup>1</sup>, 秦川<sup>1</sup>, 鞠平<sup>1</sup>, 陶爱峰<sup>2</sup>, 吴善翔<sup>2</sup>

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院 江苏 南京 210098)

**摘要:** 文章研究了直驱式波浪能发电场的优化布局问题。将直驱式波浪能发电装置简化为地形,利用 Mike21 软件计算波浪能发电场内的波浪分布,进而将其作为波浪能发电场电气模型的输入,仿真获得波浪能发电场输出功率。在此基础上,基于波浪的传输特性,对波浪能发电场内各发电装置进行优化布局,以保证发电场的平均输出功率,同时改善功率输出的波动性。得到优化布局方案后,分别在规则波和不规则波两种情况下验证了方案的有效性。

**关键词:** 直驱式波浪能发电场; 布局优化; 波浪分布; 功率波动

**中图分类号:** TK6; P743.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2017)03-0467-08

## 0 前言

为满足能源需求并改善能源结构、减少环境污染、促进经济发展,开发可再生能源已然成为全球关注的热点<sup>[1]</sup>。我国是海洋大国,波浪能作为一种清洁无污染的可再生能源,越来越受到人们的关注。波浪能短时间内变化小,可预测性好,且能量密度较高,全球储量丰富<sup>[2]</sup>。目前,世界上已有少数基于不同发电原理的小型波浪发电阵列投入试验,如 Pelamis, WaveCat, WaveDragon, Power-Buoy 等<sup>[3-5]</sup>。

波浪能发电功率具有较强的波动性,大规模波浪能发电接入电网后,将对电力系统的安全稳定运行产生重要的影响。传统方法是采用储能系统平滑输出功率波动,但这种方法不但会增加投资成本,而且使得系统结构更为复杂<sup>[6-8]</sup>。值得注意的是,波浪的传输具有一定的时滞效应,即对波浪能发电场而言,后排波浪能发电装置的输出功率相比前排发电装置的输出功率,存在一定的滞后。若波浪能发电场内前后两排波浪能发电装置间距得当,则有可能明显改善发电场的整体功率波动,反之则会使功率波动加剧,甚至出现功率过零点的情况<sup>[9]</sup>。因此,在波浪能发电场建设之初,根据发电场所处海域的特点对其进行优化布局,具有重要意义。

对于潮流能发电场的优化布局,国内外已有

学者进行了较为深入的研究<sup>[10-12]</sup>。而波浪能发电装置多种多样,不同波浪能发电装置所组成的波浪能发电场的布局也不一样。在研究波浪能发电场的优化布局时,须要较为精确地模拟波浪能发电场内的波浪分布以及场内各波浪能发电装置对波浪分布的影响,以获得各种布局下波浪能发电装置以及整个波浪能发电场的输出功率。以往的方法中,要么对波浪能发电场的输入,即波浪分布情况进行较为详细的模拟,但对输出,即输出功率采用简化公式进行计算;要么对波浪能发电场的输入采用时滞和尾流的经验公式进行简单计算,但对输出功率采用详细的电气模型进行详细模拟<sup>[3-5],[13]</sup>。这些方法由于在输入侧或者输出侧做了较大简化,可能导致较大的误差。

为此,本文研究了直驱式波浪能发电场的布局优化问题。将发电场中的波浪能发电装置作为地形处理,采用 Mike21 软件对发电场内的波浪分布进行详细模拟,然后将其作为直驱式波浪能发电场详细电气模型的输入,从而获得较为精确的发电场输出功率。进而从既保证发电平均输出功率又改善输出功率波动性的角度,对波浪能发电场内各发电装置进行优化布局,并分别用规则波和不规则波对优化布局进行了验证。

## 1 波浪场布局假设条件

文献[4],[5],[13]指出,随着波浪能发电场内

收稿日期: 2016-08-11。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51137002); 国家自然科学基金青年项目(51407060)。

通讯作者: 秦川(1981-),男,江苏泰州人,博士,讲师,研究方向为可再生能源发电系统建模与控制。E-mail: cqin@hhu.edu.cn

行数的增加, 后排波浪能发电装置的波浪能利用率将急剧下降。因此, 建议波浪发电场一般设置为两排, 且各行之间以及同一行中各相邻波浪能发电装置的间距设为  $2w \sim 3w$  ( $w$ 指的是单个波浪能发电装置的自身宽度)<sup>[13]</sup>。但是, 这种布局方法仅考虑了波浪能的利用率, 未考虑波浪能发电场的功率波动, 本文将其称为长方形布局。选取整体外形为  $l \times w \times h = 48 \text{ m} \times 28 \text{ m} \times 38 \text{ m}$  的波浪发电装置 6 台, 假定各波浪能发电装置的间距为  $3w$ , 由此确定的装机海域, 如图 1 所示<sup>[14]</sup>。图 1 中装机海域的面积为  $L \times W = (6w + 3l) \times 5w$ 。同时, 假定所研究的海域海底地形平坦, 即水深不变, 均为  $38 \text{ m}$ 。

为简化问题, 首先给出如下假设:

- ①波浪能发电装置型号一致, 台数不变;
- ②所研究的海域已知, 且固定不变;
- ③各波浪能发电装置的中心点间距不小于  $3w$ ;
- ④海岸装机工程一般是对称安装, 因此, 本文假定波浪能发电场的布局关于入射波浪传播方向对称。

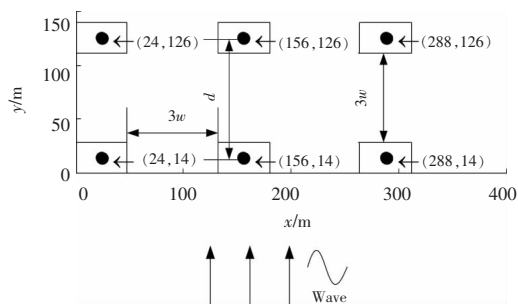


图 1 长方形布局结构

Fig.1 Rectangular placement structure

由此可以找出如图 2 所示的 8 种可能布局。须要指出的是, 图 2 中所示的各种布局仅仅体现了发电装置的排布方式, 并未涉及发电场中各发电装置的相互间距。即使在同一种排布方式中, 各发电装置的相互间距也存在多种可能性。

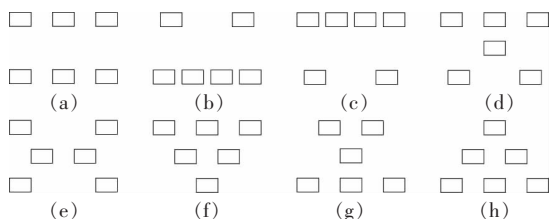


图 2 可能的波浪场布局结构

Fig.2 The possible placement structure of wave farm

## 2 直驱式波浪能发电场的详细模拟

### 2.1 利用 Mike21 软件模拟波浪能发电场的波浪分布

Mike21 是一个专业的工程软件包, 该软件采用 Madsen 提出的扩展型 Boussinesq 方程作为控制方程, 可以很好地模拟波浪在近海岸地区的折射、反射、绕射现象, 已得到了广泛的认可和引用<sup>[15]</sup>。本文采用 Mike21 软件将波浪能发电场模型简化为地形, 由此可以较为精确地获取各个波浪能发电装置所在区域的实时波面数据。在 Mike21 模型中, 外海边界条件为开边界的辐射条件、四边透水, 波浪能发电装置处为全反射固壁边界条件。忽略波浪发电装置的波能吸收过程, 这个假定在研究其他海洋能(如潮流能)发电装置布局优化模型中被经常采用。

本文采用的直驱式波浪能发电装置参考了文献[14], 底面面积为  $l \times w = 48 \text{ m} \times 28 \text{ m}$ , 中心部位放置了直径为  $9.5 \text{ m}$  的 AWS 浮子, 整体高度  $h = 38 \text{ m}$ 。模型采用空间步长  $dx = dy = 2 \text{ m}$  的正交矩形网格, 网格数为  $600 \times 600$ , 计算时间步长为  $0.1 \text{ s}$ , 模拟时间为  $360 \text{ s}$ 。在 Mike21 模型中, 如若地形坡度过大, 会出现相邻两计算网格水位突变, 使得计算过程中流速梯度过大, 导致计算结果发散。因此, 本文对浮子及沙压载舱的外形做一定的调整。单个直驱式波浪能发电装置在 Mike21 模型中的简化模型, 如图 3 所示。

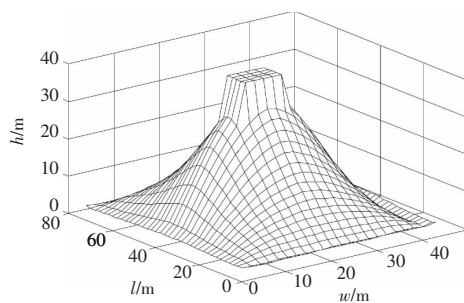


图 3 AWS 波浪能发电装置在 Mike21 中的简化模型

Fig.3 Simplified model of AWS-based WEC in Mike21

### 2.2 直驱式波浪能发电装置电气模型

本文采用的直驱式波浪能发电装置是 AWS 波浪摆, 由浮子、直线永磁同步发电机、“背靠背”电力电子变换器等部分构成(图 4)。本文仅列出 AWS 波浪发电装置的机械动态模型以及直线永磁发电机模型, “背靠背”变换器及控制器模型可参考文献[16]~[19]。

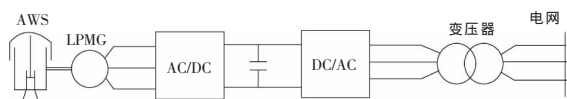


图4 AWS波浪能发电装置

Fig.4 AWS-based wave energy conversion system

为了简化计算,本文采用单弹性质量块简化模型来描述AWS波浪能发电装置的驱动部分<sup>[14],[16]-[19]</sup>:

$$\frac{dx}{dt}=v \quad (1)$$

$$m_{tot} \frac{dx}{dt} + \beta_g v + \beta_w v + k_s x = F_{wave} \quad (2)$$

式中: $x$ 为AWS浮子和直线永磁发电机转子的位移, $m$ ; $v$ 为AWS浮子和直线永磁发电机转子的运动速度,m/s; $m_{tot}$ 为AWS所有运动部件的质量总和(包括AWS浮子、随浮子运动水体、直线永磁发电机转子以及其他随浮子运动的部件),kg; $\beta_g$ 为直线永磁发电机的阻尼系数; $\beta_w$ 为AWS的水动力阻尼系数; $k_s$ 为AWS的弹性系数; $F_{wave}$ 为波浪作用在AWS浮子上力的总和,为整个波浪能发电装置的输入激励,N。

根据文献[21], $F_{wave}$ 可根据以下公式计算:

$$F_{wave}(\omega) = -\rho g s_f A(\omega_w) \int_{a_1}^{a_2} \frac{\cosh[k(\omega)(h-x)]}{\cosh[k(\omega)h]} dx \\ = \rho g s_f A(\omega_w) \frac{\sinh(kh-ka_1) - \sinh(kh-ka_2)}{k \cosh(kh)} \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为海水密度,kg/m<sup>3</sup>; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $s_f$ 为浮子面积,m<sup>2</sup>; $A(\omega_w)$ 为波浪的峰值,m; $h$ 为海水深度,m;波数 $k=\omega_w^2/g$ ,rad<sup>2</sup>/m; $a_1$ 和 $a_2$ 分别为浮子到波峰、波谷的距离,m。

AWS所采用的直线永磁发电机模型可描述为<sup>[16]-[19]</sup>

$$L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + X_s i_{qs} - u_{ds} \quad (4)$$

$$L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - X_s i_{ds} - u_{qs} + \omega_g \psi_{PM} \quad (5)$$

式中: $u_{ds}, u_{qs}$ 分别为发电机端电压的直、交轴分量,V; $R_s$ 为发电机的电阻, $\Omega$ ; $\omega_g$ 为发电机的电感,H; $i_{ds}, i_{qs}$ 分别为发电机电流的直、交轴分量,A; $\omega_g$ 为发电机感应电压角速度, $\omega_g=2\pi v/\sigma$ ,rad/m; $\sigma$ 为直线发电机的极距,m; $\psi_{PM}$ 为永磁体励磁磁链,Wb; $X_s$ 为直线永磁发电机的同步电抗, $X_s=|\omega_g|L_s, \Omega$ 。

### 2.3 直驱式波浪能发电场的电气模型

本文在Matlab/Simulink环境下搭建了直驱式波浪能发电场仿真模型。场内共设有6台波浪能发电机组,所有机组接入25kV集电网络,并通过双回30km的110kV输电线路与电网相连,对应的仿真系统结构如图5所示。图5中标明了各波浪能发电装置所获得的波浪力。单台AWS和直线永磁发电机的参数参考进行过实际海试的波浪能发电装置原型机(表1)<sup>[14],[18]</sup>。

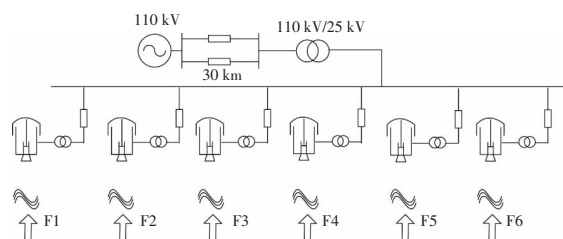


图5 AWS波浪发电场的并网仿真系统

Fig.5 Simulation system of AWS-based wave farm integrated into power grid

表1 单台AWS和直线永磁发电机参数

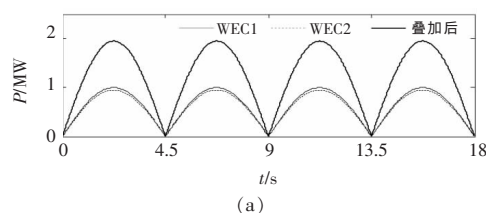
Table 1 Parameters of an AWS and a linear permanent magnet generator

参数	数值
$m_w/kg$	$0.6 \times 10^6$
$\beta_g/Ns \cdot m^{-1}$	$1.004 \times 10^6$
$k_s/N \cdot m^{-1}$	$0.56 \times 10^6$
$R_s/\Omega$	0.29
$L_s/mH$	31.00
$\psi_{PM}/Wb$	23.00
$\sigma/m$	0.10
$U_N/V$	575

### 3 波浪能发电装置间距与发电场的功率波动

#### 3.1 理论分析

波浪的周期性和时滞效应的存在使得波浪能发电场的布局方式会影响输出功率的波动状况。从数学角度分析,若波峰与波峰(波谷与波谷)叠加,则会加剧输出功率的波动,如图6(a)所示;若波峰与波谷叠加,即峰谷互补,则有效减缓了输出功率波动,如图6(b)所示。



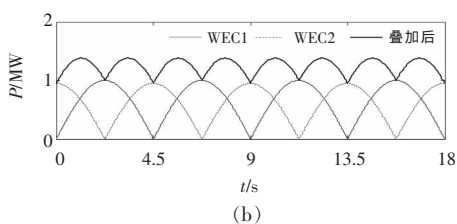


图6 浮子输出功率  
Fig.6 Output power of floater

从理论上来说,当浮子前后间距为  $0.25\lambda, 0.75\lambda \dots$  时,总输出功率相对最为平滑;当前后间距为  $0.5\lambda, 1.0\lambda \dots$  时,总输出功率波动相对最为剧烈。为避免前后排浮子功率出现峰峰叠加的现象,波浪能发电装置中心纵向间距应满足:

$$d = |y_{n+1} - y_n| \notin (0.5k\lambda) \quad n=N^+, k=1, 2, 3 \dots \quad (6)$$

式中: $n$  为波浪能发电装置所在的排数; $\lambda$  为波浪波长, m。

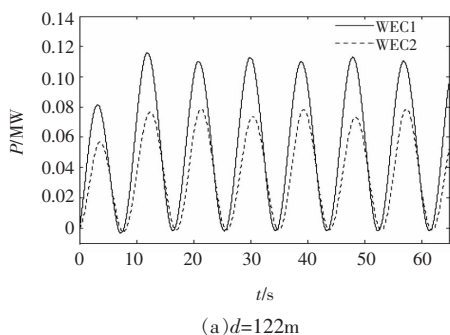
### 3.2 算例分析

当已知水深和入射波浪的平均周期时,可通过式(7)获得某一测点处的波浪波长。

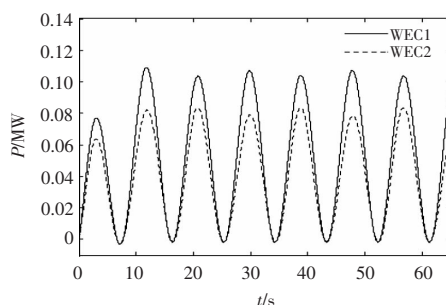
$$\left\{ \begin{aligned} \lambda &= \frac{g\bar{T}^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h'}{\lambda} \\ \tanh \frac{2\pi h'}{\lambda} &= \frac{e^{\frac{2\pi h'}{\lambda}} - e^{-\frac{2\pi h'}{\lambda}}}{e^{\frac{2\pi h'}{\lambda}} + e^{-\frac{2\pi h'}{\lambda}}} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: $\lambda$  为波浪波长, m;  $\bar{T}$  为入射波平均周期, s;  $h'$  为水深, m。

在本文中,取  $h'=38$  m,波浪是周期为 9 s 的规则波,则波长  $\lambda=121.474$  4 m。采用长方形布局,通过 Mike21 软件以及发电场电气模型仿真,得到的发电场输出功率如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当前后两排间距  $d=122$  m  $\approx \lambda$  时,两排波浪能发电装置的功率非常接近图 6(a) 所示的峰峰叠加;当  $d=118$  m 时,前排发电装置与后排发电装置



(a)  $d=122$  m



(b)  $d=118$  m

图7 WEC 输出功率

Fig.7 Output power of WEC

同时出现波峰,输出功率波动最为剧烈。这是因为当安好 WEC 后,局部水深会有一些的变化,波浪波长亦将随之变化。为此,对式(8)做一定的修正。 $d = |y_{n+1} - y_n| \notin (0.5k\lambda + \Delta l \pm \varepsilon) \quad n=N^+, k=1, 2, 3 \dots \quad (8)$  式中: $\Delta l$  为修正量,由仿真得到, m;  $\varepsilon$  为裕度,本文中  $\varepsilon=0.125\lambda$ , m。

### 4 直驱式波浪能发电场的优化布局

须要指出的是,虽然单纯采用前后间距为  $0.25\lambda, 0.75\lambda \dots$  对发电场进行排布时,总输出功率相对最为平滑,但此时并不能保证发电场的平均输出功率最优。为此,本文提出了如下的优化布局思路,以保证发电场的平均输出功率,同时改善输出功率的波动性。

(a)在满足上文给出的波浪场布局假设条件的同时,加入约束条件式(8)。将  $x$  轴步长选为 16 m,对应的  $y$  轴步长近似选为 10 m,根据式(9)进行搜索,从而确定发电场 8 种排布方式(图 2)中所有可能的发电装置相互间距分布。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{l}{2} &\leq x_i \leq L - \frac{l}{2} \\ \frac{w}{2} &\leq y_i \leq W - \frac{w}{2} \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} &\geq 3w \\ |y_i - y_j| &\notin (0.5k\lambda + \Delta l \pm \varepsilon) \quad k \in N^+ \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中: $x_i$  为波浪能发电装置中心点横坐标, m;  $y_i$  为波浪能发电装置中心点纵坐标, m;  $i, j=1, 2, \dots, 6$ , 且  $i \neq j$ ;  $l$  为单个波浪能发电装置的长, m;  $w$  为单个波浪能发电装置的宽, m;  $L$  为所研究海域的长, m;  $W$  为所研究海域的宽, m;  $\Delta l$  为修正量,由仿真得到, m;  $\varepsilon$  为裕度,本文中  $\varepsilon=0.125\lambda$ , m。

(b)假定入射波为规则波,通过仿真找到平均功率  $\bar{P}$  不低于  $90\% \bar{P}_{\text{tra}}$  ( $\bar{P}_{\text{tra}}$  为长方形布局下的平

均功率)的所有波浪场布局结构(包括排布方式以及发电装置的相互间距),并找出对应布局结构下 $\bar{P}$ 最优的方案。

(c)将入射波浪由规则波改为采用 JONSWAP 作为频率波谱生成的不规则波,对规则波下所得到的优化布局方案进行验证。

#### 4.1 入射波为规则波

在本文给定的海域中,当控制方程为扩展型 Boussinesq 方程时,为确保 Mike21 软件仿真的精确性,所要求的最小入射波周期为  $T_{\min}=6.98$  s,因而本文假设入射波为  $T=9$  s,  $H=1.1$  m 的规则波。通过仿真计算,选取稳定运行的 32.5 s 数据,共找到 2 组布局结构存在  $\bar{P}$  不低于  $90\%\bar{P}_{\text{tra}}$  的情况,这 2 组布局结构如图 2(g), (h) 所示。图 8 给出了这 2 组布局结构下各自  $\bar{P}$  最优的方案:凹形布局、三角形布局,并标出了各发电装置的中心点坐标。表 2 则给出了长方形布局,凹形布局和三角形布局对应的平均功率  $\bar{P}_{\text{tra}}, \bar{P}_{1_{\text{opt}}}, \bar{P}_{2_{\text{opt}}}$ 。

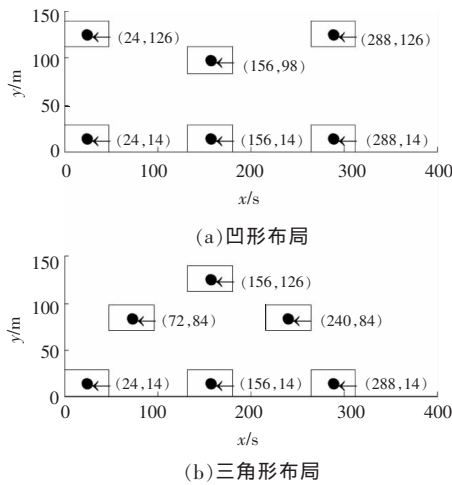


图 8 新布局结构

Fig.8 New placement structure

表 2 规则波下不同布局的平均功率对比

Table 2 Mean power comparison between different placements under regular wave

长方形布局	凹形布局	凹形布局
$\bar{P}_{\text{tra}}/\text{MW}$	$\bar{P}_{1_{\text{opt}}}/\text{MW}$	$\bar{P}_{2_{\text{opt}}}/\text{MW}$
0.309 3	0.308 7	0.290 7

从表 2 中的数据不难发现,3 组布局结构下的平均功率几乎相同。规则波下,长方形布局,凹形布局和三角形布局的输出功率如图 9 所示。由图 9 可看出,新布局的功率波动得到了较为显著的改善。

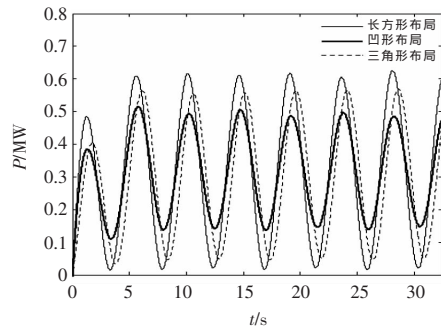


图 9 规则波下不同布局的输出功率对比

Fig.9 Output power comparison between different placements under regular wave

#### 4.2 入射波为不规则波

将入射波浪改为如 10 图所示的不规则波(谱峰周期为 9 s),对上述 3 种布局重新进行仿真,选取稳定运行的 90 s 数据,对应的波浪能发电场输出功率如图 11 所示。

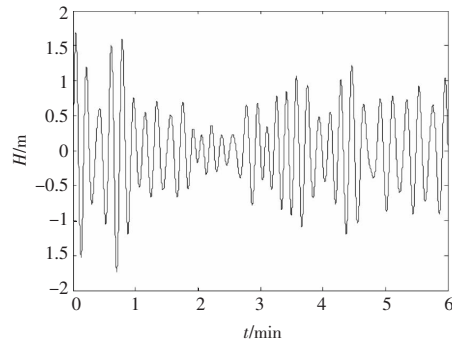


图 10 采用 JONSWAP 作为频率波谱生成的不规则波  
Fig.10 Irregular wave generated by using JONSWAP spectrum

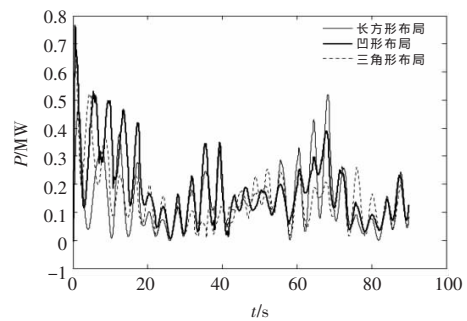


图 11 不规则波下不同布局输出功率对比

Fig.11 Output power comparison between different placements under irregular wave

为验证相对于长方形布局,2 组新布局结构下的功率波动问题是否得到了改善,从数理统计以及基于 t-location scale 分布的输出功率波动量概率分布拟合进行分析。

在基本数理统计量中,平均值越大,中位数就越大,标准差变异系数就越小,功率特性相对较

好。由表 3 可知,在进行的 3 组对比中,凹形布局的功率特性相对最优,平均功率最大且功率波动性最小,长方形布局与三角形布局各有优劣。

表 3 不规则波下不同布局输出功率数理统计  
Table 3 Mathematical statistics of output power of different placements under irregular wave

	长方形布局	凹形布局	三角形布局
平均值	0.145 2	0.183 5	0.143 6
中位数	0.115 9	0.151 0	0.123 1
标准差变异系数	0.734 2	0.688 4	0.711 5

利用 t-location scale 分布对波浪能发电场输出功率进行波动特性分析,不规则波下 3 种布局的输出功率波动量分布如图 12 所示。3 种布局结构下位置参数、尺度参数以及形状参数如表 4 所示。

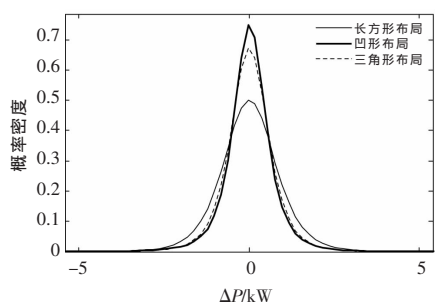


图 12 不规则波下不同布局输出功率波动特性  
Fig.12 Fluctuation characteristic of output power of different placements under irregular wave

表 4 不规则波下不同布局的波动量 PDF 参数  
Table 4 Fluctuation PDF parameters of different placements under irregular wave

	长方形布局	凹形布局	三角形布局
位置参数 $\mu$	0.013 3	0.023 7	0.014 7
尺度参数 $\sigma$	0.761 9	0.488 4	0.556 1
形状参数 $\nu$	5.762	2.991	4.087

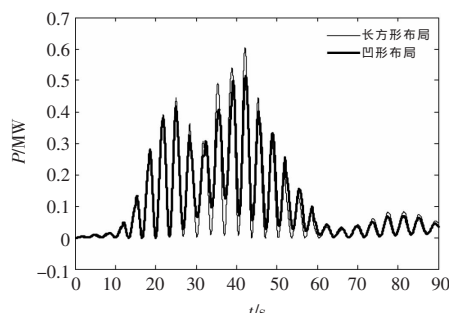
概率分布可以作为波浪能发电场输出功率波动特性的衡量指标之一,分布曲线峰值横坐标越靠近 0,曲线越“高瘦”且尾部衰减越快,即  $|\mu|$ ,  $\sigma, \nu$  值越小,则波动越小。由表 4 可知,就波动特性而言,凹形布局>三角形布局>长方形布局。

综上分析,在规则波和不规则波两种情况下,凹形布局可在最大程度上不影响波浪能发电场的发电量,同时明显改善功率波动问题。

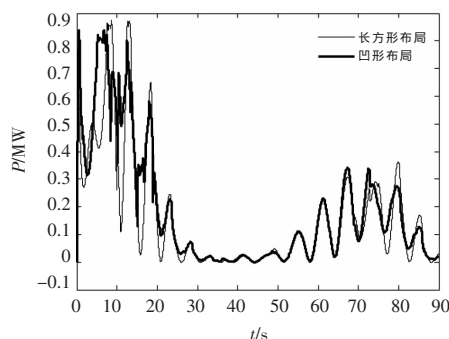
#### 4.3 优化布局对不同波浪谱峰周期的适应性

本文提出的凹形布局是按照波浪谱峰周期为 9 s 时设计的,而实际波浪构成复杂,其周期可能

会发生较大的变化。为此,在保持图 8(a)所示凹形布局不变(布局形状及间距均不变)的情况下,将入射波浪的谱峰周期分别设为 7 s 和 11 s,并与传统的长方形布局进行对比,以验证其对不同波浪周期的适应性。两种谱峰周期下,波浪能发电场的输出功率对比如图 13 所示,输出功率的数理统计如表 5 所示。从图 13 和表 5 中可以看出,当波浪谱峰周期发生变化时,尽管两种布局方式的输出功率已经比较接近,但凹形布局较长方形布局仍存在一定的优势。



(a) 谱峰周期为 7 s



(b) 谱峰周期为 11 s

图 13 不同谱峰周期不同布局输出功率对比  
Fig.13 Output power comparison between different placements when spectrum peak period is different

表 5 不同谱峰周期不同布局输出功率数理统计  
Table 5 Mathematical statistics of output power of different placements when spectrum peak period is different

谱峰周期/s	统计数据	长方形布局	凹形布局
7	平均值	0.099 6	0.103 2
	中位数	0.040 3	0.046 4
	标准差变异系数	1.326 1	1.173 6
11	平均值	0.164 5	0.178 6
	中位数	0.082 4	0.095 4
	标准差变异系数	1.239 8	1.161 2

此外,根据历史海洋观测资料统计结果,可获取研究海域的波浪平均周期或者出现概率较大的

谱峰周期,进而根据该周期进行优化布局,可以在一定程度上改善发电场输出功率的波动。

## 5 结论

本文研究了直驱式波浪能发电场的布局优化问题,得出如下结论。

①将波浪能发电装置模型简化为地形条件,在 Mike21 软件中模拟波浪在发电场中的折射、反射、绕射现象,可以较为精确地获取各个波浪能发电装置所在区域的实时波面数据。

②通过调整前后排波浪能发电装置的间距,可以有效避开输出功率峰峰叠加的情况,缓解功率波动。

③规则波和不规则波两种算例的仿真结果表明,布局优化后的波浪场既能保证平均发电功率,又能有效改善输出功率的稳定性。

实际的波浪能发电装置是吸能装置,为了保证仿真的可行性将波浪能发电装置简化为地形,忽略了发电装置的波能吸收过程,与实际情况有一定的偏差。在后续的研究中,还须进一步通过试验验证布局优化的有效性。此外,实际海域的波浪周期构成复杂,但根据历史海洋观测资料统计结果,可获取研究海域的波浪平均周期或出现概率较大的谱峰周期,由此根据本文方法在该海域进行波浪发电场的优化布局具有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 韩芳.我国可再生能源发展现状和前景展望[J].可再生能源,2010,28(4):137-140.
- [1] Han Fang. Development status and prospect of renewable energy in China [J].Renewable Energy Resources, 2010,28(4):137-140.
- [2] 肖曦,摆念宗,康庆,等.波浪发电系统发展及直驱式波浪发电系统研究综述 [J]. 电工技术学报,2014,29(3):1-11.
- [2] Xiao Xi,Bai Nianzong,Kang Qing,et al. A review of the development of wave power system and the research on direct-drive wave power system[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(3):1-11.
- [3] Beels C,Troch P,De Backer G,et al. Numerical implementation and sensitivity analysis of a wave energy converter in a time-dependent mild-slope equation model[J].Coastal Engineering,2010,57(5):471-492.
- [4] Fernandez H,Iglesias G,Carballo R,et al. The new wave energy converter wavecat:Concept and laboratory tests[J].Marine Structures,2012,29(1):58-70.
- [5] Iglesias G,Carballo R. Wave farm impact:The role of farm-to-coast distance [J].Renewable Energy,2014,69(3):375-385.
- [6] 吴峰,张小平,鞠平.电池储能 in 直接驱动式波浪能发电场并网运行中的应用[J].电力系统自动化,2010,34(14):31-36.
- [6] Wu Feng,Zhang Xiaoping,Ju Ping. Application of battery energy storage in the direct-drive wave energy conversion farm integrated into power grid[J].Automation of Electric Power systems,2010,34(14):31-36.
- [7] 李凯,吴峰,秦川,等.直驱式波浪发电系统的输出功率平滑控制策略 [J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(3):20-25.
- [7] Li Kai,Wu Feng,Qin Chuan,et al. Output power smoothing control of direct-drive wave energy conversion system [J].Proceedings of the CSU-EPSA,2014,26(3):20-25.
- [8] 黄晓东,郝木凯,陆志刚,等.微网系统中电池储能系统应用技术研究[J].可再生能源,2012,30(1):38-41.
- [8] Huang Xiaodong,Hao Mukai,Lu Zhigang,et al. Application of battery energy storage system in microgrid[J].Renewable Energy Resources,2012,30(1):38-41.
- [9] 肖曦,摆念宗,康庆.直驱式波浪发电系统浮子形状与排布优化研究[J].电工电能新技术,2014(9):7-13.
- [9] Xiao Xi,Bai Nianzong,Kang Qing. Research on optimizations of buoy shape and array geometry of direct-drive wave energy converters[J].Advanced Technology of Electronical Engineering and Energy,2014(9):7-13.
- [10] 安佰娜.潮流能发电场尾流场数值模拟及其多机组影响规律研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [10] An Baina. Numerical analysis of the wake and interaction effect analysis for tidal arrays in the tidal farm[D]. Qingdao:Ocean University of China,2012.
- [11] 刘丞.海洋潮流能发电机布局优化策略探索[D].杭州:浙江大学,2013.
- [11] Liu Cheng. Search for optimal ocean tidal current turbines positioning strategy [D].Hangzhou:Zhejiang University,2013.
- [12] Bai L,Spence R R G,Dudziak G. Investigation of the influence of array arrangement and spacing on tidal energy converter (TEC) performance using a 3-dimensional CFD model [A].Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference [C]. Uppsala:Sweden,2009.654-660.

- [13] 秦川,管维亚,鞠平,等.并网 AWS 波浪发电场等效建模[J].电力自动化设备,2015,35(11):25-31.
- [13] Qin Chuan,Guan Weiya,Ju Ping,et al. Equivalent modeling of AWS-based wave farm [J].Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):25-31.
- [14] De Sousa Prado M G,Gardner F,Damen M,et al. Modelling and test results of the archimedes wave swing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A:Journal of Power and Energy,2006,220(8):855-868.
- [15] Madsen P A,Murray R,Sørensen O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics [J].Coastal Engineering,1991,15(4):371-388.
- [16] 鞠平.可再生能源发电系统的建模与控制[M].北京:科学出版社,2014.
- [16] Ju Ping. Modelling and Control of Renewable Power Generation Systems[M]. Beijing:Science Press,2014.
- [17] Wu F,Zhang X P,Ju P,et al. Modeling and control of AWS-based wave energy conversion system integrated into power grid[J].IEEE Transactions on Power Systems,2008,2(3):1196-1204.
- [18] Wu F,Zhang X P,Ju P,et al. Optimal control for AWS-based wave energy conversion system[J].IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(4):1747-1755.
- [19] Wu F,Ju P,Zhang X P,et al. Modeling, control strategy, and power conditioning for direct-drive wave energy conversion to operate with power grid [J].Proceedings of the IEEE,2013,101(4):925-941.
- [20] 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] Qin Chuan,Ju Ping,Wen Danyin,et al. Hybrid offshore wind,wave and tidal turbine energy conversion system: Structure and electrical interface [J].Proceedings of the CSEE,2014,34(13):2013-2021.
- [21] 霍政界,吴峰,陶爱峰,等.直驱式波浪发电系统输出功率的短期预测[J].电力系统自动化,2014(21):13-18.
- [21] Huo Zhengjie,Wu Feng,Tao Aifeng,et al. Short-term prediction on output power of direct-drive wave power generation system[J].Automation of Electric Power Systems,2014(21):13-18.

## Research on optimal layout of direct-drive wave farm

Gu Liling<sup>1</sup>, Qin Chuan<sup>1</sup>, Ju Ping<sup>1</sup>, Tao Aifeng<sup>2</sup>, Wu Shanxiang<sup>2</sup>

(1.College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2.College of Harbour Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China)

**Abstract:** The optimal layout of direct-drive wave farm is studied in this paper. The model of the wave energy converter (WEC) is simplified to the terrain. The wave distribution in the wave farm is calculated by the Mike21 software. Thereby the input of the electrical model of the wave farm can be obtained. Then the output power can be subsequently calculated by simulation. Based on this simulation method, the layout configuration of the wave farm is optimized to mitigate the power fluctuation of the wave farm. Simulations are carried out under both the regular and irregular waves to verify the effectiveness of the proposed strategies.

**Key words:** direct-drive wave farm; optimal layout; wave distribution; power fluctuation