

并网 AWS 波浪发电场等效建模

秦 川^{1,2},管维亚^{1,2},鞠 平^{1,2},吴 峰^{1,2}

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;

2. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏 南京 210098)

摘要: 提出了阿基米德波浪摆(AWS)发电场的等效建模方法,重点研究波浪力输入等效。提出基于波浪最大能量捕获控制策略下 AWS 波浪力输入和输出有功功率之间的稳态关系,由于等效前后的发电场输出有功功率应该相等,在规则波浪和不规则波浪 2 种情况下,反推获得等效模型的波浪力输入,同时计及功率补偿。搭建了波浪能发电场详细模型,并将其等效为一台 AWS 波浪能发电单元。仿真结果表明,单机等效模型的稳态有功输出和故障时动态响应均与详细模型高度吻合。

关键词: 阿基米德波浪摆; 波浪最大能量捕获控制; 等效建模; 波浪力等效; 发电; 可再生能源

中图分类号: TM 619

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.005

0 引言

波浪能是一种清洁的可再生能源。调查研究表明,全球可利用的波浪能达到 2×10^9 kW,相当于目前全世界用电负荷的 2 倍^[1]。大规模开发利用波浪能对缓解能源危机和环境污染问题具有重要意义。近年来,各国开发出了多种波浪能发电装置,如振荡水柱(OWC)波浪发电装置、阿基米德波浪摆(AWS)、Pelamis、Wave Dragon、鸭式及鹰式波浪能发电装置等^[2-4],其中部分已经进入了商业化试运营。可以预见,在不远的将来,随着波浪能发电技术日

益成熟,将会有越来越多的波浪能发电系统接入电网运行^[2]。

AWS 是第 1 种采用直接驱动式的波浪发电系统^[5-7],其利用水的浮力或重力直接驱动直线永磁发电机(LPMG)发电,具有发电效率高、系统结构简单等特点。大规模 AWS 波浪能发电场接入电网,必然对电网的安全稳定产生重要的影响。在大规模波浪能发电场并网系统的仿真分析中,如果对每台 AWS 进行详细建模将极大地增加仿真的复杂度,导致计算时间长、资源利用率低^[8]。因此,构建能反映大规模波浪发电场整体动态特性的等效模型十分必要。

大规模波浪发电场等效建模作为一个较为新颖的课题,目前直接与其相关的国内外文献很少。但已有不少学者对风电场的等效建模有所研究^[8-10]。在对波浪发电场进行等效建模时,等效模型结构和等效参数的确定可以参考风电场等效建模的相关

收稿日期:2014-12-14;修回日期:2015-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51137002,51190102,51377047);国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228204)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51137002,51190102,51377047) and the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228204)

BESS capacity planning based on dynamic SOC adjustment

ZHANG Xi¹,ZHANG Feng¹,GONG Naiqi²,LIU Haike³,LIANG Jun¹,YANG Libin⁴

(1. Electric Vehicle Engineering Laboratory of Shandong Province,Shandong University, Ji'nan 250061,China;

2. College of Information & Electrical Engineering,Shandong University of Science and Technology,

Qingdao 266590,China;3. State Grid of China Technology College, Ji'nan 250061,China;

4. State Grid Qinghai Electric Power Research Institute,Xining 810000,China)

Abstract: Though the BESS(Battery Energy Storage System) may smooth the wind power fluctuation to effectively improve the stability of wind power output,its expensive cost restricts its overall performance,for which,the energy storage capacity optimization is a way to achieve the balance between its cost and performance. With the SOC(State Of Charge) of BESS as an indicator,a strategy of charge/discharge control based on the variable power correction coefficient is proposed,which effectively smoothes the wind power fluctuation while avoids the phenomenon of over-charge or over-discharge to ensure its lifetime. With the minimum total cost of BESS as its objective,an energy storage capacity optimization model considering the wind farm investment,operational cost and BESS lifetime is built and solved by PSO(Particle Swarm Optimization) algorithm. The simulative analysis verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: energy storage; state of charge; capacity; costs; optimization; wind power

方法。然而对于 AWS 发电系统的波浪力输入等效, 则与风电场动态等效方法不尽相同。在对风电场进行动态等效建模时, 由于时间尺度较小, 可以假设风速恒定; 而波浪力具有一定的周期性, 要用周期、幅值、相位三者进行综合描述^[11-12]。考虑到波浪场内波浪力也会受到时滞效应和尾流效应影响, 发电场中各 AWS 的波浪力输入幅值、相位各不相同。因此, 对大规模波浪发电场进行等效建模的重点在于波浪力输入等效方法。

与其他可再生能源发电系统类似, 在正常工况下, 一般要求 AWS 实现波浪的最大能量捕获。因此, 本文提出了基于最大功率跟踪控制策略下 AWS 波浪发电场中波浪力输入等效方法, 将发电场等效为一台 AWS 波浪能发电装置。本文根据现有文献中波浪发电场的结构布局^[13-17], 在 MATLAB/Simulink 中搭建了计及波浪时滞效应和尾流效应的 AWS 波浪发电场, 并进行动态仿真, 分别在规则波及不规则波 2 种输入下对本文所提等效方法的正确性和有效性进行了验证。

1 AWS 波浪发电系统模型及输出功率方程

1.1 AWS 结构

AWS 波浪发电系统一般采用直线永磁发电机, 并通过全功率“背靠背”电力电子变换器并网^[13], 其结构如图 1 所示。

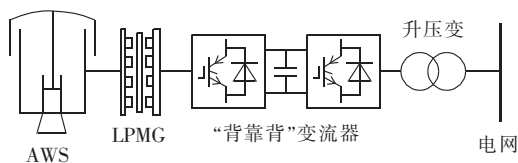


图 1 AWS 波浪发电系统

Fig.1 AWS-based power generation system

1.2 AWS 模型

AWS 运动方程可采用简化模型^[5-7]:

$$m_{\text{tot}} \frac{dv}{dt} + F_g + \beta_w v + k_s x = F_{\text{wave}} \quad (1)$$

其中, m_{tot} 为所有运动部件的质量以及浮子在海浪中运动附加质量的总和; v 和 x 分别为浮子运动的速度和位移, 则 $v = \dot{x}$; β_w 为 AWS 的水动力阻尼系数; k_s 为 AWS 的弹性系数; F_{wave} 为波浪施加在浮子上的力; F_g 为直线永磁发电机施加在浮子上的力, 可以表示为发电机输出有功 P 与浮子运动速度 v 的比值, 见式(2)。

$$F_g = P/v \quad (2)$$

直线永磁发电机本质上为同步发电机, 其 dq 坐标系下的模型可以描述为^[6]:

$$u_{sd} = -R_s i_{sd} - L_s \frac{di_{sd}}{dt} + L_s \omega_g i_{sq} \quad (3)$$

$$u_{sq} = -R_s i_{sq} - L_s \frac{di_{sq}}{dt} - L_s \omega_g i_{sd} + \omega_g \psi_{PM} \quad (4)$$

$$P = \frac{3}{2} E_g i_{sq} \quad (5)$$

其中, u_{sd} 、 u_{sq} 分别为发电机端电压的直、交轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为发电机电流的直、交轴分量; ω_g 为发电机角速度; L_s 、 R_s 分别为发电机的电感和电阻; ψ_{PM} 为永磁体励磁磁链; E_g 为发电机感应电动势, 见式(5)。

$$E_g = \omega_g \psi_{PM} = 2\pi v \psi_{PM} / \lambda \quad (6)$$

1.3 AWS 控制器

AWS 波浪发电系统通过“背靠背”电力电子变换器与电网相连, 其控制系统可以分为电网侧控制器和发电机侧控制器。

电网侧控制器的控制目标是维持“背靠背”变换器中直流电容电压和网侧端口电压恒定, 其结构如图 2 所示^[11-12]。其中, K_{p1} 和 K_{i1} 分别为电容器电压控制器的比例系数和积分系数; K_{p2} 和 K_{i2} 分别为端口电压控制器的比例系数和积分系数; K_{p3} 和 K_{i3} 分别为电网侧变流器电流控制器的比例系数和积分系数; u_{DC} 为电容器电压; u_{DC_ref} 为电容器电压的参考值; u_1 为变压器端口电压; u_{1_ref} 为变压器出口电压参考值; X_c 为连接 AWS 和网络的变压器电抗。

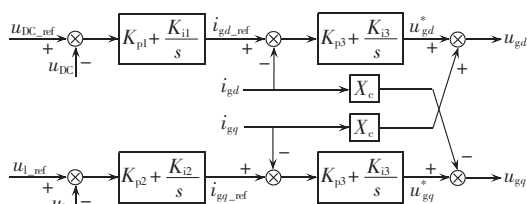


图 2 电网侧控制器结构

Fig.2 Configuration of grid-side controller

发电机侧控制器的目标是波浪能的最大功率捕获, 同时使得直线电机的损耗最小, 其结构如图 3 所示。其中, K_{p4} 和 K_{p5} 为发电机控制器的比例系数; K_{i4} 和 K_{i5} 为发电机控制器的积分系数。

要从波浪中获取最大的波浪能需要满足如下

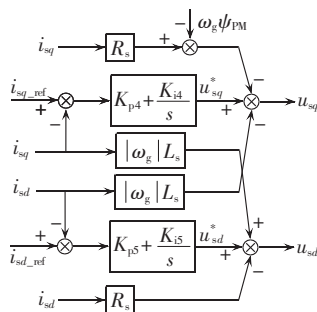


图 3 发电机侧控制器结构

Fig.3 Configuration of generator-side controller

条件^[11-12]。

a. AWS 与波浪发生共振, AWS 的速度与波浪力同相位。假设波浪力为 $F_{\text{wave}} = A \cos(\omega_w t + \alpha_w)$, 其中 A 、 ω_w 、 α_w 分别为波浪力的幅值、角频率和初相位; 假设 AWS 浮子速度为 $v = V \cos(\omega_f t + \alpha_f)$, 其中 V 、 ω_f 、 α_f 分别为 AWS 运动速度的幅值、角频率和初相位。则在共振条件下: $\omega_w = \omega_f$, $\alpha_w = \alpha_f$ 。

b. 直线永磁发电机的阻尼力等于波浪的阻尼力。

则波浪最大能量捕获控制策略下, 直线电机定子电流的控制参考值为^[11-12]:

$$i_{sq_ref} = \frac{\beta_w \lambda v}{3\pi \psi_{PM}} + \frac{(m_{tot} \omega_w^2 - k_s) \lambda x}{3\pi \psi_{PM}} \quad (6)$$

$$i_{sd_ref} = 0$$

1.4 最大波浪能捕获控制策略下 AWS 输出功率方程

在最大波浪能捕获控制策略下, 当控制器正常工作、AWS 处于准稳态时, $i_{sq} = i_{sq_ref}$, $i_{sd} = i_{sd_ref}$ 。将式(6)代入式(4), 可得 AWS 有功功率表达式:

$$P = \frac{3}{2} E_q i_{sq} =$$

$$\frac{3}{2} \frac{2\pi v \psi_{PM}}{\lambda} \left[\frac{\beta_w \lambda v}{3\pi \psi_{PM}} + \frac{(m_{tot} \omega_w^2 - k_s) \lambda x}{3\pi \psi_{PM}} \right] =$$

$$\beta_w v^2 + (m_{tot} \omega_w^2 - k_s) x v =$$

$$\beta_w (\dot{x})^2 + (m_{tot} \omega_w^2 - k_s) x \dot{x} \quad (7)$$

2 AWS 波浪发电场等效建模方法

2.1 等效建模基本步骤

对波浪发电场进行等效建模, 首先需要对波浪发电场集电网络进行等效, 然后确定发电机的等效电气参数, 最后求解等效模型的波浪力输入, 从而获得发电场的单机等效模型。对于内部集电网络的等效, 本文采用文献[18]所提出的方法, 将辐射型结构的波浪发电场中的集电网络等效成并联结构。对于发电机电气参数的等效, 采用基于容量加权求和的聚合方法^[10]。由于篇幅有限, 具体方法此处不再赘述。

下面重点推导波浪力的等效方法。

2.2 规则波浪力输入等效

由于波浪发电场具有空间分布性, 考虑到波浪作用到各 AWS 时具有时滞效应和尾流效应, 大规模波浪发电场中处于不同位置的波浪发电单元所承受的波浪力相位和幅值不同。仅通过加权聚合法无法对波浪力进行精确等效, 本文根据 AWS 波浪发电系统的详细模型, 获得波浪力输入与输出功率之间的稳态关系, 按等效前后稳态功率相等为原则, 反推单机等效模型的波浪力输入。

将式(7)和式(2)代入式(1), 则 AWS 驱动系统方程表示为:

$$m_{tot} \ddot{x} + 2\beta_w \dot{x} + m_{tot} \omega_w^2 x = F_{\text{wave}} \quad (8)$$

设 AWS 承受规则波浪力输入为 $F_{\text{wave}} = A \cos(\omega_w t + \alpha)$, 则 AWS 浮子位移和速度分别为 $x = X \sin(\omega_w t + \alpha)$ 、 $v = \dot{x} = \omega_w X \cos(\omega_w t + \alpha)$ 。将其代入式(8), 可得:

$$2\beta_w \omega_w X \cos(\omega_w t + \alpha) = A \cos(\omega_w t + \alpha) \quad (9)$$

则 AWS 浮子位移 x 的幅值 $X = \frac{A}{2\beta_w \omega_w}$, 将其代入式(7), 即可得到 AWS 模型波浪力输入与有功输出之间的稳态关系:

$$P = \beta_w (\dot{x})^2 + (m_{tot} \omega_w^2 - k_s) x \dot{x} =$$

$$\beta_w \omega_w^2 X^2 \cos^2(\omega_w t + \alpha) +$$

$$(m_{tot} \omega_w^2 - k_s) \omega_w X^2 \sin(\omega_w t + \alpha) \cos(\omega_w t + \alpha) =$$

$$\beta_w \omega_w^2 \left(\frac{A}{2\beta_w \omega_w} \right)^2 \cos^2(\omega_w t + \alpha) +$$

$$(m_{tot} \omega_w^2 - k_s) \omega_w \left(\frac{A}{2\beta_w \omega_w} \right)^2 \times$$

$$\sin(\omega_w t + \alpha) \cos(\omega_w t + \alpha) \quad (10)$$

由于 AWS 驱动系统可采用式(1)所示单弹性质量块模型描述, 其自然振荡频率 ω_n 可表示为:

$$\omega_n = \sqrt{k_s / m_{tot}} \quad (11)$$

根据文献[5], 为实现波浪的最大能量捕获, 一般调节 AWS 的等值弹性系数 k_s 使得 $\omega_n \approx \omega_w$, 则 $m_{tot} \omega_w^2 \approx k_s$, 因此, 式(10)中的第二项可以忽略不计。则输出功率可表示为:

$$P = \beta_w (\dot{x})^2 = \beta_w \omega_w^2 \left(\frac{A}{2\beta_w \omega_w} \right)^2 \cos^2(\omega_w t + \alpha) =$$

$$\frac{A^2}{8\beta_w} \cos(2\omega_w t + 2\alpha) + \frac{A^2}{8\beta_w} \quad (12)$$

可见, 输出有功功率表达式由周期分量和直流分量构成, 其中周期分量幅值与直流分量相等。

假设大型波浪发电场中各 AWS 承受规则波浪力输入为 $F_{\text{wave}, i} = A_i \cos(\omega_w t + \alpha_i)$, 各 AWS 输出功率 P_i 可表示为:

$$P_i = \frac{A_i^2}{8\beta_w} \cos(2\omega_w t + 2\alpha_i) + \frac{A_i^2}{8\beta_w} \quad (13)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n$; n 为发电场中 AWS 波浪能发电单元的总数。

则 n 台 AWS 的有功输出之和 P_Σ 为:

$$P_\Sigma = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{A_i^2}{8\beta_w} \cos(2\omega_w t + 2\alpha_i) + \frac{A_i^2}{8\beta_w} \right] =$$

$$K_{1\Sigma} \cos(2\omega_w t + \alpha_\Sigma) + K_{2\Sigma} \quad (14)$$

其中, $K_{1\Sigma}$ 和 $K_{2\Sigma}$ 可根据余弦函数求和公式计算获得。可知, $K_{2\Sigma} \neq K_{1\Sigma}$, 即式(14)中的周期分量与直流分量不相等。

按照等效前后稳态功率相等的原则,将上述波浪能发电场输出功率之和作为单机等效模型的输出功率,由此反推等效波浪力输入:

$$F_{\text{wave_eq}} = A_{\text{eq}} \cos(\omega_w t + \alpha_{\text{eq}}) \quad (15)$$

单机等效模型的输出功率可表示为:

$$P_{\text{eq}} = \frac{A_{\text{eq}}^2}{8\beta_w} \cos(2\omega_w t + 2\alpha_{\text{eq}}) + \frac{A_{\text{eq}}^2}{8\beta_w} \quad (16)$$

令 $\frac{A_{\text{eq}}^2}{8\beta_w} = K_{1\Sigma}$, $2\alpha_{\text{eq}} = \alpha_{\Sigma}$, 即可解得等效波浪力输入的幅值 A_{eq} 和相位 α_{eq} 。

需要说明的是,本文假设发电场内各 AWS 发电装置的 β_w 均一致,如果各 AWS 的 β_w 不一致,则可由加权聚合法获得等效的 β_{w_eq} 。

对比式(14)和式(16),可以看出,发电场详细模型的输出功率 P_{Σ} 和单机等效模型的输出功率 P_{eq} 不相等,它们之间相差直流分量 $K_{2\Sigma} - K_{1\Sigma}$ 。因此,在单机等效模型中,需要对这一部分直流分量进行补偿。

(1) 直流分量补偿。

如上所述,需要在单机等效模型中补偿直流分量:

$$\Delta P_1 = K_{2\Sigma} - K_{1\Sigma} \quad (17)$$

(2) 发电机损耗补偿。

在对发电场进行等效建模时还需要计及各发电单元定子电阻的功率损耗。单个 AWS 发电单元的功率损耗可表示为:

$$P_{\text{loss}_i} = \frac{3}{2} R_s i_{sq_i}^2 \quad (18)$$

其中, R_s 为发电单元定子电阻; i_{sq_i} 为发电单元定子电流的交轴分量。则对于发电场详细模型,发电机功率损耗为:

$$P_{\text{loss}_\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{\text{loss}_i} = \sum_{i=1}^n \frac{3}{2} R_s i_{sq_i}^2 \quad (19)$$

对于发电场的单机等效模型,其发电机损耗为:

$$P_{\text{loss_eq}} = \frac{3}{2} R_{s_eq} i_{sq_eq}^2 \quad (20)$$

其中, R_{s_eq} 为等效模型发电机定子电阻,其值由加权聚合法获得; i_{sq_eq} 为等效模型发电机定子电流的交轴分量,其值可以根据式(6)、(9)、(11)获得。

同理, $P_{\text{loss}_\Sigma} \neq P_{\text{loss_eq}}$, 因此需要在等效模型中进行补偿:

$$\Delta P_2 = P_{\text{loss}_\Sigma} - P_{\text{loss_eq}} \quad (21)$$

综上所述,在等效模型中总的功率补偿量为:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (22)$$

2.3 不规则波浪力等效

不规则波浪力可以等效成若干个规则波浪力的叠加,这里以 2 个规则波浪力的叠加为例加以推导,但不难推广到更多分量的情形。根据文献[12],此时 AWS 可以线性分解为 2 个子系统。

设 $F_{\text{wave_ir}_i} = A_i \cos(\omega_{w1} t + \alpha_i) + B_i \cos(\omega_{w2} t + \alpha_i)$, 由式(12)可得不规则波浪力输入与有功输出之间的关系:

$$P_{\text{ir}_i} = \beta_w (\dot{x})^2 = \frac{A_i^2}{8\beta_w} \cos(2\omega_{w1} t + 2\alpha_i) + \frac{B_i^2}{8\beta_w} \cos(2\omega_{w2} t + 2\alpha_i) + \frac{A_i B_i}{2\beta_w} \cos(\omega_{w1} t + \alpha_i) \cos(\omega_{w2} t + \alpha_i) + \frac{A_i^2 + B_i^2}{8\beta_w} \quad (23)$$

则发电场中 n 台 AWS 有功输出之和 P_{ir_Σ} 可表示为:

$$P_{\text{ir}_\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ir}_i} = K_{\text{ir}1\Sigma} \cos(2\omega_{w1} t + \alpha_{\Sigma}) + K_{\text{ir}2\Sigma} \cos(2\omega_{w2} t + \alpha_{\Sigma}) + K_{\text{ir}3\Sigma} \cos[(\omega_{w1} + \omega_{w2})t + \alpha_{\Sigma}] + K_{\text{ir}4\Sigma} \cos[(\omega_{w1} - \omega_{w2})t] + K_{\text{ir}5\Sigma} \quad (24)$$

若将等效波浪力输入表示为:

$$F_{\text{wave_ir_eq}} = A_{\text{ir_eq}} \cos(\omega_{w1} t + \alpha_{\text{ir_eq}}) + B_{\text{ir_eq}} \cos(\omega_{w2} t + \alpha_{\text{ir_eq}})$$

则单机等效模型的稳态有功输出可表示为:

$$P_{\text{ir_eq}} = \frac{A_{\text{ir_eq}}^2}{8\beta_w} \cos(2\omega_{w1} t + 2\alpha_{\text{ir_eq}}) + \frac{B_{\text{ir_eq}}^2}{8\beta_w} \cos(2\omega_{w2} t + 2\alpha_{\text{ir_eq}}) + \frac{A_{\text{ir_eq}} B_{\text{ir_eq}}}{4\beta_w} \cos[(\omega_{w1} + \omega_{w2})t + \alpha_{\text{ir_eq}}] + \frac{A_{\text{ir_eq}} B_{\text{ir_eq}}}{4\beta_w} \cos[(\omega_{w1} - \omega_{w2})t] + \frac{A_{\text{ir_eq}}^2 + B_{\text{ir_eq}}^2}{8\beta_w} \quad (25)$$

$$\text{令 } \frac{A_{\text{ir_eq}}^2}{8\beta_w} = K_{\text{ir}1\Sigma}, \frac{B_{\text{ir_eq}}^2}{8\beta_w} = K_{\text{ir}2\Sigma}, 2\alpha_{\text{ir_eq}} = \alpha_{\Sigma}, \text{即可}$$

得等效波浪力的幅值 $A_{\text{ir_eq}}$ 、 $B_{\text{ir_eq}}$ 和相位 $\alpha_{\text{ir_eq}}$ 。

而在不规则波浪力下的功率补偿可表示为:

$$\Delta P_1 = P_{\text{ir}_\Sigma} - P_{\text{ir_eq}} \quad (26)$$

$$\Delta P_2 = P_{\text{ir_loss}_\Sigma} - P_{\text{ir_loss_eq}} \quad (27)$$

3 仿真算例

参考目前已试运行的小型波浪发电场的布局结构,采用 MATLAB/Simulink 搭建 AWS 式波浪发电场并网系统仿真模型。在波浪发电场内设置 2 行 8 列共 16 个波浪发电装置,通过双回 30 km 的 110 kV 架空线路与电网相连。本文将波浪能发电场等效为一台 AWS 波浪能发电装置,如图 4 所示。为分析等效前后系统的动态响应,于 40 s 在一条 30 km 线路中点设置 AB 两相短路故障,故障持续时间为 0.15 s。将上述等效建模方法分别在规则波和不规则波输入下进行验证,对比等效前后网络侧输出有功、无功和电压的动稳态曲线。

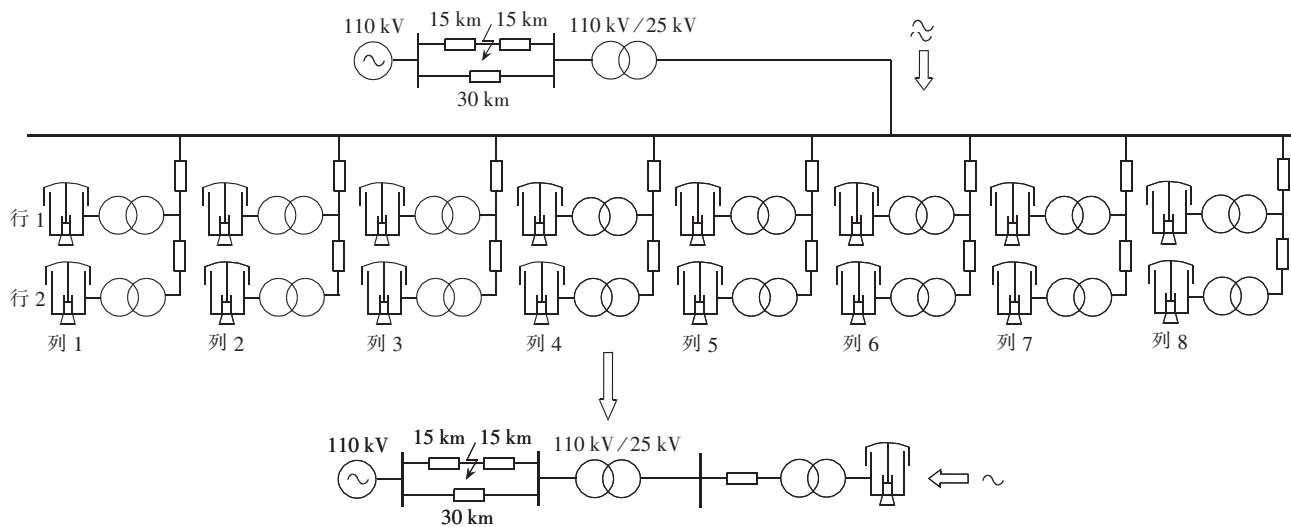


图 4 AWS 波浪发电场并网系统等效示意图

Fig.4 Equivalent schematic diagram of grid-connected AWS-based wave farm

3.1 AWS 波浪发电场的布局

波浪发电场内的 AWS 应尽量排列紧凑,以减少花费及其对周边环境的影响。但相邻 AWS 的间距也不应过小,一般设置间距为 2~3 个波浪发电装置的自身宽度^[13-14,16]。设置 2 排波浪发电装置,若排数增加,将会影响波浪能利用率。

尾流效应描述了波浪发电场中的每一个波浪发电装置吸收的功率会受到其周边发电装置的影响。采用波浪传输系数 K_t 来描述波浪发电场中的尾流效应^[15-17]:

$$K_t = \frac{H_{st}}{H_{si}} \tag{28}$$

其中, H_{st} 为经过波浪发电装置后的波高; H_{si} 为入射波高。对于 AWS 波浪发电场中的尾流效应,本文参考直驱式 Powerbuoy 发电场中的设置^[17]。根据线性波浪理论,波浪力与波高的关系式如下^[5]:

$$F_{wave}(\omega) = G(\omega)H(\omega) \tag{29}$$

其中, $G(\omega)$ 为波浪力与波高 $H(\omega)$ 之间的传递函数。根据式 (28) 和式 (29), 可将尾流效应直接作用于波浪场中的波浪力表达式。

波浪发电场的时滞效应反映了波浪场中后一排发电装置的启动时间将略滞后于前一排。本文通过下式获得测量点处的波浪波长 λ ^[19]:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda} \tag{30}$$
$$\tanh \frac{2\pi d}{\lambda} = \frac{e^{2\pi d/\lambda} - e^{-2\pi d/\lambda}}{e^{2\pi d/\lambda} + e^{-2\pi d/\lambda}}$$

其中, T 为波浪周期; d 为水深。然后可以依次计算出平均波速 $\bar{v}$ 和时滞 Δt :

$$\bar{v} = \frac{\lambda}{T}$$

$$\Delta t = \frac{L}{\bar{v}}$$

其中, L 为 2 排波浪发电装置的间距。

因此,计及时滞效应和尾流效应,波浪场中第二排波浪发电装置的输入波浪力可以描述为:

$$F_{wave_2}(t) = K_t F_{wave_1}(t - \Delta t)$$

3.2 规则波浪力仿真

为简化分析,首先采用单个正弦波模拟作用在 AWS 波浪发电装置上的波浪力。波浪发电场的波浪流向如图 3 所示。考虑到波浪作用到各 AWS 时具有时滞效应和尾流效应,位于波浪发电场内的各 AWS 装置承受的波浪力幅值和相位均不同。采用

$F_{wave} = A \cos\left(\frac{2\pi}{6.5}t + \alpha\right)$ 模拟规则波浪力输入,根据 3.1 节所述,构建计及时滞、尾流效应的波浪发电场。表 1 给出了波浪发电场内各 AWS 承受波浪力的幅值 A 和相位 α 分布,以每行 AWS 承受的波浪力幅值递减模拟尾流效应,以波浪力相位滞后模拟时滞效应。仿真系统中其他参数如下: $m_{tot} = 0.6 \times 10^6$ kg, $\beta_w = 1.42 \times 10^6$ N·s/m, $k_s = 0.56 \times 10^6$ N/m, $R_s = 0.29$ Ω , $L_s = 31$ mH, $\psi_{PM} = 23$ Wb, $\lambda = 0.1$ m, $U_N = 575$ V。

表 1 波浪发电场内波浪力分布

Table 1 Wave force distribution of AWS-based wave farm

AWS 所在行	波浪力幅值 A / N	波浪力相位 α / ($^\circ$)
1	9×10^5	-1.5708
2	6.75×10^5	-3.9874

图 5 为等效前后网络侧有功的稳态曲线。图 6 为等效前后网络侧动态响应曲线(网络侧母线电压为标么值,后同)。可以看出,规则波浪力作用下的等效模型与详细模型的稳态和动态曲线均非常吻合。

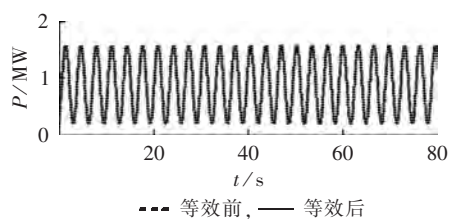


图 5 规则波输入下等效前后网络侧稳态有功曲线
Fig.5 Grid-side active power curve before and after equivalence for regular wave force input

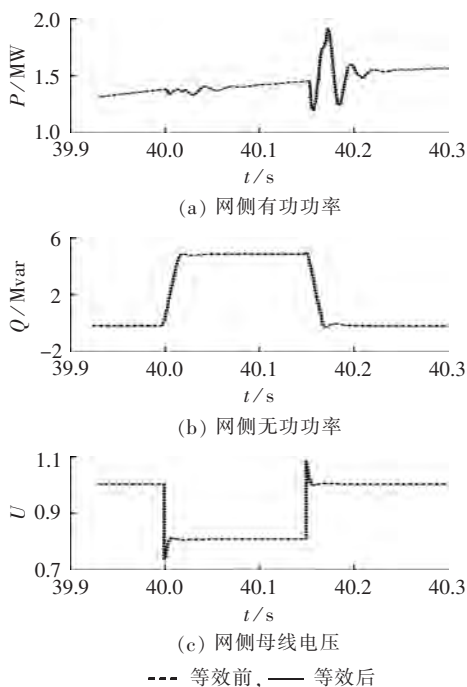


图 6 规则波输入下等效前后网络侧动态响应曲线
Fig.6 Grid-side dynamic response before and after equivalence for regular wave force input

3.3 不规则波浪力仿真

根据实测波浪数据进行频谱分析,选取 2 个主要频率分量,其对应波浪周期分别为 6 s 和 7 s,设波浪力 $F_{\text{wave}} = A \cos\left(\frac{2\pi}{6}t + \alpha\right) + \frac{A}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{7}t + \alpha\right)$ 。

图 7 为不规则波浪力下等效前后网络侧有功的稳态曲线。图 8 为不规则波浪力下等效前后网络侧动态曲线。可以看出,不规则波浪力作用下的等效模型与详细模型的稳态曲线高度吻合,动态曲线也能基本吻合。

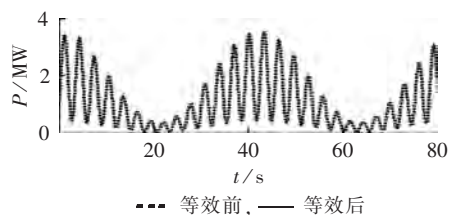


图 7 不规则波输入下等效前后网络侧稳态有功曲线
Fig.7 Grid-side active power curve before and after equivalence for irregular wave force input

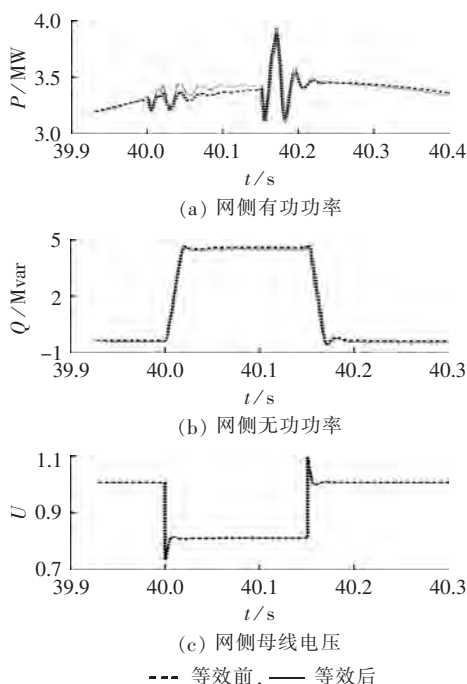


图 8 不规则波输入下等效前后网络侧动态响应曲线
Fig.8 Grid-side dynamic response before and after equivalence for irregular wave force input

4 结论

本文提出了波浪最大能量捕获控制策略下 AWS 波浪发电场的等效建模的方法,推导了规则波浪力和不规则波浪力的等效计算公式。仿真结果表明,等效模型的稳态和动态曲线均与详细模型高度吻合,从而验证了本文所提方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 蔡男,王世明.波浪能利用的发展与前景[J].国土与自然资源研究,2013(6):92-94.
CAI Nan,WANG Shiming. The development and prospect of wave energy utilization[J]. Territory and Natural Resources Study, 2013(6):92-94.
- [2] 游亚戈,李伟,刘伟民,等.海洋能发电技术的发展现状与前景[J].电力系统自动化,2010,34(14):1-12.
YOU Yage,LI Wei,LIU Weimin,et al. Development status and perspective of marine energy conversion systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(14):1-12.
- [3] 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.
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.
- [4] 刘春元,余海涛,胡敏强,等.永磁直线发电机在直驱式波浪发电系统的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(21):90-98.
LIU Chunyuan,YU Haitao,HU Minqiang,et al. Application of permanent magnet tubular linear generator using direct-driver wave power generation take-off systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(21):90-98.

- [5] 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.
- [6] 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, 23(3): 1196-1204.
- [7] da COSTA J S, PINTO P, SARMENTO A, et al. Modeling of an ocean waves power device AWS[C]//Control Applications, 2003. CCA 2003. Proceedings of 2003 IEEE Conference on. Istanbul, Turkey: IEEE, 2003: 618-623.
- [8] 米增强, 苏勋文, 余洋, 等. 双馈机组风电场动态等效模型研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 72-77.
MI Zengqiang, SU Xunwen, YU Yang, et al. Study on dynamic equivalence model of wind farms with wind turbine driven doubly fed induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 72-77.
- [9] 李洪美, 万秋兰, 向昌明. 考虑风速的风电场等值方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 121-123.
LI Hongmei, WAN Qiulan, XIANG Changming. Wind farm equivalence method considering wind speed[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 121-123.
- [10] 林俐, 潘险险. 基于分裂层次半监督谱聚类算法的风电场机群划分方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 8-14.
LIN Li, PAN Xianxian. Wind turbine grouping based on semi-supervised split-hierarchical spectral clustering algorithm for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 8-14.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] BEELS C, TROCH P, de VISCH K, et al. Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of wave dragon wave energy converters[J]. Renewable Energy, 2010, 35(8): 1644-1661.
- [15] PALHA A, MENDES L, FORTES C J, et al. The impact of wave energy farms in the shoreline wave climate: portuguese pilot zone case study using Pelamis energy wave devices[J]. Renewable Energy, 2010, 35(1): 62-77.
- [16] IGLESIAS G, CARBALLO R. Wave farm impact: the role of farm-to-coast distance[J]. Renewable Energy, 2014, 69: 375-385.
- [17] LEE J L, LEE J Y, KIM I H. Managing effect of hot spot shoreline behind a power buoy energy farm[J]. Journal of Coastal Research, 2011(61): 309-316.
- [18] 金宇清, 黄桦, 鞠平, 等. 用于风电场聚合建模的内部集电网络变换方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 34-41.
JIN Yuqing, HUANG Hua, JU Ping, et al. Collector network transformation methods for wind farm aggregated modeling[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 34-41.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. JTS 145-2—2013 海港水文规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

作者简介:



秦 川

秦 川(1981—),男,江苏靖江人,讲师,博士,主要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);

管维亚(1990—),女,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向为可再生能源发电系统建模(E-mail: carol550@163.com);

鞠 平(1962—),男,江苏靖江人,教授,博士,主要研究方向为电力系统建模与控制(E-mail: pju@hhu.edu.cn);

吴 峰(1977—),男,江苏如皋人,教授,博士,主要研究方向为可再生能源发电系统建模与控制(E-mail: wufeng@hhu.edu.cn)。

Equivalent modeling of AWS-based wave farm

QIN Chuan^{1,2}, GUAN Weiya^{1,2}, JU Ping^{1,2}, WU Feng^{1,2}

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The equivalent modeling of wave farm based on AWS(Archimedes Wave Swing) is proposed and the equivalent input of wave force is emphatically studied. The steady-state relationship between the input and output powers of AWS wave force under the maximum energy capture control is proposed. Since the active power output of wave farm before the equivalence should be equal to that after the equivalence, the input power of the equivalent model can be derived by the inverse method in both regular and irregular wave conditions. The power compensation is also considered. A detailed wave farm model is built and simplified as an AWS-based power generation unit. The simulative results demonstrate that, the steady-state output power and the dynamic response of the equivalent model are highly identical with those of the detailed model.

Key words: Archimedes wave swing; maximum wave energy capture control; equivalent modeling; equivalent wave force; electric power generation; renewable energy resources