

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.012

# 近海可再生能源综合发电场的非机理等效建模

吴峰,徐丹,秦川,鞠平

(河海大学能源与电气学院,江苏南京 211100)

**摘要:** 为了建立准确的近海可再生能源综合发电场等效模型,提出了非机理建模方法。基于传递函数建立非机理等效模型,描述输入、输出的非线性关系。提出解耦参数辨识方式,并运用蚁群算法进行参数辨识。在 Matlab/Simulink 中搭建由风力发电机组、潮流发电机组和波浪发电机组组成的近海可再生能源综合发电场的相量模型,采集发电场模型在风速、潮流流速、波浪以及电压扰动影响下的输入输出数据。根据输入、输出数据建立传递函数模型,辨识模型参数,根据所得参数计算等效模型输出。等效模型输出与仿真模型输出的误差较小,验证了非机理等效建模方法在近海可再生能源综合发电场建模中的可行性。

**关键词:** 近海可再生能源综合发电场;非机理等效建模;传递函数;解耦方式;蚁群算法;参数辨识  
**中图分类号:** TM743;TM614      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2017)01-0082-08

## Non-mechanism equivalent modeling of hybrid offshore renewable energy conversion farm

WU Feng,XU Dan,QIN Chuan,JU Ping

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In order to establish an accurate equivalent model of a hybrid offshore renewable energy conversion farm, a non-mechanism equivalent modeling method is proposed. Based on transfer functions, a non-mechanism equivalent model was developed to describe the nonlinear relation between inputs and outputs. Then the decoupling parameter identification method was applied to the model, and parameters of transfer functions were identified using the ant colony algorithm. Furthermore, a phasor model of a hybrid offshore renewable energy conversion farm, consisting of wind, tidal, and wave turbines, was built in Matlab/Simulink. With the model, the input and output data of the farm were acquired under the influences of wind, tidal, wave, and voltage disturbances. Finally, a transfer function model was built based on the collected data, and model parameters were identified. With the obtained parameters, the outputs of the equivalent model were calculated. The error between outputs of the equivalent model and the simulation model is very small, verifying the feasibility of the non-mechanism equivalent model in building the hybrid offshore renewable energy conversion farm.

**Key words:** hybrid offshore renewable energy conversion farm; non-mechanism equivalent modeling; transfer function; decoupling method; ant colony algorithm; parameter identification

近海可再生能源综合发电场利用风力发电平台,融合波浪能和潮流能发电装置,构建综合的发电单元,能够有效地提高近海可再生能源的利用效率和可靠性。随着可再生能源和海洋强国两大国家重大发展战略的实施,可以预计,不久的将来将会有大量近海可再生能源发电系统接入电网运行<sup>[1]</sup>,必然对电网的安全稳定运行产生重要影响,建立准确的近海可再生能源综合发电场等效模型是含大规模近海可再生能源发电场的电网安全稳定分析的基础<sup>[2-4]</sup>。

等效建模方法有机理建模和非机理建模。近海可再生能源综合发电场的机理建模是以单个综合发电单元为对象,详细模拟组成综合发电单元的各发电装置及其相互连接的拓扑结构,建立数学模型<sup>[5]</sup>。机理建模主要基于发电系统各部分的物理机理,需要知道发电系统内部的详细结构和参数,而在近海可再生能源综合发电场中这些参数的获取较为困难。近海可再生能源综合发电场的非机理建模通常将发电场看作灰箱,甚至黑箱,重点关注发电场的输入/输出特性。非机理模型结构简单,参数辨识方便,尚未在近海可再生能源综合发电场的建模中得到应用,但在风电场建模和光伏阵列中成功应用<sup>[6-8]</sup>,因此,对于同样通过电力电子变换器并入电网的近海可再生能源综合发电场的建模具有其独特优势。

文献[9]考虑尾流效应,采用基于等效最大功率曲线的建模方法建立风电场模型,虽然该模型精度相对于未考虑尾流效应的模型有所提高,但误差仍不可忽视。鉴于等效最大功率曲线建模方法的精度限制,以及机理建模过程中需要知道发电系统的详细参数,而这些参数难以获得,笔者提出的传递函数模型作为一种非机理模型,广泛应用于电力系统建模与分析,其较强的动态系统描述能力<sup>[10]</sup>,使其能够很好地反映研究对象输入、输出之间的非线性关系。

本文首先基于传递函数建立近海可再生能源综合发电场的非机理等效模型,综合考虑风速、潮流流速、波浪,以及端口电压的变化对发电场输出功率的影响;然后,提出近海可再生能源发电场的解耦参数辨识方法,获取非机理等效模型的参数;最后,在 Matlab/Simulink 中搭建近海可再生能源综合发电场的详细模型,通过仿真分析,验证等效模型的有效性。

## 1 近海可再生能源综合发电场等效模型

文献[11]中提出了一种融合近海风电、波浪能发电以及潮流能发电的综合发电系统结构,给出了综合发电场可能的3种并网方式。综合考虑高效性和经济性,本文以第一种并网方式(即风力发电和潮流发电均采用双馈感应发电机 DFIG,波浪能发电采用直线永磁式发电机 LPMG,分别经过升压并联接入电网)下的综合发电场为例,建立等效模型。

### 1.1 近海可再生能源综合发电场传递函数等效模型结构

近海可再生能源综合发电场的动态随着近海可再生能源(如风速、潮流流速、波浪),以及端口电压的变化而变化。近海可再生能源主要影响发电场的平衡点,而电压变化会激励综合发电场的暂态过程。

将输入的近海可再生能源和并网点电压作为模型的输入变量,近海可再生能源发电场的输出功率作为模型的输出变量,构建近海可再生能源综合发电场的非机理模型。其中,系统非机理模型的传递函数方程结构是根据实际物理关系选择的,电压模型为二次方关系,风速模型为三次方关系,潮流模型为三次方关系,波浪模型为二次方关系。基于传递函数的有功功率等效模型结构如图1所示,无功功率等效模型结构依此类似。

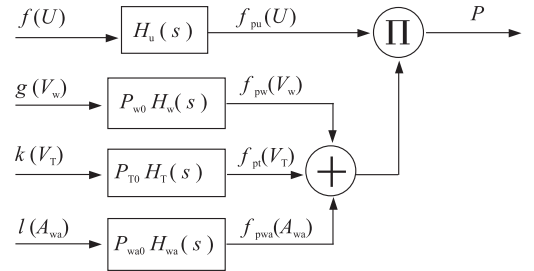


图1 有功功率非机理模型结构

Fig. 1 Non-mechanism equivalent model of active power

图1中模型结构的详细表达式为

$$P = f_{pu}(U) [f_{pw}(V_w) + f_{pt}(V_T) + f_{pwa}(A_{wa})] \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} f_{pu}(U) = H_u(s)f(U) = H_u(s) \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 \\ f_{pw}(V_w) = P_{w0}H_w(s)g(V_w) = P_{w0}H_w(s) \left( \frac{V_w}{V_{w0}} \right)^3 \\ f_{pt}(V_T) = P_{T0}H_T(s)k(V_T) = P_{T0}H_T(s) \left( \frac{V_T}{V_{T0}} \right)^3 \\ f_{pwa}(A_{wa}) = P_{wa0}H_{wa}(s)l(A_{wa}) = P_{wa0}H_{wa}(s) \left( \frac{A_{wa}}{A_{wa0}} \right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P$ ——近海可再生能源综合发电场输出的有功功率; $f_{pu}(U)$ ——电压跌落引起的有功动态响应; $f_{pw}(V_w)$ ——风速波动引起的有功动态响应; $f_{pt}(V_T)$ ——潮流变化引起的有功动态响应; $f_{pwa}(A_{wa})$ ——波浪变化引起的有功动态响应; $P_{w0}$ ——风速波动引起的有功动态响应初始值; $P_{T0}$ ——潮流变化引起的有功动态响应初始值; $P_{wa0}$ ——波浪变化引起的有功动态响应初始值; $U$ ——近海可再生能源综合发电场并网点电压; $U_0$ ——电压稳态值; $V_w$ ——输入风电机组的风速; $V_{w0}$ ——风速初始值; $V_T$ ——输入潮流能发电机组的潮流流速; $V_{T0}$ ——潮流流速初始值; $A_{wa}$ ——输入波浪能发电机组的波高; $A_{wa0}$ ——波高初始值; $H_u(s)$ 、 $H_w(s)$ 、 $H_T(s)$ 、 $H_{wa}(s)$ ——传递函数。

传递函数的形式类似,以  $H_u(s)$  为例,传递函数方程为

$$H_u(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (3)$$

式中: $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0, a_{n-1}, \cdots, a_0$ ——系数,  $m \leq n$ , 且  $b_0 = a_0$ 。

由近海可再生能源综合发电场传递函数等效模型,可以得出以下结果。

**a.** 各传递函数分别表示电压和风速、潮流、波浪的波动对输出功率的影响。当近海可再生能源和发电场端口电压保持恒定不变时,  $P = P_{w0} + P_{T0} + P_{wa0}$ 。

**b.** 传递函数方程阶数越高,对模型动态特性的描述能力越强。但模型阶数越高,参数的辨识难度越大。考虑以上条件,传递函数模型一般取 3 阶。其中,潮流流速变化缓慢,取 2 阶即可满足精度要求。

**c.** 一般来说,可再生能源引起的功率动态变化比电压引起的变化慢得多,相当于与风速、潮流、波浪有关的传递函数比与电压有关的传递函数增加一个惯性环节,即传递函数分母多 1 阶,为保持模型阶数不变,则分母阶数不变,分子减少 1 阶。其中,波浪能发电包括波高到波浪力和波浪力到功率两部分,因此传递函数模型分子取 3 阶、分母取 3 阶才能描述波浪能发电两部分的模型要求。

需要指出的是,近海可再生能源综合发电场通常通过电力电子变换器并入电网运行<sup>[12-15]</sup>,对发电机动态具有隔离作用,近海可再生能源综合发电场的整体动态特性主要取决于内部电力电子装置及其控制器,在有功、无功解耦下,通过 PI 控制对目标值进行跟踪。其控制结构主要由传递函数模型和各种限制环节构成。当电网故障不发生在发电场接入点附近时,近海可再生能源综合发电场的端口电压通常不会发生较大的变化,这时可再生能源发电系统的控制系统限幅,模式切换等没有动作,发电场的总体动态特性表现出较强的线性特性,可以采用模型(1)(2)所建立的多阶线性传递函数模型逼近近海可再生能源综合发电场的动态特性;当电网故障发生在近海可再生能源发电场接入点附近时,该发电场控制器的各个非线性环节以及低电压穿越动作,这种情况下模型(1)(2)就不再适用,其等效建模有待进一步研究。

## 1.2 近海可再生能源综合发电场传递函数模型参数辨识方法

在近海可再生能源综合发电场端口电压变化时,由于电力电子变换器及其控制器响应快,输出功率动态远快于近海可再生能源缓慢变化引起的输出功率变化。所以,可认为发电场端口电压发生扰动时,发电场内部控制系统主要响应电压变化,并且动态时间很短,可忽略该段时间内近海可再生能源的变化,即风速、潮流流速、波高保持不变。系统未发生故障时,近海可再生能源发电系统的输出功率主要随一次能源变化而变化,发电机处于准稳态,端电压基本保持不变。由此,可以对等效模型的参数进行解耦辨识。

近海可再生能源综合发电场传递函数模型的参数辨识步骤如下:

**a.** 保持发电场的输入风速、潮流和波高不变,并且  $b_0 = a_0$ , 则

$$f_{pw}(V_w) + f_{pt}(V_T) + f_{pwa}(A_{wa}) = P_{w0} + P_{T0} + P_{wa0} = P_0 \quad (4)$$

改变发电场并网点电压,辨识得出近海可再生能源综合发电场输出功率与端口电压的等效模型:

$$P = P_0 f_{pu}(U) = (P_{w0} + P_{T0} + P_{wa0}) f_{pu}(U) \quad (5)$$

**b.** 保持端口电压不变,由于  $b_0 = a_0$ , 则

$$H_u(s) \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 = 1 \quad (6)$$

输入变化的风速、潮流流速和波浪数据,辨识得反映输入可再生能源与其输出功率之间关系的等效模型:

$$\begin{cases} f_{pw}(V_w) = P_{w0} H_w(s) \left( \frac{V_w}{V_{w0}} \right)^3 \\ f_{pt}(V_T) = P_{T0} H_T(s) \left( \frac{V_T}{V_{T0}} \right)^3 \\ f_{pwa}(A_{wa}) = P_{wa0} H_{wa}(s) \left( \frac{A_{wa}}{A_{wa0}} \right)^2 \end{cases} \quad (7)$$

c. 将2个模型(式(5)、式(7))合并可得完整的发电场传递函数等效模型。

### 1.3 近海可再生能源综合发电场非机理模型的评价指标

将模型的相对误差  $E_{ref}$  和均方根误差<sup>[6]</sup>  $R_{MES}$  作为评价非机理模型准确性的指标:

$$E_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^N |y(i) - y_{mx}(i)|}{\sum_{i=1}^N y(i)} \quad R_{MES} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y(i) - y_{mx}(i)]^2} \quad (8)$$

式中:  $y$ ——实测输出有功值或无功值;  $y_{mx}$ ——计算所得有功值或无功值;  $N$ ——采样总点数。

相对误差  $E_{ref}$  值越接近0, 模型越精确, 参数越合理; 均方根误差  $R_{MES}$  值越小, 拟合效果越好。但有时  $y$  表示无功值时接近于0, 造成相对误差较大, 这时采用均方根误差做指标较为合理。

## 2 基于蚁群算法的参数辨识

在确定等效模型的结构和建模方法后, 为使模型能够准确地描述近海可再生能源综合发电场的动态特性, 必须获得准确的模型参数, 因此, 选择高效可靠的参数辨识算法对于模型的建立至关重要。

非线性系统参数辨识主要是将参数辨识问题转化为优化问题, 即, 寻找一组最优的参数向量  $\theta_*$ , 使误差目标函数值  $E$  达到最小<sup>[16]</sup>。在综合发电场的传递函数等效模型参数辨识中,  $\theta = [b_m, b_{m-1}, \dots, b_0, a_{n-1}, \dots, a_0]$ , 误差目标函数为

$$E = \sum_{k=1}^N [Y(\theta, k, n') - Y_m(k)]^T [Y(\theta, k, n') - Y_m(k)] \quad (9)$$

式中:  $n'$ ——等效模型阶次;  $\theta$ ——待辨识的参数;  $Y_m$ ——实测的有功值或无功值(即真实值);  $Y$ ——根据等效模型计算得出的有功值或无功值。

蚁群优化算法是模拟自然界中真实蚁群觅食行为而提出的一种新型模拟进化类优化算法。近年来, 蚁群算法广泛应用于电力系统参数辨识领域。具体步骤如下<sup>[17-19]</sup>: (a) 初始化。将蚁群在解空间内按照一定方式作初始分布。(b) 根据蚁群所处解空间位置的优劣, 决定当前蚁群的信息量分布。(c) 根据当前蚁群散布的总信息量分布情况, 以及上一循环中信息量的挥发情况, 求出各子区间内应有的蚁数分布。(d) 根据各子区间内应有的蚁群分布状况和当前蚁群分布状况之间的差别, 决定蚁群的移动方向, 并加以移动, 最终可得到新的解空间定义域。然后通过同样的方法, 对新的解空间定义域进行优化, 逐步缩小寻优空间, 最终使解空间趋向一个很小的定义域, 得到最优解。(e) 在蚁群做完一次整体移动之后, 又可回到第(b)步, 如此往复, 直到产生最优解为止<sup>[20]</sup>。

## 3 仿真验证

在 Matlab/Simulink 中搭建近海可再生能源综合发电场的详细模型, 验证该发电场传递函数模型对其动态特性的描述能力。

仿真系统如图2所示。近海可再生能源综合发电场由2条输电线路并入无穷大系统运行, 其中可再生能源综合发电场由16个综合发电单元构成。风力发电机组和潮流发电机组均采用双馈发电机, 容量为1.5 MW, 机组参数  $R_s = 0.00706$ ,  $X_s = 0.171$ ,  $R_L = 0.005$ ,  $X_L = 0.156$ ,  $X_m = 2.9$ ,  $H_g = 5.04$  (各参数均为标幺值), 功率基准值  $S_B = 1.5$  MW, 电压基准值为元件所在电压等级的平均额定电压; 波浪发电机组采用直线永磁式发电机, 容量为1.5 MW, 机组参数  $R_s = 0$ ,  $X_s = 0.031$ ,  $R_g = 0.0015$ ,  $X_g = 0.15$ ,  $X_m = 2.9$ ,  $\varphi = 23$ ,  $\lambda = 0.1$  (各

参数均为标么值),功率基准值  $S_B=1.5\text{ MW}$ ,电压基准值为元件所在电压等级的平均额定电压。风力发电机组、潮流发电机组、波浪发电机组并联接入  $25\text{ kV}$  母线,再通过输电线路和升压变压器接入  $120\text{ kV}$  无穷大系统。

3.1 非机理模型建立

a. 在输入风速保持恒速  $8\text{ m/s}$ 、潮流流速保持  $2\text{ m/s}$ 、波高保持  $0.5\text{ m}$  时,系统  $120\text{ kV}$  高压输电线路中点设置三相短路故障,电压跌落  $0.1\text{ pu}$ ,故障持续时间为  $0.1\text{ s}$ ,故障引起可再生能源发电场端口电压波动如图 3 所示。将端口电压作为输入,风电场输出有功、无功功率作为输出,辨识得传递函数等效模型(模型参数如表 1 所示)。发电场详细模型与等效模型输出的仿真结果如图 4 所示。

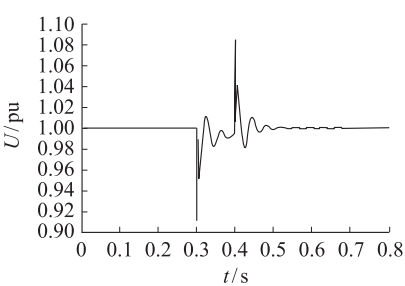


图 3 扰动电压

Fig. 3 Voltage disturbance

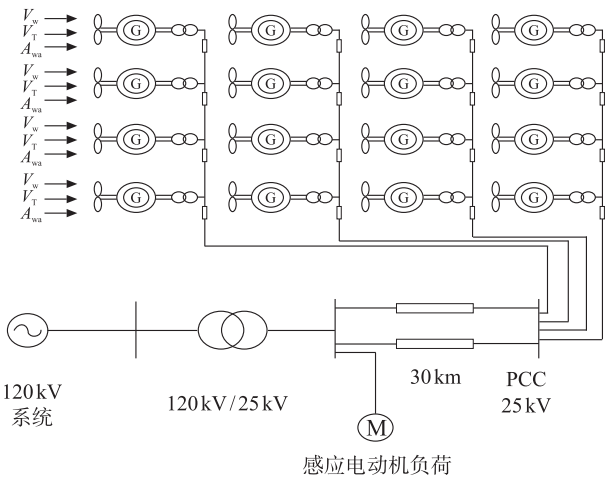


图 2 近海可再生能源综合发电场并网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hybrid offshore renewable energy generation system

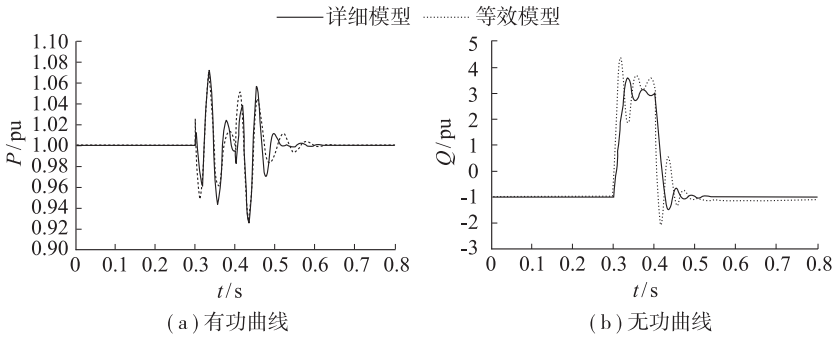


图 4 电网故障扰动动态响应曲线

Fig. 4 Dynamic response curves under disturbance of system fault

表 1 参数的辨识结果

Table 1 Results of parameter identification

| 传递函数模型参数   | $b_3$ | $b_2$              | $b_1$   | $b_0$                  | $a_2$  | $a_1$              | $a_0$                  | $E_{\text{ref}}/\%$ | $R_{\text{MES}}$      |
|------------|-------|--------------------|---------|------------------------|--------|--------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
| $P-U$      | -0.18 | 95.82              | 0.02    | 5.83                   | 38.73  | $1.09 \times 10^4$ | 5.83                   | 0.33                | $7.7 \times 10^{-3}$  |
| $Q-U$      | 0.16  | $6.11 \times 10^3$ | -16.65  | -8.37                  | 19.34  | 5.81               | -8.37                  | 19.01               | 0.55                  |
| $P-V_w$    |       | 2.51               | 2.35    | 5.86                   | 34.16  | 34.26              | 5.86                   | 2.17                | 0.10                  |
| $Q-V_w$    |       | -211.69            | -234.94 | 0.63                   | 34.16  | 34.20              | 0.63                   | 64.97               | $5.64 \times 10^{-4}$ |
| $P-V_T$    |       | 0.02               | 0.09    | 0.01                   |        | 0.19               | 0.01                   | 0.27                | $3.1 \times 10^{-3}$  |
| $Q-V_T$    |       | 615.08             | 677.35  | 0.17                   |        | 0.95               | 0.17                   | 34.33               | $6.83 \times 10^{-4}$ |
| $P-V_{wa}$ | 0.30  | 0.24               | 0.12    | $-1.67 \times 10^{-5}$ | 140.91 | 268.41             | $-1.67 \times 10^{-5}$ | 29.82               | 0.03                  |
| $Q-V_{wa}$ | 0.23  | 0.16               | 0.57    | $1.67 \times 10^{-4}$  | 4.28   | 178.53             | $1.67 \times 10^{-4}$  | 40.60               | $5.5 \times 10^{-3}$  |

注: $P-U$ 、 $Q-U$  分别为电压扰动下的传递函数模型参数; $P-V_w$ 、 $Q-V_w$  分别为风速波动下风速-风功率的传递函数模型参数; $P-V_T$ 、 $Q-V_T$  分别为潮流流速波动下潮流流速-潮流功率的传递函数模型参数; $P-V_{wa}$ 、 $Q-V_{wa}$  分别为波高变化下波高-波浪功率的传递函数模型参数。

由图 4 可以看出近海可再生能源综合发电场能够快速响应端口电压波动,输出功率在故障切除  $0.2\text{ s}$  内即可恢复,并且三阶传递函数模型能够较准确地描述端口电压跌落引起的输出功率动态变化。

b. 保持电网中无故障,同时输入变化的风速、潮流和波浪,风速波动如图 5 所示,潮流变化如图 6 所示,波浪变化如图 7 所示。测量各发电机端口的输出功率,将风力发电机组、潮流能发电机组和波浪能发电机组的输出功率分别相加,得到 3 种类型发电机的功率总加,利用 3 种类型的总加功率分别对综合发电场中的风力发电、潮流能发电和波浪能发电部分进行模型参数辨识。

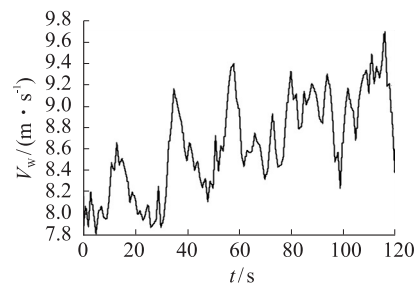


图5 风速波动

Fig. 5 Wind speed

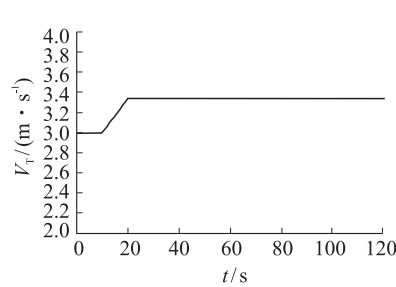


图6 潮流流速变化

Fig. 6 Tidal current speed

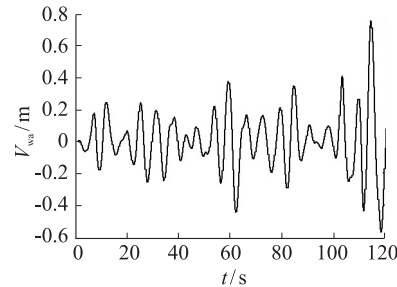


图7 波浪变化

Fig. 7 Wave elevation

将风速作为输入,风力发电输出有功、无功功率作为输出,辨识得传递函数等效模型(参数见表1)。发电场详细模型与等效模型输出的仿真结果如图8所示。

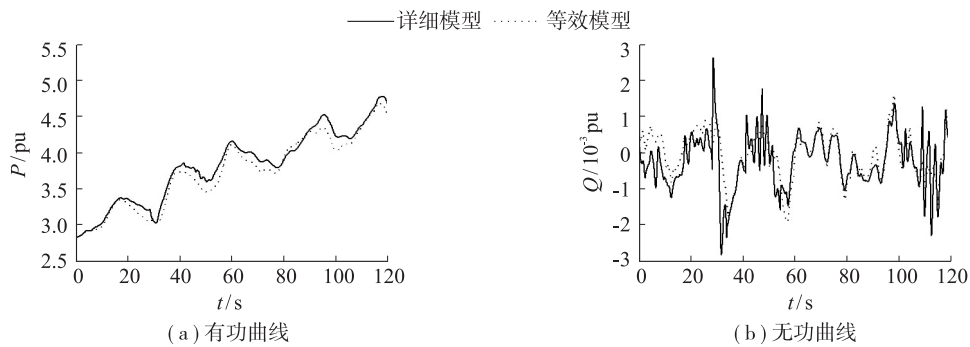


图8 风速扰动的动态响应曲线

Fig. 8 Dynamic response curves under disturbance of wind speed

将潮流流速作为输入,潮流能发电输出有功、无功功率作为输出,辨识得传递函数等效模型(参数见表1)。发电场详细模型与等效模型输出的仿真结果如图9所示。

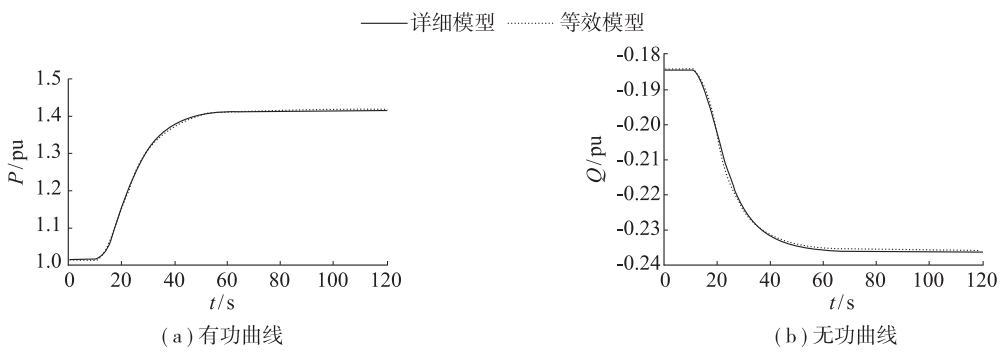


图9 潮流流速扰动的动态响应曲线

Fig. 9 Dynamic response curves under disturbance of tidal current speed

将波高作为输入,波浪能发电输出有功、无功功率作为输出,辨识得传递函数等效模型(参数见表1)。发电场详细模型与等效模型输出的仿真结果如图10所示。

由图4、图8、图9和图10看到,在系统侧短路故障和近海可再生能源变化下,2类模型仿真结果虽然细节上有所差异,但等效模型输出和详细模型输出大体保持一致。

表1为传递函数模型的参数辨识结果和模型准确度的评价指标计算结果。由表1的相对误差和均方根误差可见,有功功率相对误差较小,无功功率由于数值接近0,导致相对误差较大,但均方根误差很小,具有较高精度。因此,在电网系统远端发生故障造成端口电压变化和近海可再生能源变化的情况下,传递函数模型能够较好地描述近海可再生能源综合发电场的动态。

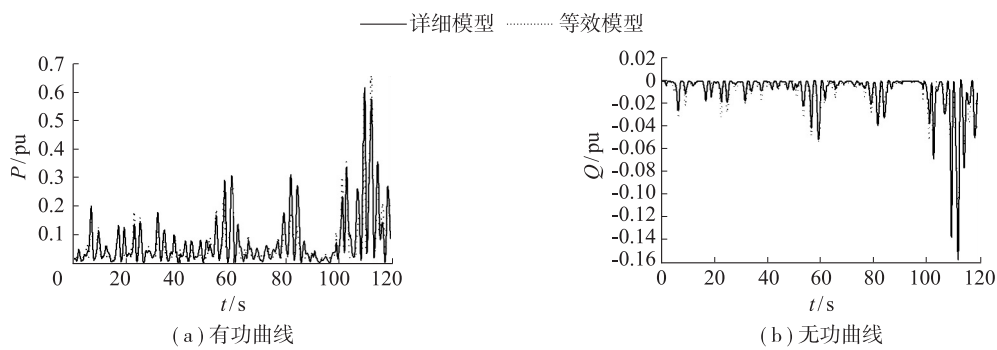


图 10 波浪扰动的动态响应曲线  
Fig. 10 Dynamic response curves under disturbance of waves

3.2 非机理模型验证

输入可再生能源波动曲线如图 5 ~ 7 所示,系统 120 kV 高压输电线路 60 s 时设置三相短路故障,使电压跌落 0.1 pu,故障持续 0.1 s。电压扰动如图 3 所示,仿真结果如图 11 所示。

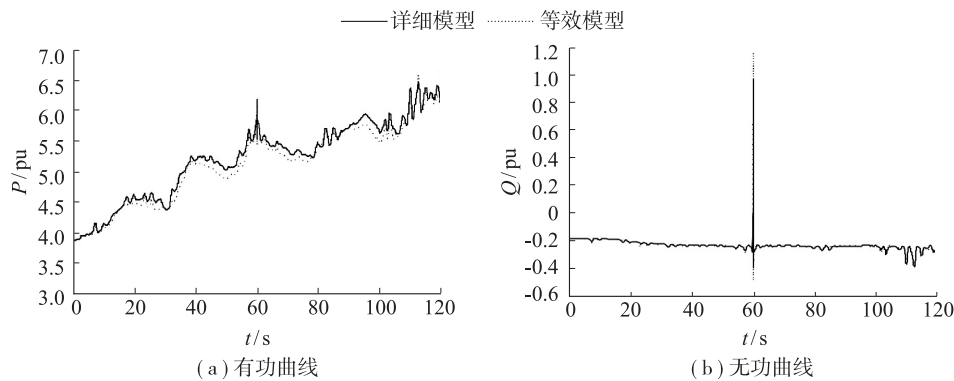


图 11 动态响应曲线  
Fig. 11 Dynamic response curves

由图 11 仿真结果可见,在近海可再生能源和电压同时变化的部分,传递函数模型有功、无功输出与详细模型输出大体保持一致,相对误差分别为 1.07% 和 39.37%,均方根误差分别为 0.017 和 0.018。有功相对误差较小,无功值由于接近于 0 而造成相对误差较大,但均方根误差很小,精度较高。因此,在系统故障造成端口电压不发生较大变化时,近海可再生能源综合发电场响应电压和近海可再生能源同时变化的动态为二者单一变化下动态的叠加,采用解耦建模法建立的传递函数模型能够准确地描述发电场的动态。

需要指出的是,基于传递函数的等效模型结构简单、灵活,在实际系统的等效建模中,可根据风电机组、潮流发电机组、波浪发电机组控制器参数、集电网的拓扑及参数等的差异,对所建立的传递函数模型结构做相应的调整。

4 结 语

笔者提出反映电压和近海可再生能源扰动下近海可再生能源综合发电场的非机理等效模型,该模型基于传递函数,着重描述发电场的整体动态特性,具有模型结构简单、建模简便的特点。针对电压变化时发电机组动态远快于可再生能源变化下发电机组动态的特点,提出了解耦建模方法,提高了模型参数的精度。仿真算例表明,该模型能够较好地等效近海可再生能源发电场在电网扰动和近海可再生能源波动条件下的整体动态。

参考文献:

[ 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. ( WU Feng,JU Ping,QIN Chuan,et al. Progress and prospect of research on offshore renewable energy generation[J]. Journal of Hohai

- University(Natural Sciences),2014,42(1):80-87. (in Chinese))
- [2] CHOWDHURY M A, HOSSEINZADE N, BILLAH M M, et al. Dynamic DFIG wind farm model with an aggregation technique [C]// Electrical and Computer Engineering (ICECE). 2010 International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). Dhaka:IEEE,2010:330-333.
  - [3] 杨琦,张建华,李卫国. 电力系统接入风电场后的暂态稳定分析[J]. 高电压技术,2009,35(8):2042-2047. (YANG Qi, ZHANG Jianhua, LI Weiguo, et al. Analysis on transient stability of integration of wind farms into power systems[J]. High Voltage Engineering,2009,35(8):2042-2047. (in Chinese))
  - [4] 秦川,闻丹银,鞠平. 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. (QIN Chuan, WEN Danyin, JU Ping, et al. Comparison of models of hybrid offshore renewable energy generation system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2015,43(6):574-581. (in Chinese))
  - [5] MOHAMMAD L R, SHUNSUKE O, YASUYUKI S. 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.
  - [6] 孙黎霞,李云峰,郑丹丹,等. 局部阴影下光伏阵列非机理建模[J]. 电网技术,2015,39(5):1186-1191. (SUN Lixia, LI Yunfeng, ZHENG Dandan, et al. Non-mechanism modeling of photovoltaic array under partial shade[J]. Power System Technology,2015,1(2):92-98. (in Chinese))
  - [7] 葛江北,周明,李庚银. 大型风电场建模综述[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(17):146-153. (GE Jiangbei, ZHOU Ming, LI Gengyin. Review on large-scale wind farm modeling [J]. Power System Protection and Control,2013,41(17):146-153. (in Chinese))
  - [8] 朱乾龙,韩平平,丁明,等. 基于聚类-判别分析的风电场概率等值建模研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4770-4780. (ZHU Qianlong, HAN Pingping, DING Ming, et al. Probabilistic equivalent model for wind farms based on clustering-discriminant analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(28):4770-4780. (in Chinese))
  - [9] XUE Feng, SONG Xiaofang, CHANG Kang, et al. Equivalent modeling of DFIG based wind farm using equivalent maximum power curve[C]// Power and Energy Society General Meeting (PES). 2013 IEEE. Vancouver:IEEE,2013:1-5.
  - [10] 李培强,李欣然,林舜江. 电力负荷建模研究述评[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(5):56-64. (LI Peiqiang, LI Xinran, LIN Shunjiang. Critical review on synthesis load modeling[J]. Proceedings of the CSU-EPSC,2008,20(5):56-64. (in Chinese))
  - [11] 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. (QIN Chuan, JU Ping, WEN Danyin. Hybrid offshore wind, wave and tidal turbine energy conversion system: structure and electrical interface[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(13):2013-2021. (in Chinese))
  - [12] WU Feng, ZHANG Xiaoping, JU Ping, 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.
  - [13] WU Feng, ZHANG Xiaoping, JU Ping, et al. Optimal control for AWS-Based wave energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(4):1747-1755.
  - [14] 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. (in Chinese))
  - [15] 王项南,王静,李雪临,等. 潮流能发电系统性能评估方法研究[J]. 海洋技术,2013,32(3):106-109. (WANG Xiangnan, WANG Jing, LI Xuelin, et al. Study on assessment of performance of the tidal energy conversion systems[J]. Ocean Technology,2013,32(3):106-109. (in Chinese))
  - [16] 舒辉,文劲宇,罗春风,等. 含有非线性环节的发电机励磁系统参数辨识[J]. 电力系统自动化,2005,29(6):66-70. (SHU Hui, WEN Jinyu, LUO Chunfeng, et al. Nonlinear parameters identification for synchronous generator excitation systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(6):66-70. (in Chinese))
  - [17] 金宇清,赵泽,鞠平,等. 双馈感应风力发电机的参数辨识分析[J]. 高电压技术,2011,37(7):1700-1705. (JIN Yuqing, ZHAO Ze, JU Ping, et al. Analysis on the identification of doubly fed induction generator[J]. High Voltage Engineering,2011,37(7):1700-1705. (in Chinese))
  - [18] 郭磊,鞠平,王红印,等. 电力系统多台发电机参数的整体辨识[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):44-50. (GUO Lei, JU Ping, WANG Hongyin, et al. System wide parameter identification of multi-generators in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):44-50. (in Chinese))
  - [19] 张旭辉,林海军,刘明珠,等. 基于蚁群粒子群优化的卡尔曼滤波算法模型参数辨识[J]. 电力系统自动化,2014,38(4):44-50. (ZHANG Xuhui, LIN Haijun, LIU Mingzhu, et al. Mechanism of effects of inter-turn circuits in field windings on large turbo-generator vibration[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(4):44-50. (in Chinese))
  - [20] SUN Lixia, QU Ping, HUANG Qixin, et al. Parameter identification of synchronous generator by using ant colony optimization algorithm[C]// Industrial Electronics and Applications. 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Harbin: IEEE,2007:2834-2838.