

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.012

近海可再生能源综合发电系统模型对比

秦 川¹, 闻丹银², 鞠 平¹, 吴 峰¹

(1.河海大学能源与电气学院,江苏 南京 210098; 2.国网泰州供电公司,江苏 泰州 225300)

摘要: 介绍融合近海风力发电、波浪能发电以及潮流能发电的近海可再生能源综合发电系统的电气拓扑结构,并以此系统为例,在 Matlab/Simulink 平台下分别搭建了其详细模型和相量模型。在定性分析 2 种模型的区别之后,分别在风速变化时以及电网扰动故障下,对详细模型和相量模型进行了仿真对比。时域仿真结果显示,详细模型和相量模型的稳态、动态响应趋势均基本一致;详细模型仿真计算耗时长,且仿真曲线中包含高频分量;相量模型仿真计算耗时短,仿真曲线相对平滑。
关键词: 近海可再生能源综合发电系统;近海风电;波浪能发电;潮流能发电;详细模型;相量模型
中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)06-0574-08

Comparison of models of hybrid offshore renewable energy generation system

QIN Chuan¹, WEN Danyin², JU Ping¹, WU Feng¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Grid Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China)

Abstract: The electric topological structure of a hybrid offshore renewable energy generation system, including offshore wind, wave, and tidal power generations, is described. Using this system as an example, a detailed model and phasor model based on the Matlab/Simulink platform were built. On the basis of a qualitative analysis of the differences in these two models, simulations were carried out with different wind speeds and power grid disturbance faults. Time-domain simulation results show that the tendency of steady and dynamic responses of the detailed model and phasor model are similar; the simulation time is longer when using the detailed model, and the simulation curves contain high-frequency components; and, with the phasor model, the simulation time is shorter, and the simulation curves are relatively smooth.

Key words: hybrid offshore renewable energy generation system; offshore wind power; wave power generation; tidal power generation; detailed model; phasor model

为了解决环境污染和能源危机这 2 个全球关注的热点问题,各国纷纷将目光投向可再生能源的开发和利用,而海洋覆盖了地球 70% 的表面,其蕴含的能量大大超过了目前全球能源的需求,科学的开发和利用近海能源具有重要意义。

近海可再生能源主要包括近海风能、波浪能、潮流能、温差能、盐差能等^[1]。目前,近海风力发电已进入商业化运营阶段,技术相对比较成熟^[2-8];波浪能和潮流能发电技术也取得了可喜的成果,部分已经建成试验电站^[9-14];而温差能和盐差能的研究还处于初级阶段,且主要是理论研究。所以,目前可利用的近海可再生能源主要是指近海风能、波浪能和潮流能。

近年来,为了有效提高近海可再生能源发电的利用率和可靠性,人们开始研究近海可再生能源综合发电技术。Mohammad 等^[15]提出了基于海上风电和潮流能的混合发电系统(HOTT),构建了仿真系统,验证了混合发电系统的可行性。秦川等^[16]将近海风力发电、波浪能发电、潮流能发电融合成一有机结合体,通过电气

收稿日期: 2014-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51137002,51407060);江苏省自然科学基金(BK2011026)

作者简介: 秦川(1981—),男,江苏靖江人,讲师,博士,主要从事电力系统建模与控制研究。E-mail: cqin@hhu.edu.cn

连接系统,实现了各种发电装置之间的相互兼容以及与电网的可靠连接。近海可再生能源综合发电的拓扑设计、控制、并网运行研究离不开仿真计算。而仿真计算是以模型为基础的,因此,在研究近海可再生能源综合发电时,首先要对其进行机理建模,也即详细模拟综合发电单元的各组成部分以及相应的内部电气拓扑连接方式,建立其详细机理模型。

电力系统暂态可分为毫秒级的电磁暂态和秒级的机电暂态。针对这 2 种仿真, Matlab 的电力系统工具箱 Sim Power Systems (SPS) 分别采用 2 种方法进行解算^[17]。在进行电磁暂态仿真时,SPS 采用详细算法,有连续法和离散法 2 种,它们建立在最基本的电路原理和微分方程求解的基础上。在每个周期内均采用微秒级的仿真步长,逐点求取基波、直流与谐波分量;在进行机电暂态仿真时,SPS 采用滤去直流和谐波分量计算的相量法,将计算内容固定为额定频率下的交流量,从而减少了仿真步数、缩短了仿真时间。与之相对应,在 Matlab 平台下,对基于电压源变换器(VSC)发电系统的并网研究进行建模的方法有 3 种,分别是详细模型(detailed model)、平均模型(average model)和相量模型(phasor model)。详细模型描述了电力电子变换器的详细特性,适用于电磁暂态仿真、谐波分析以及观测控制系统的动态性能;平均模型用开关器件一个开关周期内交流电压的平均值来描述变换器的动态特性,适用于观测控制系统的动态特性,但不适用于谐波分析;相量模型忽略了变换器中电力电子器件的开关特性,适用于机电暂态仿真。

本文以一种融合近海风电、波浪能发电和潮流能发电的近海可再生能源综合发电系统^[16,18]为例,在 Matlab/Simulink 平台下分别搭建了其详细模型和相量模型,并对这 2 种常用的建模方法进行了时域仿真对比。

1 近海可再生能源综合发电系统结构

本文所述近海可再生能源综合发电系统结构如图 1 所示。其中,风力发电和潮流能发电的透平采用水平轴式,发电机采用直驱式旋转永磁发电机(DDPMG),波浪能发电采用基于阿基米德摆(AWS)的直线永磁发电机(LPMG)^[19-20]。

3 种发电装置分别通过机侧 PWM 整流器并联到直流电容,然后通过网侧 PWM 逆变器站和升压变接入交流电网。

2 综合发电系统的详细模型

详细模型对系统中发电机、电力电子变换器及其控制系统等进行详细描述,适用于电磁暂态仿真和观测控制系统动态性能。对于近海可再生能源综合发电系统而言,系统通过 3 个机侧整流器以及 1 个网侧逆变器并网,模型中包含大量状态变量及非线性模块。实际仿真中,采用离散的 Z 变换传递函数搭建详细模型,采用定步长离散算法进行计算,步长设为 5 μs。

2.1 发电机模型

2.1.1 DDPMG 模型

DDPMG 本质上是一种同步发电机,与传统的同步发电机类似。假设 d、q 坐标系的 d 轴与永磁体产生的磁场同相位,DDPMG 模型可以写为

$$\begin{cases} L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -u_{ds} - R_s i_{ds} + L_s \omega i_{qs} \\ L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -u_{qs} - R_s i_{qs} - L_s \omega i_{ds} + \omega \psi \\ T_{em} = \frac{3}{2} n_p \psi i_{qs} \end{cases} \quad (1)$$

式中:ψ——DDPMG 永磁体励磁磁链;u_{ds}、u_{qs}——DDPMG 定子电压的 d、q 轴分量;i_{ds}、i_{qs}——DDPMG 定子注入电流的 d、q 轴分量;L_s、R_s——DDPMG 定子电感和电阻;ω——DDPMG 发电机转速;T_{em}——DDPMG 的电

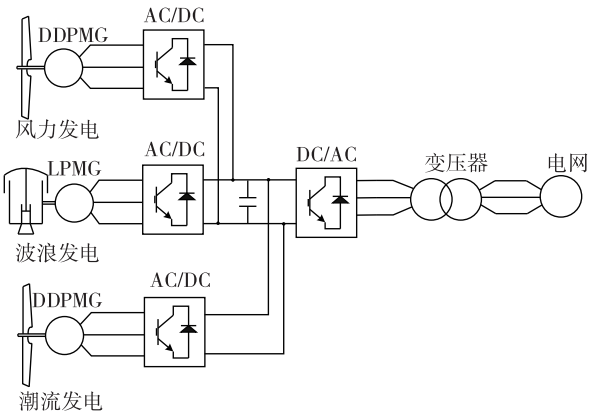


图 1 综合发电系统结构示意图
Fig. 1 Structure of hybrid generation system

磁转矩; n_p ——DDPMG 发电机极对数。

DDPMG 取消了传动齿轮箱,其转子轴通常直接与风力发电或者潮流能发电装置叶轮的传动轴相连。因此通常情况下,采用集中质量块模型来表示其轴系模型:

$$\frac{d\omega_l}{dt} = \frac{T_m - T_{em} - B_m \omega_l}{J} \tag{2}$$

其中

$$\omega = n_p \omega_l$$

式中: J ——发电系统的等效转动惯量; B_m ——转动黏滞系数; ω_l ——叶轮的转速; T_m ——叶轮的机械转矩。

2.1.2 LPMG 模型

波浪能发电装置所采用的 LPMG 本质上也是永磁发电机,与传统的旋转永磁发电机主要区别是发电机动子的运动规律不同。传统的旋转电机旋转速度和旋转方向保持不变,而 LPMG 的动子(Translator)是进行来回往复运动,其速度的大小和方向是变化的,其发电机模型可以表示为

$$\begin{cases} L_{sl} \frac{di_{dsl}}{dt} = -R_l i_{dsl} + X_{sl} i_{qsl} - u_{dsl} \\ L_{sl} \frac{di_{qsl}}{dt} = -R_l i_{qsl} - X_{sl} i_{dsl} - u_{qsl} + \omega_l \psi_{PMI} \end{cases} \tag{3}$$

其中

$$X_{sl} = |\omega_l| L_{sl} \quad \omega_l = 2\pi \frac{v}{\lambda}$$

式中: L_{sl} ——LPMG 同步电感; R_l ——LPMG 定子电阻; X_{sl} ——LPMG 同步电抗; i_{dsl} 、 i_{qsl} ——LPMG 定子电流的 d 、 q 轴分量; u_{dsl} 、 u_{qsl} ——LPMG 端口电压的 d 、 q 轴分量; ψ_{PMI} ——LPMG 永磁体的磁链; ω_l ——LPMG 的电角速度; v ——LPMG 运动速度; λ ——LPMG 极距。

LPMG 是由 AWS 驱动的,其机械动态模型可以由单质量块模型表示:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \\ m_{tot} \frac{dv}{dt} + \beta_g v + \beta_w v + k_s x = F_{wave} \end{cases} \tag{4}$$

式中: x ——AWS 浮子和 LPMG 动子的位移; m_{tot} ——AWS 所有运动部件的质量总和; β_g ——LPMG 的阻尼系数; β_w ——AWS 的水动力阻尼系数; k_s ——AWS 的弹性系数; F_{wave} ——波浪作用在 AWS 浮子上力的总和,是整个波浪发电系统激励。

2.2 变换器模型

详细模型对电力电子变换器的结构和 PWM 控制进行了详细的描述。其电力电子变换器主要由直流环节、机侧整流器和网侧逆变器部分组成。由于网侧逆变器和机侧整流器的电路结构类似,在此仅对网侧逆变器进行分析,其结构示意图如图 2 所示。

在三相电网电压平衡下,其数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_a - u_{dc} \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} - Ri_a \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - u_{dc} \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} - Ri_b \\ L \frac{di_c}{dt} = u_c - u_{dc} \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} - Ri_c \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_r \end{cases} \tag{5}$$

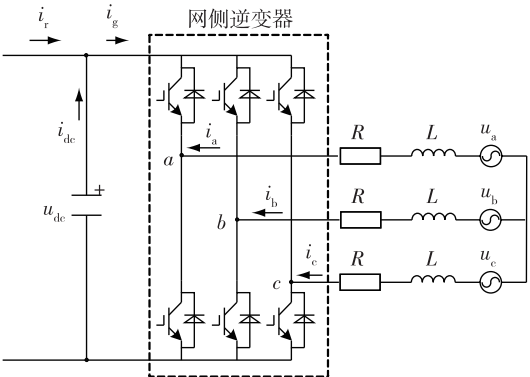


图 2 详细模型中的网侧逆变器结构

式中: S_a 、 S_b 、 S_c ——三相桥臂的开关函数,当其为 1 时,

Fig. 2 Structure of inverter on line side in detailed model

表示桥臂的上管导通,下管关断,当其为 0 时相反; u_{dc} ——直流母线的电压; i_r ——机侧电流; $u_a、u_b、u_c$ ——网侧三相电压; $i_a、i_b、i_c$ ——网侧逆变器三相电流; $R、L$ ——网侧电阻和电感; C ——直流侧电容。

对式(5)进行坐标变换,可得 $d、q$ 坐标系下的网络侧逆变器模型为

$$\begin{cases} u_d = S_d u_{dc} = u_{dg} - L \frac{di_{dg}}{dt} - Ri_{dg} + L\omega i_{qg} \\ u_q = S_q u_{dc} = u_{qg} - L \frac{di_{qg}}{dt} - Ri_{qg} - L\omega i_{dg} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S_d i_{dg} + S_q i_{qg} - i_r \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_{dg}、u_{qg}$ ——电网电压的 $d、q$ 轴分量; $i_{dg}、i_{qg}$ ——电网电流的 $d、q$ 轴分量; $u_d、u_q$ ——网侧逆变器的 $d、q$ 轴电压分量; $S_d、S_q$ —— $d、q$ 轴逆变器开关函数。

2.3 控制器模型

综合发电系统机侧控制目标是分别实现 3 种能量的最大功率跟踪,电网侧控制目标是维持直流母线电压和网侧电压恒定。近海风电和潮流能发电采用直驱永磁同步发电机,其机侧控制器结构见文献[20-22]。下面以波浪能发电系统为例,分别介绍其机侧和网侧的控制器模型。

AWS 所采用的 LPMG 一般通过“背靠背”电力电子变换器与电网相连,其发电机侧控制器和网侧控制器结构如图 3 所示。图中, $u_{dsl}^*、u_{qsl}^*$ 为机侧 PWM 整流器的控制信号; $u_{dg}^*、u_{qg}^*$ 为网侧 PWM 逆变器的控制信号; $u_{l_ref}、u_l$ 分别是网侧电压的参考值和实测值; $i_{dg_ref}、i_{qg_ref}$ 分别为网侧电流参考值。

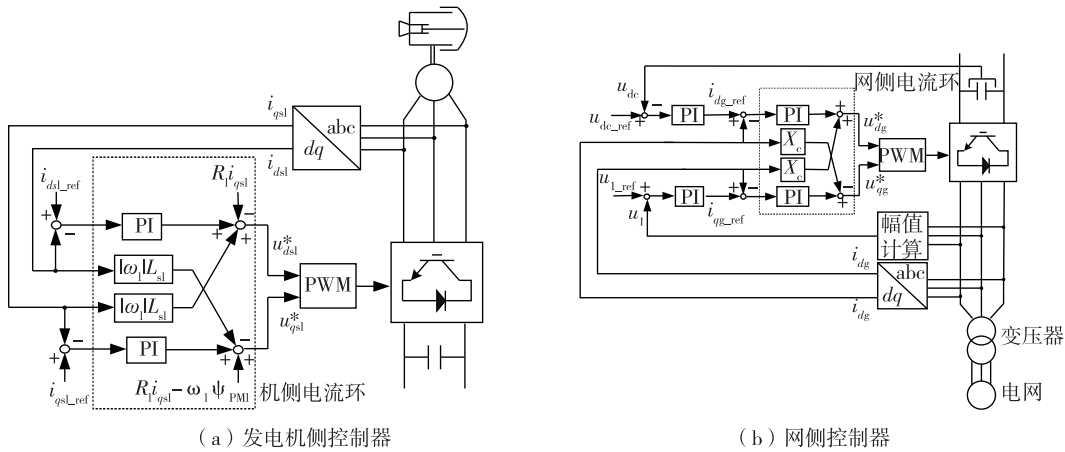


图 3 LPMG 发电机侧及网侧详细模型控制器结构
Fig.3 Structure of controllers on generator side and line side in detailed model of LPMG

其网侧控制器目标是维持网侧电压及直流母线电压恒定,发电机侧控制器的控制目标是波浪能的最大功率跟踪以及发电机损耗最小,一般令控制器电流环参考值为

$$i_{qsl_ref} = \frac{\beta_{\omega} \lambda v}{3\pi\psi_{PMI}} \quad (7)$$

$$i_{dsl_ref} = 0 \quad (8)$$

DDPMG 控制器结构与 LPMG 类似。其发电机侧控制目标一方面是实现最大功率跟踪,另一方面使得发电机损耗最小;网侧控制目标是维持网侧电压和直流电容电压恒定。

3 综合发电系统的相量模型

相量模型忽略电力电子器件的开关特性,将综合发电系统通过带内阻的可控电流源接入电网。相量模型采用相量法进行仿真计算,只关注特定频率(本文为 60 Hz)下系统电压和电流的幅值和相角变化,因此不再像详细模型中需要求解全部的微分方程,而只需求解关于电压、电流相量的代数方程,大大缩短了仿真时间,从而使相量模型更适用于在长时间段内(几十秒到几分钟)模拟系统机电振荡。

就模型方程而言,相量模型中的发电机模型、控制器结构均与详细模型中类似。但对于电力电子变换器

及底层 PWM 控制模块,由于机电暂态时间常数远大于电力电子器件的开关周期,因此在搭建相量模型时,可以忽略器件的开关特性及底层 PWM 控制模块,而只考虑变流器的功率平衡和直流电容的动态。

3.1 综合发电系统电力电子变换器模型

相量模型中,综合发电系统直流侧仅考虑发电机侧整流器与电网侧逆变器的功率平衡,方程可以写为

$$P_s + P_g + P_{dc} = 0 \tag{9}$$

其中

$$P_s = P_{wind} + P_{AWS} + P_{tidal} \quad P_{dc} = u_{dc} i_{dc} = -C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt}$$

式中: P_s ——风力发电机、波浪能发电机以及潮流能发电机定子侧输出有功功率之和; P_g ——网侧逆变器的有功功率; P_{dc} ——并联电容器的有功功率; P_{wind} 、 P_{AWS} 、 P_{tidal} ——风力发电机、波浪能发电机以及潮流能发电机机侧的有功功率,其分别由各发电机模型方程及机侧控制器等效计算得到。

从式(9)可以看出,相量模型的电力电子变换器模块只考虑功率平衡方程以及中间直流电容的动态。

3.2 综合发电系统相量模型结构

以波浪能发电系统为例,包含控制器的发电机侧的相量模型结构如图 4 所示。从图 4 可以看出,相量模型中不包含详细的电力电子开关器件,而是将机侧控制器的输出直接作为发电机的 d 、 q 轴电压输入。

包含控制器的波浪发电系统网侧相量模型结构如图 5 所示,其控制目标与详细模型中相同,即维持网侧电压和直流电容电压恒定。其中,直流电容电压 u_{dc} 由式(9)计算得到;逆变器交流侧电压 u_d 、 u_q 由网侧控制器模型计算得到;接入点电压的 d 、 q 轴分量 u_{dg} 、 u_{qg} 由测量采集系统测得综合发电系统接入点电压后,通过坐标变换计算得到。再根据如图 6 所示的三相 R - L 串联等效支路,可以计算出综合发电系统实际输入到电网的三相电流,从而可以通过可控电流源接入电网。图 6 中, u 为逆变器交流侧电压, u_g 为网侧接入点电压, i 为 R - L 支路电流。

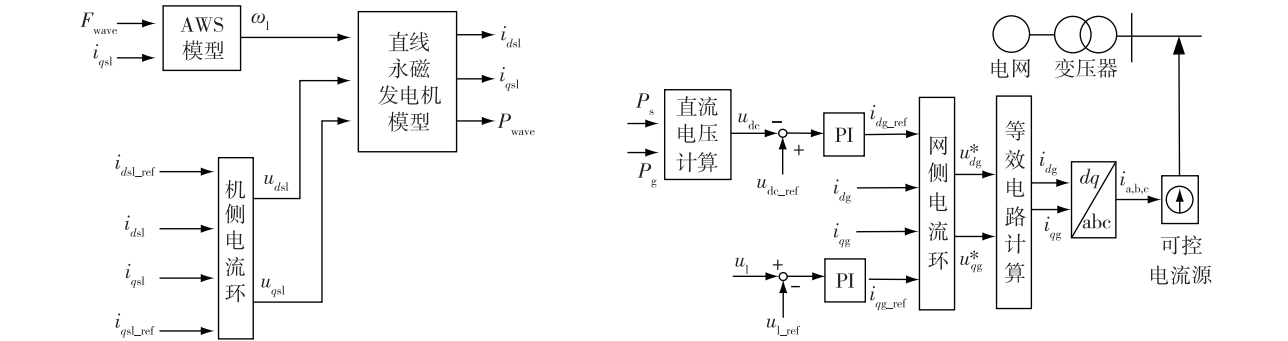


图 4 LPMG 相量模型发电机侧模型结构

Fig. 4 Schematic diagram of controller on generator side in phasor model of LPMG

图 5 相量模型网侧变换器结构

Fig. 5 Structure of converter on line side in phasor model

4 2 种模型的仿真对比

为了对近海可再生能源综合发电系统的详细模型和相量模型进行对比,在 Matlab/Simulink 平台下,分别搭建了 2 种模型,并保持 2 种模型中各参数值一致。

以单机无穷大系统为研究对象,系统包括无穷大母线、变压器、负荷以及由近海可再生能源综合发电系统,其示意图如图 7 所示,系统仿真参数详见文献[16]。

4.1 风速变化时的仿真对比

设风速在 4 s 时由 10 m/s 斜坡上升至 11 m/s;由于潮流流速相对稳定,在短时间内可视为恒定,故潮流流速设为 2.5 m/s;波浪的波高设为正弦波,从而 AWS 波浪能发电装置输出有功功率也近似为正弦波。详细模型

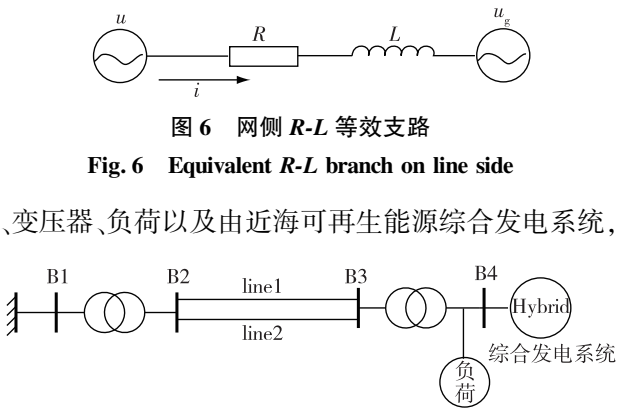


图 7 单机无穷大系统示意图

Fig. 7 Configuration of single-machine infinite bus (SMIB)

和相量模型的系统总输出有功功率如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在风速变化时,不管是相量模型还是详细模型,系统的输出功率均能够跟踪输入信号的变化,且最终输出功率保持一致。但在仿真耗时上详细模型比相量模型耗时更久。

4.2 电网故障下的仿真对比

4.2.1 小扰动

在如图 7 所示的单机无穷大系统中,5 s 时在无穷大电源处设置电压跌落 15%,0.15 s 后电压恢复。仿真时设置风速和潮流流速恒定,分别为 10 m/s 和 2.5 m/s,波浪波高设为正弦波。详细模型和相量模型的端口电压、直流电容电压、有功功率、无功功率曲线如图 9 所示。从图 9 中可以看出,在无穷大电源电压扰动时,详细模型和相量模型动态响应基本吻合。此外,相量模型的曲线比较平滑,而详细模型曲线有高频波动。其原因是因为详细模型中考虑了电力电子变换器的开关特性及动态,使得其波形中具有相应的高频分量,而相量模型只考虑电力电子变换器中直流电容的动态,忽略了器件的开关特性及动态。

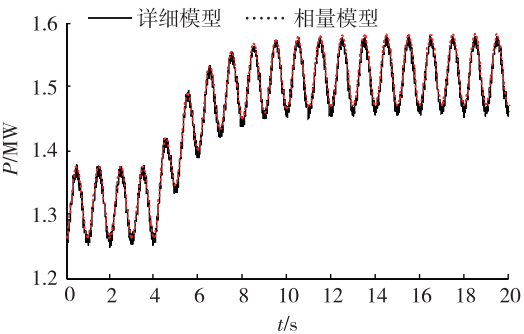


图 8 风速变化时的有功功率曲线
Fig. 8 Curves of active power under wind speed disturbance

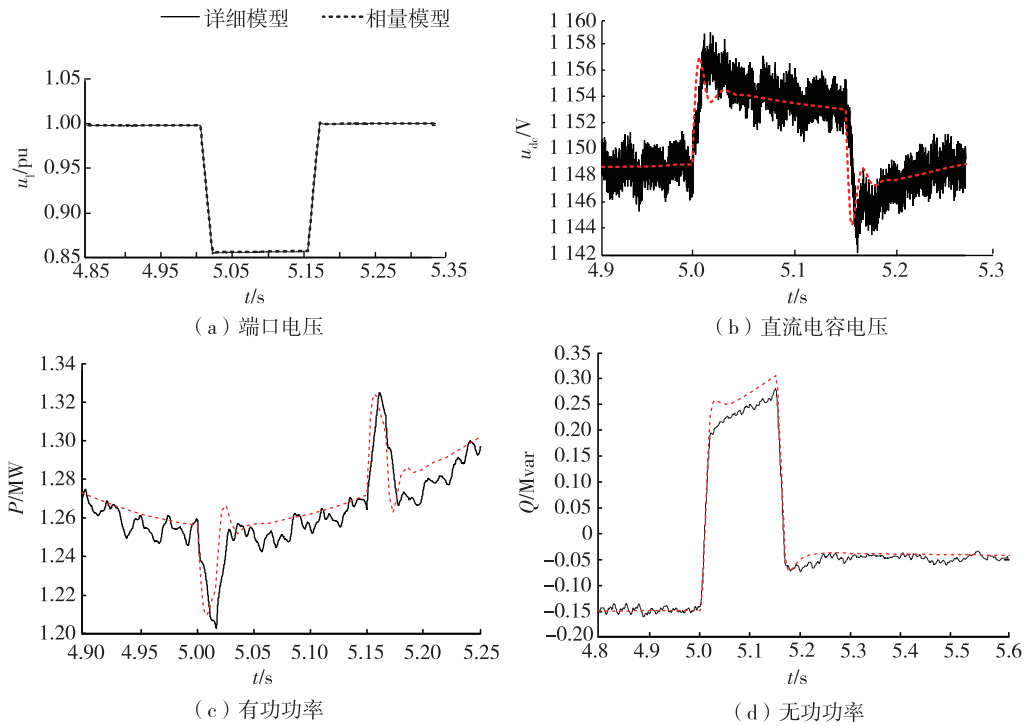


图 9 无穷大电源扰动下动态响应曲线
Fig. 9 Dynamic response curves with disturbance of infinite power supply

4.2.2 大扰动

在如图 7 所示的单机无穷大系统中,4 s 时线路 line1 中点处设置三相接地短路,0.15 s 后故障切除,故障时接地电阻 5 Ω。详细模型和相量模型的动态响应如图 10 所示。从图 10 中可以看出,在三相接地短路故障下,详细模型和相量模型的动态响应有区别,但总体趋势基本一致。对比图 9 和图 10 可以看出,大扰动下,详细模型和相量模型的动态响应差异要比小扰动下的差异大。

5 结 语

以一种近海可再生能源综合发电系统为例,在 Matlab/Simulink 平台下,对详细模型和相量模型进行了对比分析。在定性分析 2 种模型的区别之后,分别在风速变化时以及电网扰动故障下,对详细模型和相量模

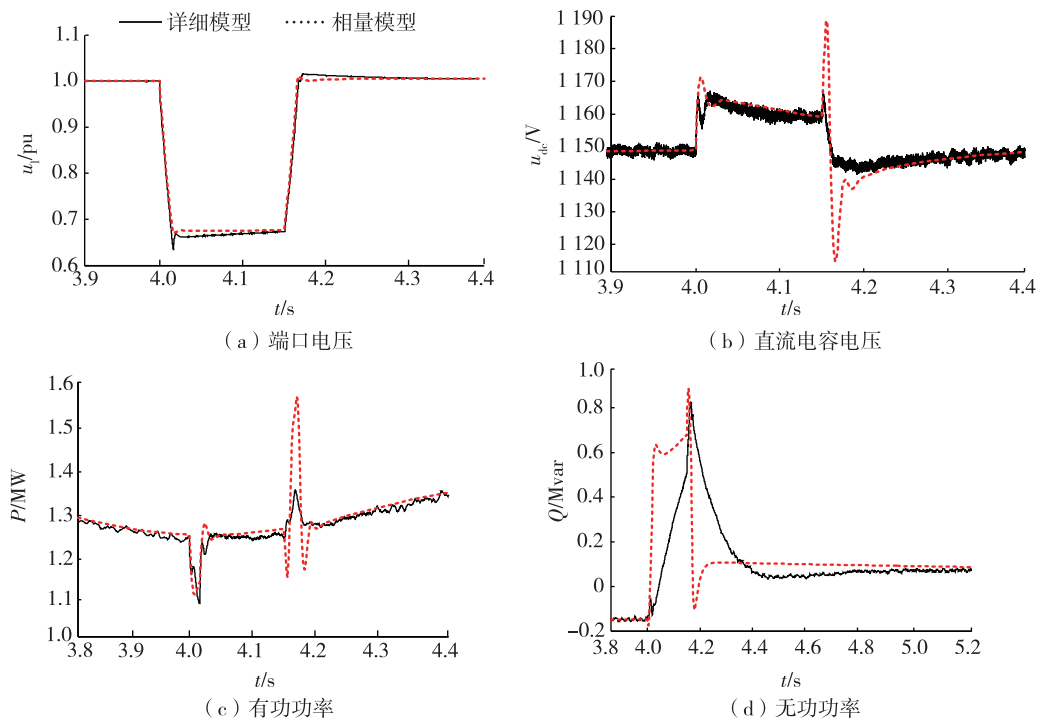


图 10 三相接地短路故障下的动态响应曲线

Fig. 10 Dynamic response curves with three-phase short-circuit fault

型进行了仿真对比。仿真结果显示,详细模型和相量模型的稳态和动态响应情况均相似,差别不明显。因此可以根据实际研究需要,选用合适的模型。如研究短时间内的电磁暂态、谐波和电能质量等问题,则采用详细模型;而研究较长时间段内的机电暂态过程等,则采用相量模型。

参考文献:

[1] 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))

[2] BOOKMAN T.Wind energy's promise, offshore[J]. IEEE Technology and Society Magazine, 2005, 24: 9-15.

[3] 邢作霞, 郑琼林, 姚兴佳. 近海风力发电技术的现状及展望[J]. 电机控制与应用, 2005, 32(9): 55-60. (XING Zuoxia, ZHENG Qionglin, YAO Xingjia. Some prospectives of offshore wind power technology [J]. Electric Machines & Control Application, 2005, 32(9): 55-60.(in Chinese))

[4] 王志新, 王承民, 艾芊, 等. 近海风电场关键技术[J]. 华东电力, 2007, 35(2): 37-41. (WANG Zhixin, WANG Chengmin, AI Qian, et al. Key technology for offshore wind farms[J]. East China Electric Power, 2007, 35(2): 37-41.(in Chinese))

[5] 仲颖, 郑源, 刘美琴, 等. 我国东南沿海海上风电场建设的探究[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 140-144. (ZHONG Ying, ZHENG Yuan, LIU Meiqin, et al. Study on the construction of the offshore wind farm ASSY in the southeast coast of China[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(3): 140-144.(in Chinese))

[6] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89. (LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89.(in Chinese))

[7] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31. (CHI Yongning, WANG Weisheng, Dai Huizhu. Study on transient voltage stability enhancement of grid-connected wind farm with doubly fed induction generator installations [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 25-31.(in Chinese))

[8] 王志新, 李响, 艾芊, 等. 海上风电柔性直流输电及变流器技术研究[J]. 电力学报, 2007, 22(4): 413-417. (WANG Zhixin, LI Xiang, AI Qian, et al. Research on offshore wind energy flexible direct current transmission and converter technology [J]. Journal of Electric Power, 2007, 22(4): 413-417.(in Chinese))

[9] CLEMENT A, MCCULLEN P, FALCAO A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives[J]. Renewable &

- Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(5): 405-431.
- [10] de SOUSA P M, GARDNER F, DAMEN M, et al. Modeling 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.
- [11] 吴必军, 邓赞高, 游亚戈. 基于波浪能的蓄能稳压独立发电系统仿真[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 50-56. (WU Bijun, DENG Zangao, YOU Yage. Simulation of pressure-maintaining storage isolated generating system based on wave energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 50-56.(in Chinese))
- [12] BAHAJ A, BATTEN W, MCCANN G. Experimental verifications of numerical predictions for the hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbines [J]. Renewable Energy, 2007, 32(15): 2479-2490.
- [13] 马舜, 李伟, 刘宏伟, 等. 25 kW 独立运行式水平轴潮流能发电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 18-22. (MA Shun, LI Wei, LIU Hongwei, et al. A 25kW stand-alone horizontal axis tidal current turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 18-22.(in Chinese))
- [14] 王刚, 历文超, 王树杰, 等. 潮流能发电机组控制系统开发[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 23-26. (WANG Gang, LI Wenchao, WANG Shujie, et al. Development of tidal current generator sets control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 23-26.(in Chinese))
- [15] MOHAMMAD L R, YASUYUKI S. Hybrid offshore-wind and tidal turbine (HOTT) energy conversion I (6-Pulse GTO rectifier and inverter) [C]// IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. Singapore: IEEE, 2008: 650-655.
- [16] 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, et al. Hybrid offshore wind, wave and tidal turbine energy conversion system: structure and electrical interface[J]. Proceeding of the CESS, 2014, 34(13): 2013-2021.(in Chinese))
- [17] 周兆庆, 陈星莺. MATLAB 电力系统工具箱在电力系统机电暂态仿真中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 51-54. (ZHOU Zhaoqing, CHEN Xingying. Application of SPS in power system electromechanical transient simulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(4): 51-54.(in Chinese))
- [18] 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))
- [19] FENG W, XIAOPING Z, PING J, 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.
- [20] FENG W, XIAOPING Z, PING J, et al. Optimal control for AWS-Based wave energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1747-1755.
- [21] M'ONICA C, SANTIAGO A, JUAN C B. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid [J]. IEEE Transactions Energy Convers, 2006, 11(3): 130-135.
- [22] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 326-330.