

基于波浪能和风能的多能发电系统建模及仿真分析

我国众多岛屿离大陆较远，市电难以覆盖或者成本过高，因地制宜，利用海岛周围丰富的风能、波浪能和太阳能，能满足海岛供电需求。然而这些可再生能源的能量密度较低且稳定性较差，容易出现供电不稳定的现象。针对此问题，采用波浪能和风能互补发电，使得系统能够稳定供电，提高电能质量。研究基于波浪能和风能建立多能互补发电系统，搭建了系统整体模型，分析并推导了风力发电机和直驱式波浪发电机的控制策略，分析了电网侧的逆变器控制策略。搭建了整体系统的PSCAD仿真模型，进行运行仿真分析，结果表明，采用风能和波浪能互补发电，输出电能平稳，可实现功率跟随。

王琛¹ 岳付昌¹ 陈珉烁² 杨文³ 高翔¹/1.国网连云港供电公司
2.东南大学电气工程学院 3.国电南瑞科技股份有限公司

0 引言

我国众多岛屿远离大陆，无法接入大的电网中，市电难以覆盖或者接入市电成本过高，导致目前仍有大量岛屿没有电能供应或者缺少电能供应^[1-2]。这些孤立岛屿处于海洋中，周围存在着大量的风能、波浪能等资源^[3]，为岛屿的供电创造了条件。然而岛屿附近的众多能源的利用也面临着许多困难。单独使用一种能源进行供电存在着许多困难，并且由于岛屿面积等客观条件，单一太阳能的发电系统存在建造成本高的特点，发电功率有限。然而，采用单一风力发电系统供电，存在海岛微电网的黑启动困难的问题。采用直驱式波浪发电系统能够进行海岛微电网的黑启动，并且不受海岛面积限制^[4]。

因此，针对上述单独使用一种能源的问题，多能互补发电技术是最好的选择^[5]。由于多种能源之间具有互补性，多能互补发电系统工作时，多种可再生能源供电能力同时较低的情况非常少，因而可以使得系统能够供应稳定的电能，电能质量大大提高^[6]。针对直驱式风力发电和直驱式波浪发电技术进行研究，提出一种基于直驱式风力发电和直驱式波浪发电的多能互补发电系统。完成系统结构设计和分析，推导了该互补发电系统的运行控制策略。采用PSCAD搭建了直驱式风力发电和直驱式波浪发电互补发电系统模型，并进行了运行仿真。

1 波浪能风能多能互补发电系统结构

采用直驱式波浪发电和直驱式风力发电的多能互补发电系统的整体系统结构如图1所示。

整体系统采用直流母线并网结构，以便于向不同电压等级的直流、交流负载供电，且微电网建设成本低，便于控制，不需要考虑各分布式电源同步问题，更易于抑制环流^[7]。直驱式风力发电机采用永磁同步发电机直驱的形式，直驱式波浪发电采用永磁直线发电机直驱的形式，发电机发出的交流电经过全桥可控整流电路转化为直流电。控制发电机侧电流实现对能源的捕获跟随。忽略能量变化对微电网电压波动的影响，采用可变逆变器进行网侧控制，实现直流



王琛/工程师

关键词/Keywords

海岛供电 ·
直驱式波浪发电 ·
直驱式风力发电 ·
多能互补发电系统 ·

含波浪能海岛微电网关键技术研究 (5210D0150512)。

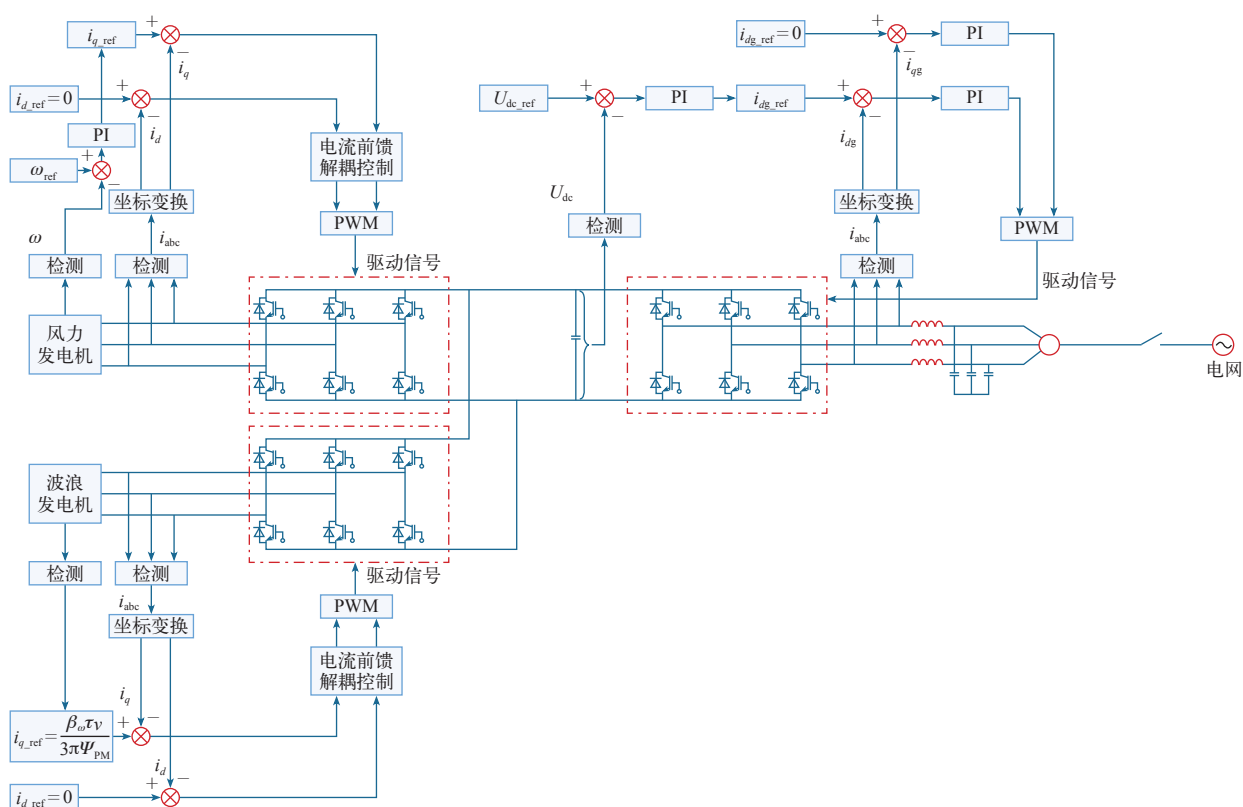


图1 波浪能风能多能互补发电系统整体结构

侧的电压稳定。通过全桥可控逆变电路将整流后的直流电转化为三相交流电，实现功率从直流侧到电网侧的流动。

2 波浪能风能多能互补发电系统控制系统设计

2.1 整流器控制策略

直驱式波浪能、风能发电系统，其运行控制目的实现对波浪能和风能的跟随捕获^[8]。由于直驱式波浪发电系统的直驱直线运行速度具有时变性，随着海洋中波浪能的变化，同一运动周期电压和功率存在变化，造成输出电压和功率均存在波动。然而，风能在短时变化相对较小。因此，首先采用风能、波浪互补直流侧并网将不稳定的三相输出变为稳定的直流输出。

三相永磁同步发电机的 dq 坐标系下的数学模型如下。

电压方程为

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = R_s \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{pmatrix} + \omega \begin{pmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \end{pmatrix} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3n_p}{2} \Psi_{PM} i_q \quad (3)$$

功率方程为

$$P_s = T_e \omega = \frac{3P_0}{2} \omega \Psi_{PM} i_q \quad (4)$$

式中， u_d 、 u_q 为定子绕组 dq 轴电压； i_d 、 i_q 为定子绕组 dq 轴电流； Ψ_d 、 Ψ_q 为定子绕组 dq 轴磁链； R_s 为定子电阻； ω 为发电机运行速度； p 为微分算子； L_d 、 L_q 为定子绕组 dq 轴电感； Ψ_{PM} 为永磁体产生的磁链； n_p 为发电机极对数。

从发电机的功率方程可以看出，当 d 轴为零时，控制永磁电机的电枢电流 q 轴分量，可实现发

电机输出有功功率的控制^[9-10]。因此，风力发电机的控制策略框图如图2所示。

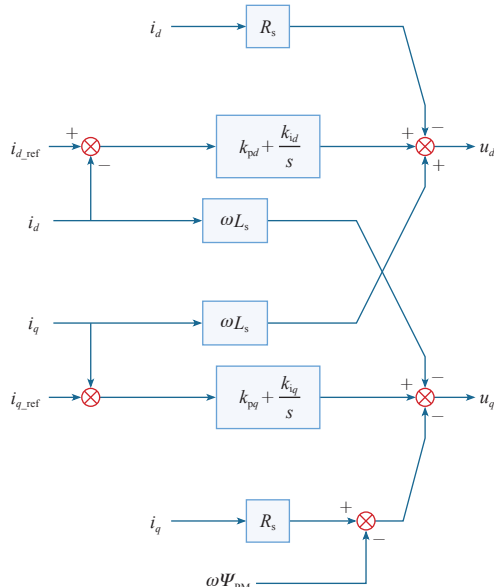


图2 直驱式风力发电机控制策略框图

直驱式波浪发电系统采用三相直线永磁同步发电机，三相直线永磁同步发电机d/q坐标系下的数学模型如下^[11]。

电压方程为

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = R_s \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{pmatrix} + \frac{\pi v}{\tau} \begin{pmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \end{pmatrix} \quad (5)$$

磁链方程为

$$\begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Psi_{PM} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

电磁力方程为

$$T_{em} = \frac{3\pi n_p}{2\tau} \Psi_{PM} i_q \quad (7)$$

功率方程为

$$P_0 = F_{em} v = \frac{3\pi P_0}{2\tau} \Psi_{PM} i_q v \quad (8)$$

式中， u_d 、 u_q 为初级电枢绕组dq轴电压； i_d 、 i_q 为初级电枢绕组dq轴电流； Ψ_d 、 Ψ_q 为初级电枢绕组dq轴磁链； R_s 为初级电枢电阻； τ 为直线电机极距； v 为直线电机运行速度； p 为微分算子； L_d 、 L_q 为初级电枢绕组dq轴电感； Ψ_{PM} 为永磁体产生的磁链； n_p 为直线电机极对数。

同样，根据功率方程，d轴为零时，控制永磁

电机的电枢电流q轴分量，可实现发电机输出有功功率的控制。直驱式波浪发电机控制策略框图如图3所示。

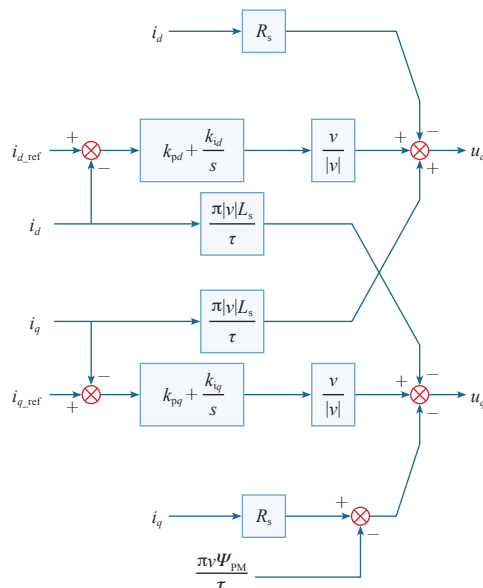


图3 直驱式波浪发电机控制策略框图

2.2 逆变器控制策略

网侧变流器最为常用的控制策略就是基于坐标变换理论的双闭环SVPWM控制^[12]。控制原理图如图4所示。忽略损耗时，维持直流电容电压恒定。网侧变流器一方面控制直流电容电压恒定，另一方面控制系统发出的无

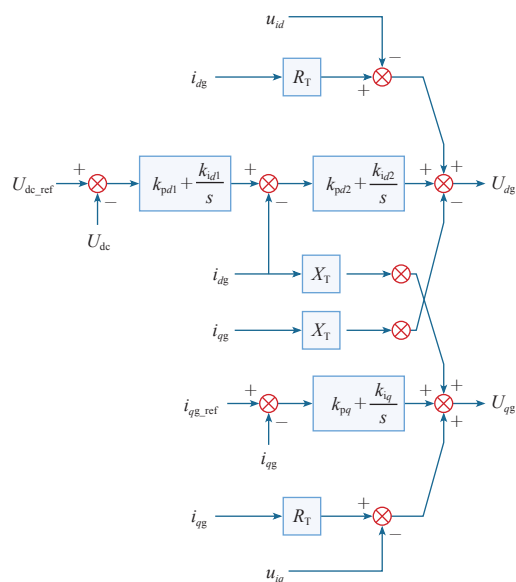


图4 网侧PWM逆变器控制框图

功。采用直流侧电压外环和电流内环双环控制。

将直流电压 U_{dc} 与给定值比拟，对差值进行PI闭环调制，得到 i_{dg_ref} ，通过 i_{qg_ref} 控制无功功率，一般 $i_{qg_ref}=0$ 。将直交轴电流 i_{dg} ， i_{qg} 分别与给定值比拟，对差值进行PI闭环调制，可以得到两个控制电压，再加上交叉耦合补偿电压，得到 d 轴、 q 轴控制电压参考值，再进行坐标变换，得到三相控制电压参考值，最终得到触发信号。

3 PSCAD仿真模型建立

基于PSCAD仿真平台，建立了基于波浪能和风能的多能发电系统仿真模型。

首先，分别建立了风力发电机和波浪能直线发电机的模型，如图5、图6所示。

风力发电机参数：定子电阻 $R_s=10\ \Omega$ ；定子绕组 dq 轴电感 $L_d=0.02\ H$ ， $L_q=0.035\ H$ ；永磁磁链

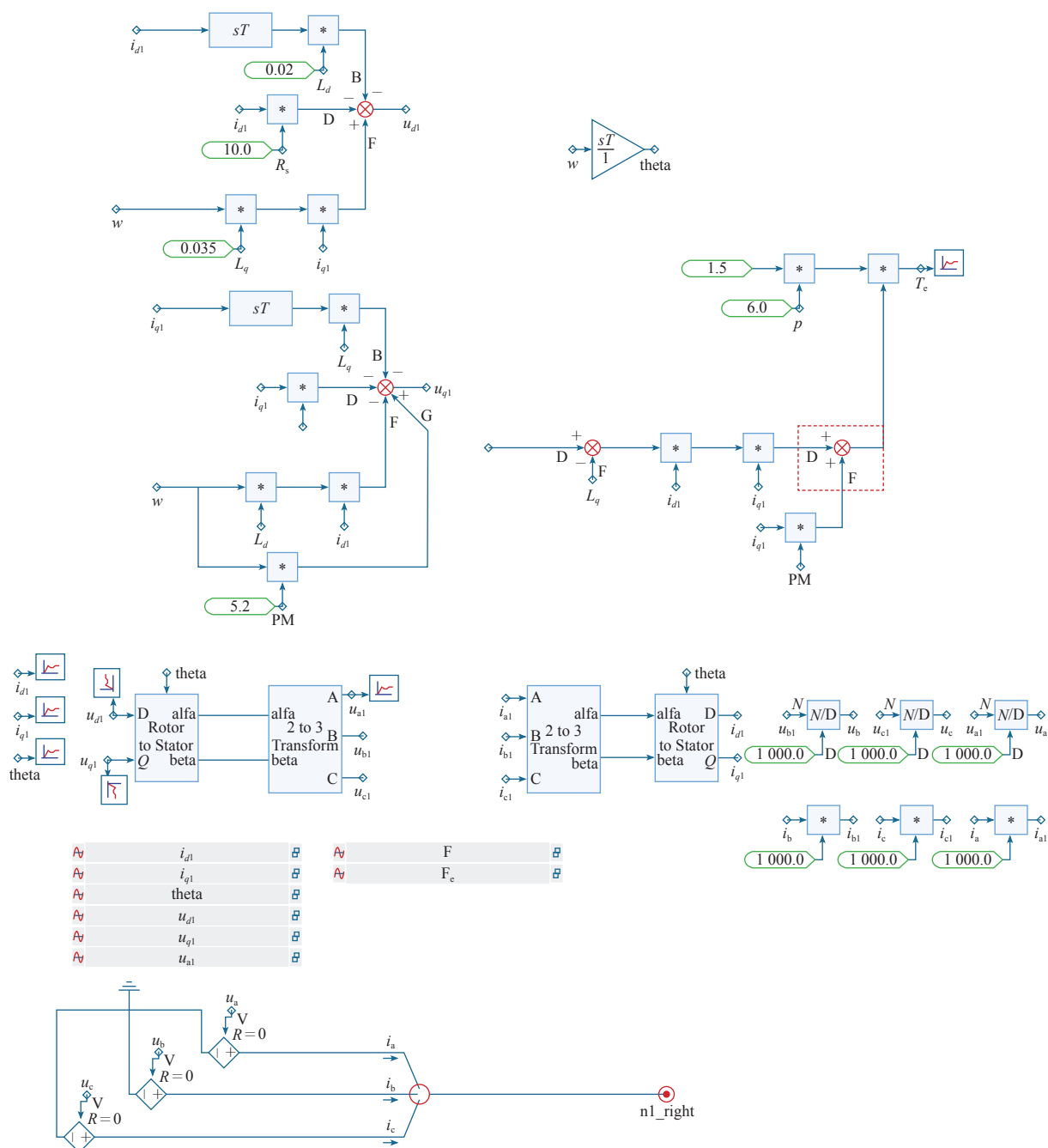


图5 风力发电机模型

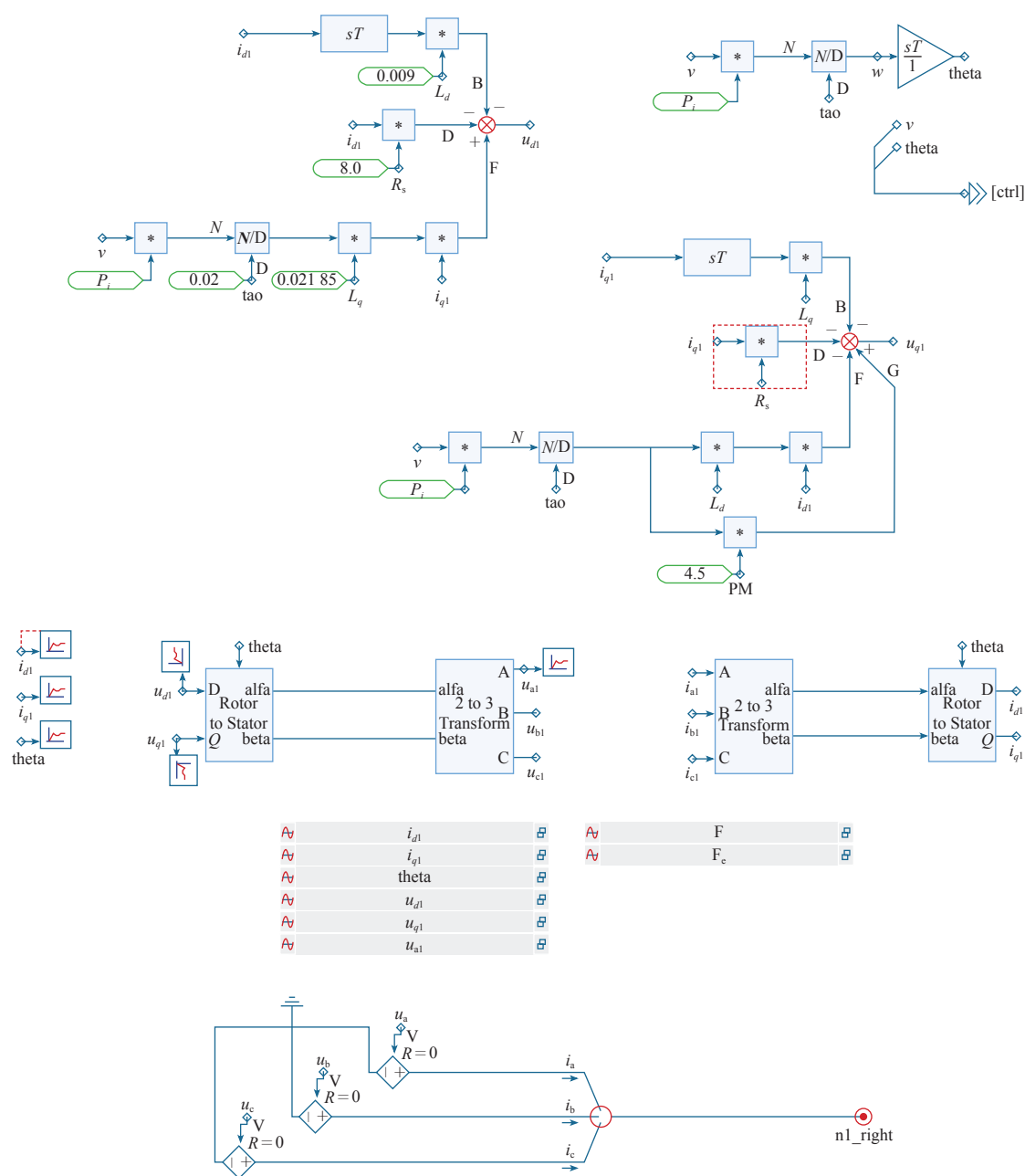


图6 波浪发电机模型

$\Psi_{PM}=5.2$ Wb。

波浪发电机参数：定子电阻 $R_s=8\ \Omega$ ；定子绕组 dq 轴电感 $L_d=0.009$ H， $L_q=0.02185$ H；永磁磁链 $\Psi_{PM}=4.5$ Wb。

然后建立整流电路以及控制策略模型如图7、图8所示。

风力发电系统， d 轴电流参考值： $i_{d_ref}=0$ ； q 轴电流参考值： $i_{q_ref}=10$ A。

波浪发电系统， d 轴电流参考值： $i_{d_ref}=0$ ； q 轴电流参考值： $i_{q_ref}=\beta_{\omega}\tau v/(3\pi\Psi_{PM})$ ， i_{q_ref} 和运动速度 v 成正比，因此 i_{q_ref} 是正弦变化的。在本研究中， $i_{q_ref}=20\sin(\pi t)$ A。

最后建立逆变电路以及控制策略模型，如图9所示。

直流电压参考值： $U_{dc_ref}=600$ V，无功功率控制为零，故 q 轴电流参考值为零： $i_{qg_ref}=0$ 。

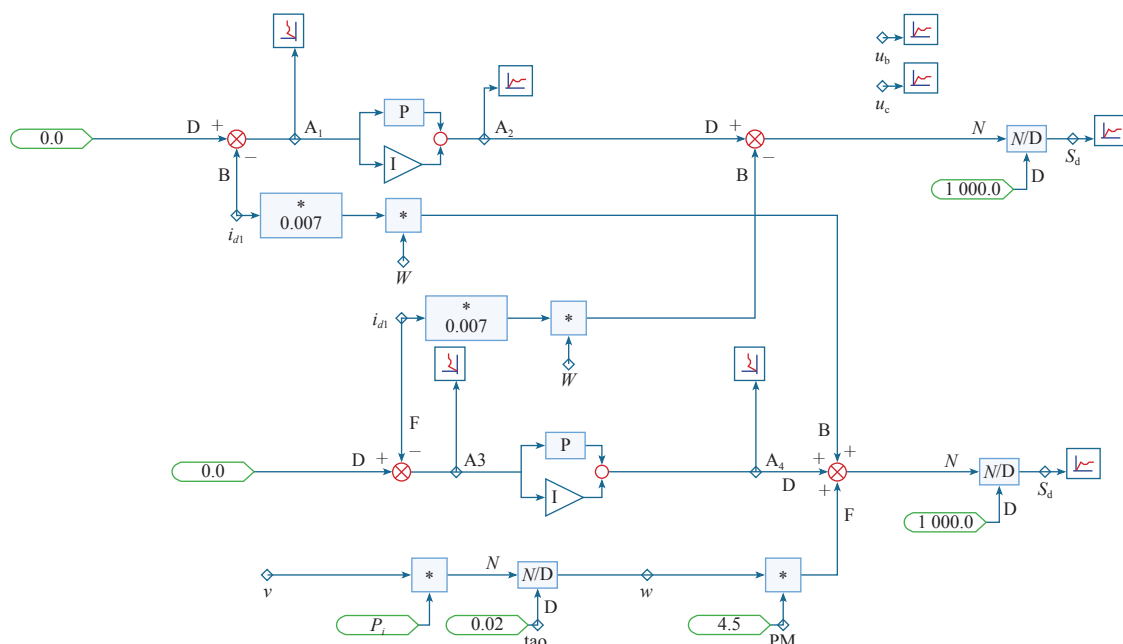


图7 风力发电系统整流电路控制策略模型

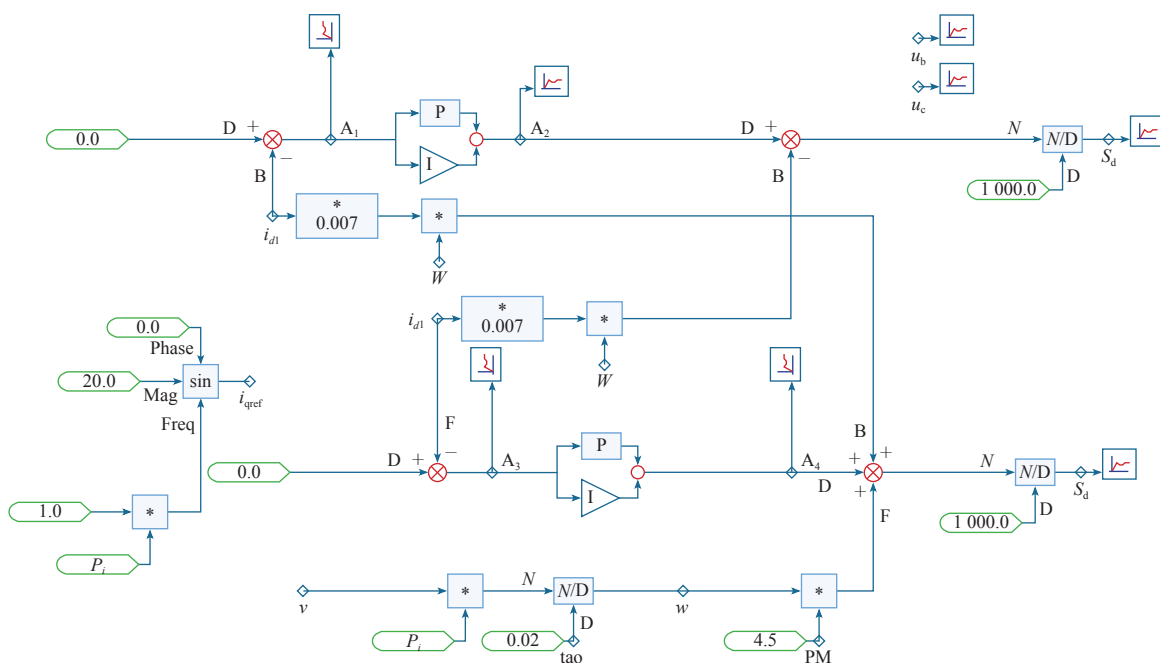


图8 波浪发电系统整流电路控制策略模型

4 仿真分析

针对风力发电机和波浪发电机并网运行进行了仿真分析。仿真过程中风速设定为恒定速度，波浪速度设定为正弦波形，获得了并网运行过程中的发电机输出特性、直流侧电压特性和电枢电流特性。

4.1 风力发电机性能分析

风力发电机输出线电压波形如图10所示。

由图10可以看出，风力发电机输出线电压保持稳定。风力发电机工作正常，性能良好。

4.2 波浪发电机性能分析

波浪发电机输出线电压波形如图11所示。

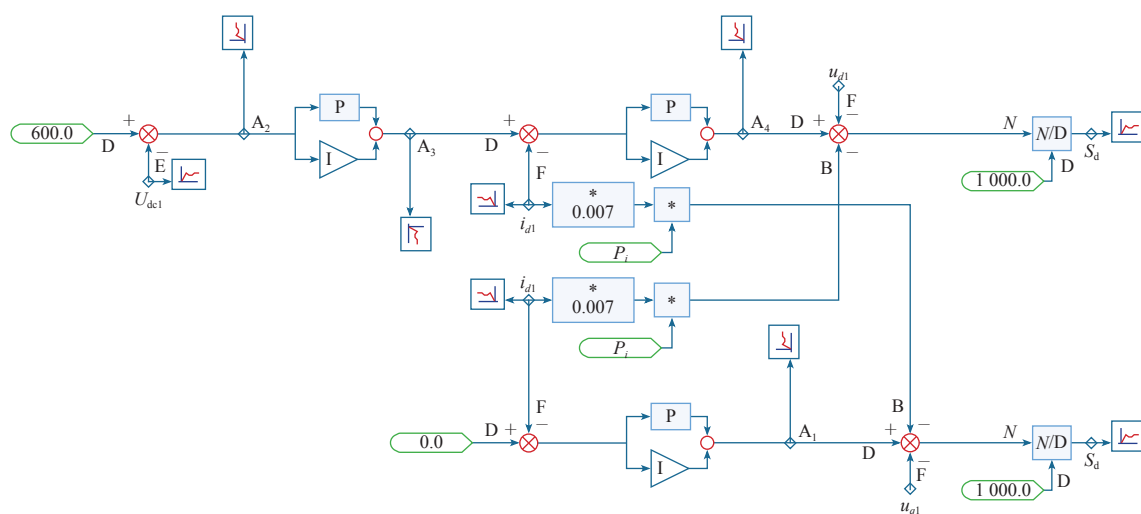


图9 多能互补发电系统逆变电路控制策略模型

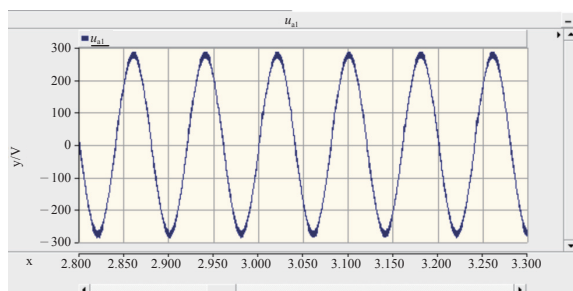


图10 风力发电机输出电压

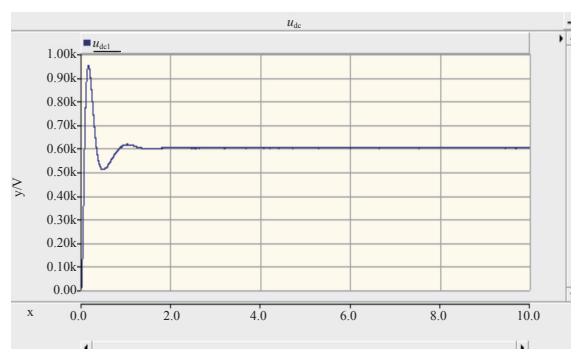


图12 风浪互补发电系统直流电压波形

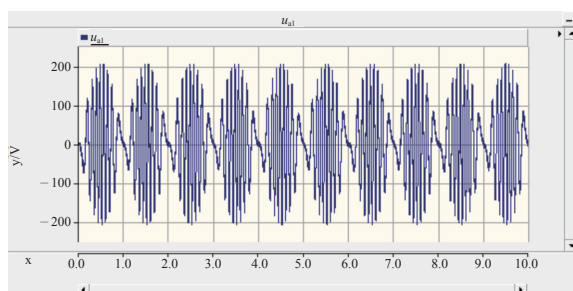


图11 波浪发电机输出电压

直驱式波浪发电系统采用永磁直线电机作为提取波浪能的装置，不同于传统的旋转电机的转子沿一个方向做速度和频率一定的旋转，直线电机中动子沿竖直方向做上下往复的振荡，动子运动速度和频率都是不断变化的，故波浪发电机输出电压也是幅值和频率不断变化的，由上述仿真，波浪发电机性能良好，工作稳定正常。

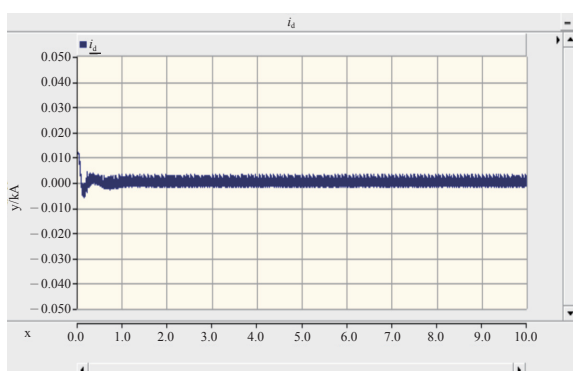
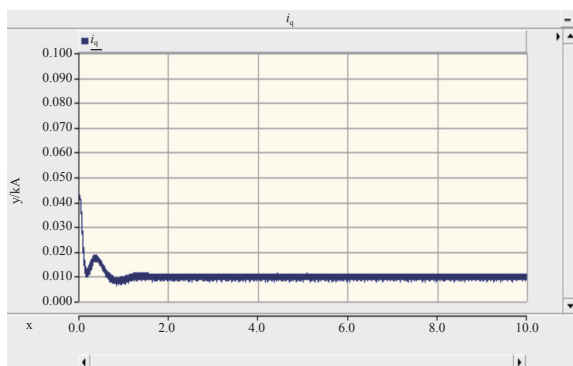
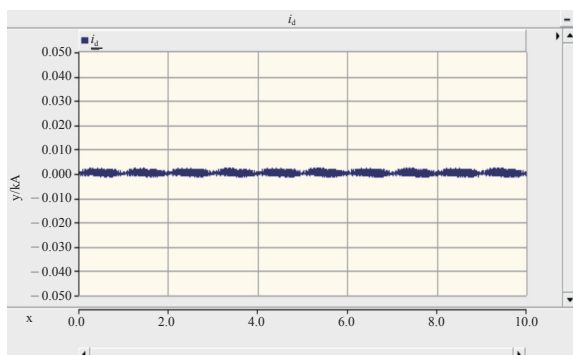
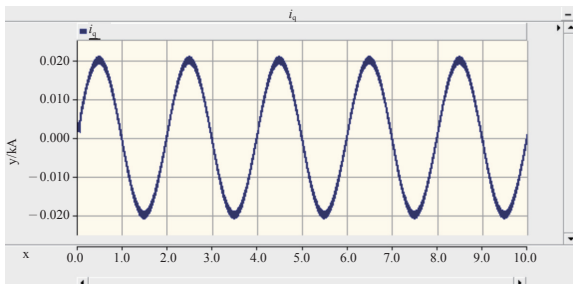
4.3 整体系统仿真结果及分析

风浪互补发电系统 U_{dc} 波形如图12所示。由图12可以看出，直流侧电压在大约为0.1 s后稳定在电压参考值为600 V。综上所述，整流电路直流侧电压基本稳定在电压参考值600 V，整流电路性能良好。

4.4 全控整流桥 dq 轴电流

PWM整流电路是通过控制交流侧 dq 轴电流、使 dq 轴电流追随 dq 轴电流参考值，从而控制直流侧电压恒定的。因此整流电路的性能取决于交流侧 dq 轴电流追随 dq 轴电流参考值的性能。PWM整流电路的 dq 轴电流及其参考值波形如图13~图16所示。

综上所述，整流电路 dq 轴电流追随参考值

图13 风力发电整流电路电流 i_d 波形图14 风力发电整流电路电流 i_q 波形图15 波浪发电整流电路电流 i_d 波形图16 波浪发电整流电路电流 i_q 波形

电流速度较快, 追随性能良好, 实现了风力机和波浪发电的功率跟随, 进而可实现可控的能量捕获。通过逆变器控制, 实现了直流侧的稳定。

5 结束语

基于波浪能和风能设计了多能互补发电系统, 完成了系统的主电路和控制系统的的设计, 推导了直驱式波浪发电和风力发电的全控整流控制策略和网侧控制策略。采用PSCAD仿真平台搭建了多能互补风力发电和波浪发电系统模型, 分析了多能互补发电系统的性能。仿真结果表明, 风力发电机和波浪发电机工作正常, 直流侧电压基本稳定在电压参考值600 V, 整流电路 dq 轴电流追随参考值电流速度较快, 可实现功率的可控, 整个发电系统性能良好。

参考文献

- [1] 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] 张中华. 海岛多能互补独立发电系统的应用研究 [C]. 中国海洋工程学会第十六届中国海洋 (岸) 工程学术讨论会论文集 (上册), 2013: 5.
- [3] 杨伟鹏. 海上波浪能与风能互补发电平台的控制系统研究与设计 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [4] Zamani A R, Badri M A. Wave energy estimation by using a statistical analysis and wave buoy data near the southern Caspian sea [J]. China Ocean Engineering, 2015, 29 (2): 275-286.
- [5] 刘圣冠. 海上风浪互补发电系统的基础平台设计和研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [6] 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, 197.
- [7] 石茂顺, 李伟, 林勇刚, 等. 基于液压传动的风浪互补发电系统的建模与仿真 [J]. 太阳能学报, 2013, 34 (7): 1257-1263.
- [8] 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.
- [9] 曹凯炜. 永磁同步发电机的PWM整流技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [10] 黄磊, 胡敏强, 余海涛, 等. 直驱式波浪发电用全超导初级励磁直线发电机的设计与分析 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (2): 80-86.
- [11] Flávio Medeiros Seibt, Eduardo Costa Couto, Elizaldo Domingues dos Santos, et al. Numerical study on the effect of submerged depth on the horizontal plate wave energy converter [J]. China Ocean Engineering, 2014, 28 (5): 687-700.
- [12] 史鹏飞. 基于分布式发电的微电网能量管理与控制技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [13] 杨健, 黄磊, 仲伟波, 等. 直驱式波浪发电系统能量跟踪控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (增刊1): 21-29.
- [14] Zheng Xiongbo, Ma Yong, Zhang Liang, et al. Experimental investigation on the hydrodynamic performance of a wave energy converter [J]. China Ocean Engineering, 2017, 31 (3): 370-377.
- [15] Chen Weixing, Gao Feng, Meng Xiangdun, et al. Power recovery method for testing the efficiency of the ECD of an integrated generation unit for offshore wind power and ocean wave energy [J]. Science China (Technological Sciences), 2017, 60 (3): 333-344.
- (收稿日期: 2017-09-11) **EA**

广告 | AD

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2018《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容, 力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举, 以丰富内涵充实经典栏目, 持续深化面对面、专家访谈、EA经理人等栏目, 密切关注电气技术的发展和应用。

专家点评 精辟深刻

每期都将围绕一个热点话题, 隆重推出一场专题讨论的盛宴, 共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂, 针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用, 以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间, 促进应用经验交流。

国内邮发代号: 82-341 国外发行代号: M1409

每期定价: 15.00元 全年定价: 360.00元

电气应用

· 电气应用 盛情呈现 ·

2018