

# 基于 pscad 变桨距风力发电系统的建模仿真

张 尧, 王维庆, 李 锋, 潘俊强

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

**摘 要:**首先从风力发电的数学建模说起。应用 PSCAD/EMTDC 软件,以风机各部分数学模型为基础搭建了变桨距风力发电系统模型。分别在恒定风速叠加阵风、随机风情况下,仿真变桨距风力发电机组的输出有功和无功以及发电机转速的变化。仿真结果表明变桨距风电机组具有良好的运行特性,为今后的建模和仿真研究提供一定的借鉴。

**关键词:** PSCAD/EMTDC; 变桨距; 建模

**Abstract:** The basic structure of the variable pitch wind power system model is established based on the various parts of the mathematical model using PSCAD/EMTDC software. The output active and reactive power of the variable pitch wind turbine as well as the speed changes of generator are simulated in the superimposed gust wind speed and in the constant random wind case respectively. The simulation results show that the variable pitch wind turbine has good operating characteristics, which gives a reference for the future modeling and simulation research.

**Key words:** PSCAD/EMTDC; variable pitch; modeling

**中图分类号:** TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0025-03

某学者分析了变桨距型和大型失速型风力机的结构特点,采用力矩平衡关系,建立了风力发电机组在标称状态下的数学模型,但是忽略了机组的不确定性部分,将其放入到系统的控制器中考虑。由于风力发电系统的复杂性,建立的机理与实际有一定的偏差。Bongers 等开始利用实验数据,通过系统辨识的方法来得到风力机的模型。Bongers 采用系统辨识方法取得了较好的结果,但是对系统辨识方法的尝试并不仅限于此。由于实验测试法建模分为两类:一是被建模系统的某些特征可用系统的可测输出与输入间的关系来描述,即为系统辨识方法 (System Identification), 另一是被建模系统的输出可测,但是其输入却难以定义或难以测量,即为随机建模或者时间序列建模方法 (Stochastic Modeling), 此模型处理大数现象,它所反映的实体对象具有随机性或必然性,反映的是机遇律<sup>[10]</sup>。

近年来,随着风力发电机组设计水平不断提高,在大型风力发电机组,特别是兆瓦级机组的设计中,采用变桨距风轮,桨叶与轮毂不再采用刚性连接,而通过可转动的推力轴承或专门为变距机构设计的联轴器连接。这种风轮可根据风速的变化调整气流对叶片的攻角,当风速超过额定风速后,输出功率可

**基金项目:**教育部博士点专项基金项目 (20060755001); 自治区高校高技术研究重点项目 (XJEDU2004104)

稳定地保持在额定功率上,特别是在大风情况下,风机处于顺桨状态,使桨叶和整机的受力大为改善,这对大型风力发电机组的总体设计十分有利。

Pscad/em tdc 为电力研究控制系统开发的优秀仿真工具,具有模块化、可重载、可封装、面向结构图编程及高度可视化等特点,与编程仿真软件相比应用十分方便。Pscad/em tdc 提供了丰富的风机元件、电机元件模块库供建模仿真使用。

## 1 变桨距风力发电机组的数学模型

### 1.1 风速模型

风速是一个典型的随机变量。若不考虑风的方向性,风速是其空间坐标位置和时间的函数,即  $v = f(x, y, z, t)$ 。在现在的研究中普遍采用的风速模型是四种风速:恒风模型、阵风模型、渐变风模型、随机风模型。

### 1.2 风机模型

风机是风力发电系统中能量转换的首要部件,它用来截获流动空气所具有的动能,并将风机叶片迎风扫掠面积内的一部分动能转换为机械能。它不仅决定了整个风力发电系统的有效输出功率,而且直接影响机组的安全、稳定、可靠运行,是风力发电系统中关键部件之一。

风机输出的机械功率为

$$P_0 = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho S_w v^3 C_p = \frac{\pi}{8} \rho C_w^2 v^3 C_p$$

式中,  $D_w$  为叶片的直径。

风能利用系数  $C_p$  是表征风力机效率的重要参数,它与风速、叶片转速、叶片直径、桨叶节距角均有关系。

$$\lambda = R_w \omega_w / v = \pi R_w n_w / (30v)$$

式中,  $R_w$  为叶片的半径,  $R_w = 0.5 D_w$ ;

$\omega_w$  为叶片旋转的角速度;

$n_w$  为叶片的转速,  $n_w = 30 / (\pi \omega_w)$ 。

$$\text{风机输出的转矩为: } T_0 = \frac{P_0}{\omega_w}$$

在 pscad/em tlc 软件中,以上风机的数学模型都封装在图 1 这个模块中。

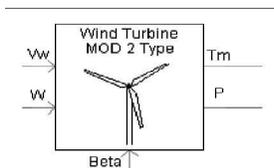


图 1 风机模块

### 1.3 风机变桨距控制部分模型

当风速在额定风速以下时,控制器将叶片节距角置于零度附近,等同于定桨距的风力机,发电机的输入功率根据叶片的气动性能随风速的变化而变化;当风速超过额定风速时,变桨距机构开始工作,调整叶片节距角,将发电机的输入功率限定在额定值附近,特别是在大风情况下,风机处于顺桨状态,使桨叶和整机的受力情况大为改善。因此,变桨距控制系统的调节作用也是非常重要的,用如图 2 模型来完成。

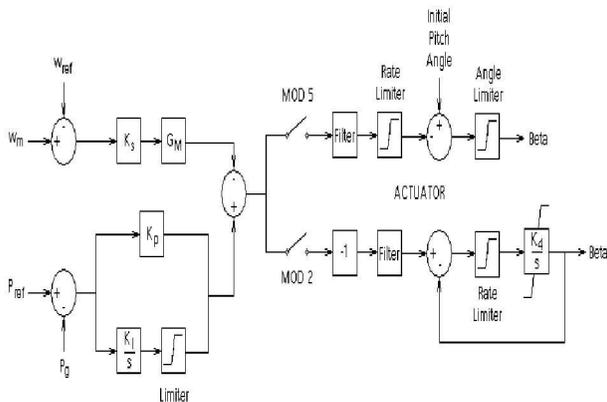


图 2 风机的变桨距模块

$W_{ref}$  表示发电机额定转速,  $W_M$  表示发电机实际转速,  $P_{ref}$  表示发电机额定有功功率,  $P_e$  表示发电机实际有功功率。发电机实际转速和额定转速的差与发

电机实际有功和额定有功差经过积分微分运算再做差之后的信号再进入模式 2 或 5,输出的角度信号接到风机上实现变桨距控制。

### 1.4 发电机模型

同步发电机可以向电网或负载提供无功功率,满足各种不同负载的需要。它的电势频率由电机的极对数和转子转速决定。

$$f = \frac{pn}{60}$$

每相绕组的电势有效值为:  $E_0 = 2\pi f k_f \Phi$

在 Pscad/em tlc 软件中,发电机的数学模型封装在如下模块。

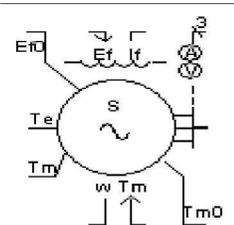


图 3 发电机模块

## 2 变桨距风力发电系统的建模

风力发电系统中的每一部分模型搭建好后,再把它们有机的结合起来就是风力发电系统的模型了,如图 4。

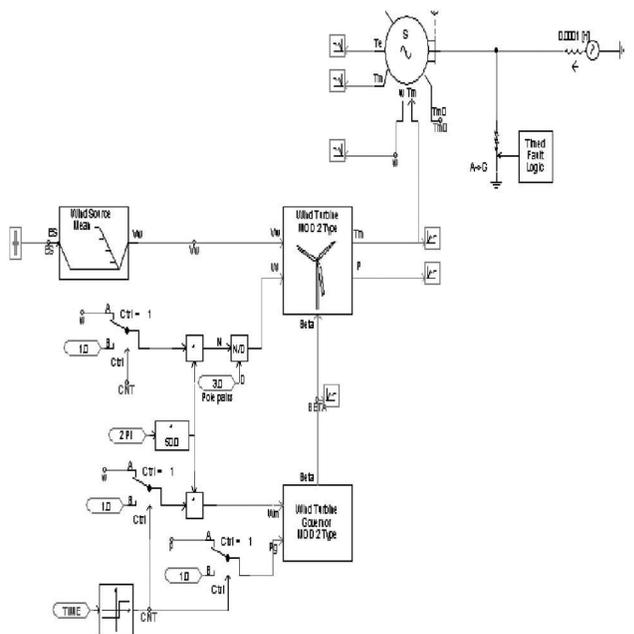


图 4 变桨距风力发电系统的模型

变桨距风力发电系统以其优越的性能越来越受到人们的青睐。风机变桨距控制部分是变桨距风力

发电系统的关键部分,为了使变桨距系统能安全、稳定的运行,必须在变桨距系统实际立机运行前,对其运行特性、控制规律有充分的了解。这种控制规律在建模仿真中其本质就是控制算法,也就是数学模型。在建模中变桨距控制部分采用 PID 算法。各个部分模型在前面已经完成。有机组合时需要一些外围电路形成闭环。

### 3 变桨距风力发电系统的仿真与分析

分别在恒定风速叠加阵风、随机风情况下,仿真风力发电机组的输出有功和无功以及发电机转速的变化。

#### 3.1 在恒定风速叠加阵风时,发电机组仿真的情况

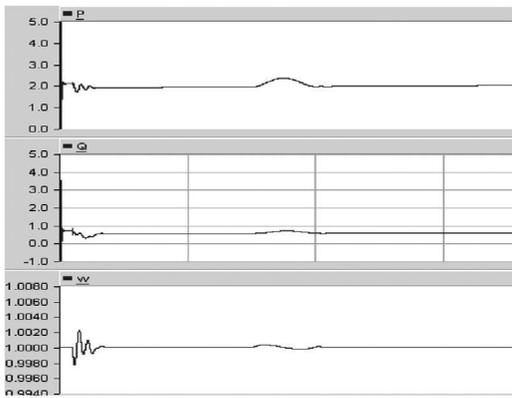


图 5 发电机输出的有功无功转速变化图

发电机开始时有功无功的波动是启动时的自我调整。当风速发生变化时,发电机的转速也发生变化,使得发电机的输出有功和无功也发生变化。变桨距控制部分接收到发电机变化的转速会立刻调节桨距角使发电机的转速稳定,这样发电机的输出有功无功就会很快稳定下来并且变化不大。

#### 3.2 随机风时风电机组仿真的情况

施加随机风时,由于风速的大小是随机变化的,且变化率很大,所以在仿真中,发电机的输出有功和无功都发生了很大变化,输出有功虽然发生变化,但是一直保持在额定功率附近。

## 4 结论

定桨距型风力机,桨叶节距角不可调节,没有闭环的转速控制回路。这种类型的风力机的代表是失速型风力机,在大风速的情况下,它利用失速现象,使

风力机所产生的电能基本保持为常数并且减少桨叶中的气动负荷。

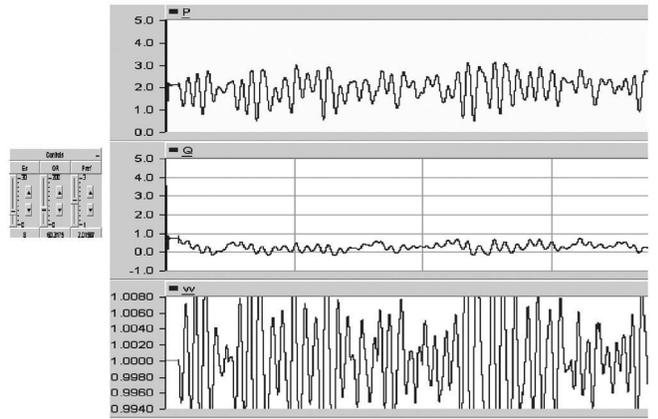


图 6 发电机输出的有功无功转速变化图

而变桨距结构是利用转速、功率的实际值与额定值做差经过 PI 控制器来实现闭环的桨距角的控制。变桨距调节方法的主要优点是可大范围调节转速,使功率系数保持在最佳值,从而最大限度地吸收风能,效率高;能吸收和存储阵风能量,可减少阵风冲击对风力发电机产生的疲劳损坏、机械应力和转矩脉动,延长机组寿命,减小噪声;而且还可控制有功功率和无功功率,改善电能质量。

## 参考文献

- [1] 贺益康,郑康,潘再平.交流励磁变速恒频风电系统运行研究[J].电力系统自动化,2004,28(13):55-59.
- [2] 董萍.风力发电系统的建模、控制及其仿真研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2005,5.
- [3] 李长青,丁立新,等.仿真技术在风力发电系统中的应用[C].中国风能技术论坛,2005,9.
- [4] 齐欢,王小平.系统建模与仿真[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 叶杭冶.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2002,3.
- [6] 易继锴,侯媛彬.智能控制技术[M].北京:北京工业大学出版社,1999,9.
- [7] 王承煦.风力发电实用技术[M].北京:金盾出版社,1995.
- [8] 王春行.液压伺服控制系统[M].北京:机械工业出版社,1981.

### 作者简介:

张尧(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向:变速恒频风力发电机组的研究。

王维庆(1959-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化和风力发电机组的智能控制。

(收稿日期:2009-03-20)