绿色能源与节能

# 基于FAST和Simulink的大型风电机组仿真与性能分析

刘红文，刘春秀，万宇宾，杜佳佳，王 靛，王立鹏

（南车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲 412001）

**摘 要：**叙述了大型风电机组的风轮系统、传动链系统、发电机系统以及控制系统。以5 MW双馈风电机组为研究对象，利用FAST建立风电机组模型，利用Simulink设计控制器，并以定常风工况和IEC湍流风工况进行仿真验证，以此分析大型风电机组的动态性能。结果表明，本文仿真模型正确，可以用于大型风电机组设计仿真。

**关键词：**大型风电机组；建模；动态性能；仿真

**中图分类号：**TM315 **文献标识码：**A **文章编号：**2095-3631(2012)05-0034-04

# Simulation and Performance Analysis of Large-scale Wind Turbine Based on FAST and Simulink

**LIU Hong-wen, LIU Chun-xiu, WAN Yu-bin, DU JIA-jia, WANG Dian, WANG Li-peng**

( CSR Zhuzhou Institute Co.,Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001,China )

**Abstract:** Rotor system, drive chain system, generator system and control system of large-scale wind turbine are described in this paper. Taking a 5 MW doubly fed wind turbine as a research object, the model of wind turbine is established through FAST software and the controller is designed with Simulink. Therefore, the dynamic performance of large-scale wind turbine is analyzed by the simulation results of steady wind conditions and the IEC turbulent wind conditions. The results show that the simulation model is correct, which can provide a simulation model for designing large wind turbine.

**Key words:** large-scale wind turbine; modeling; dynamic performance; simulation

## 0 引言

随着风力发电技术的发展，并网型兆瓦级风电机组得到广泛应用，就目前来说，1.5 MW风电机组已成为市场上最为成熟的机型。但随着国家对海上风力发电的规划，海上风电场的开发逐步提上日程，各整机制造商纷纷开始进军海上风电领域。根据海上风资源特性以及风电场的度电成本指标，海上风电场适合安装大型风电机组，因此，目前逐步开始出现了5~7 MW的大型风电机组。由于风电机组需要运行20年，因此有必要在设计阶段，对风电机组整机进行建模和仿真，并根据仿真结果对机械结构强度进行校核，以确保风电机组安全、可靠运行。本文首先对风电机组系统模型，如风轮系统、传动系统、发电机与变流器系统以及控制系统进行了描述，在此基础上，以5 MW双馈风力发电机组为例，应用美国国家可再生能源实验室所提供的开放式软件——FAST（Fatigue Aerodynamics Structures Turbulence）[1]建立整机模型，并利用Simulink设计了控制器。最后以定常风工况和IEC湍流风工况，对5 MW风电机组进行了仿真与性能分析，以期为大型风电机组的设计提供参考。

**收稿日期：**2012-03-30

**作者简介：**刘红文（1982-），男，硕士，工程师，从事风力发电机组系统研发及整机控制策略的研究工作。

## 1 大型风电机组系统模型

风力发电系统主要由风轮系统、传动系统和发电

系统组成。风能作为外部激励，驱动风轮旋转，从而使风轮获得机械能，再通过传动系统将机械能传递给发电系统，由发电机将机械能转换为电能。风电机组系统模型如图1所示[2]。

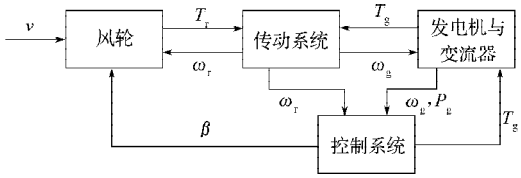


图1 风电机组系统模型

Fig.1 System model of wind turbine

### 1.1 风轮

风轮主要包括叶片、轮毂和变桨执行机构，风轮捕获风能通过叶片实现，因此，风轮的气动功率$P$和气动转矩$T$可通过叶片的叶素理论求得：

$$P=\frac{1}{2}\rho\pi R^2C_p(\beta,\lambda)v^3 \tag{1}$$

$$T=\frac{1}{2}\rho\pi R^3C_T(\beta,\lambda)v^2 \tag{2}$$

式中：$C_P(\beta,\lambda)$和$C_T(\beta,\lambda)$——分别为功率系数和转矩系数，并均为叶尖速比$\lambda$和桨距角$\beta$的非线性函数；$\rho$——空气密度；$R$——风轮半径；$v$——风速。

变桨执行机构可以一阶系统来描述，其传递函数形式为：

$$\frac{\beta}{\beta_{ref}}=\frac{K}{1+\tau_\beta s} \tag{3}$$

式中：$K$——增益；$\tau_\beta$——时间常数；$\beta_{ref}$——给定的桨距角。

### 1.2 传动系统

风电机组传动系统通常可看作是由惯性元件、弹性元件和阻尼元件组成，基本的动力学方程式为：

$$\{M\}\{\ddot{u}\}+\{C\}\{\dot{u}\}+\{K\}\{u\}=\{R\} \tag{4}$$

式中：$\{M\}$——质量矩阵；$\{C\}$——阻尼矩阵；$\{K\}$——刚度矩阵；$\{R\}$——外部输入矩阵；$\{\ddot{u}\}$、$\{\dot{u}\}$、$\{u\}$——分别为位移、速度、加速度阵列。

将传动系统等效为两质量块模型时，可用一阶状态方程描述[2]：

$$\begin{bmatrix}\dot{\omega}_r(t)\\ \dot{\omega}_g(t)\\ \dot{\theta}_\Delta(t)\end{bmatrix}=A\begin{bmatrix}\omega_r(t)\\ \omega_g(t)\\ \theta_\Delta(t)\end{bmatrix}+B\begin{bmatrix}T_r(t)\\ T_g(t)\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：$\omega_r(t)$——风轮转速；$\omega_g(t)$——发电机转速；$\theta_\Delta(t)$——扭转角度；$T_r(t)$——风轮转矩；$T_g(t)$——发电机转矩。

系数矩阵$A$和$B$如式(6)所示。

$$A=\begin{bmatrix}-\frac{B_{dt}-B_r}{J_r} & \frac{B_{dt}}{N_gJ_r} & \frac{K_{dt}}{J_r}\\ \frac{\eta B_{dt}}{N_gJ_g} & \frac{-\eta B_{dt}}{N_g^2J_g}-\frac{B_g}{J_g} & \frac{\eta K_{dt}}{N_gJ_g}\\ 1 & \frac{-1}{N_g} & 0\end{bmatrix};\ B=\begin{bmatrix}\frac{1}{J_r} & 0\\ 0 & \frac{-1}{J_g}\\ 0 & 0\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：$B_{dt}$——传动系统总阻尼；$B_r$——风轮转子阻尼；$B_g$——发电机阻尼；$J_r$——风轮的转动惯量；$J_g$——发电机的转动惯量；$\eta$——传动效率；$N_g$——齿轮箱增速比；$K_{dt}$——传动链的扭转刚度。

### 1.3 发电机与变流器系统

对于双馈风力发电机组，发电机定子直接与电网连接，转子与变流器连接，变流器根据发电机转速变化，对励磁频率、励磁电流的幅值和相位进行调节，使发电机实现恒频输出、有功和无功功率解耦。由于变流器的动态响应比风轮、传动系统要快得多，因此忽略其模型，并直接将发电机看作转矩源[3]。

$$T_g=T_{g,ref} \tag{7}$$

式中：$T_{g,ref}$——给定的发电机转矩(由控制系统根据控制策略给定)。

### 1.4 控制系统

控制系统是风电机组变桨变速运行的核心部件，其包含的控制策略如图2所示。本文将切入风速至额定风速区域定义为控制区域1，将额定风速以上的区域定义为控制区域2，将切出风速以上定义为控制区域3。

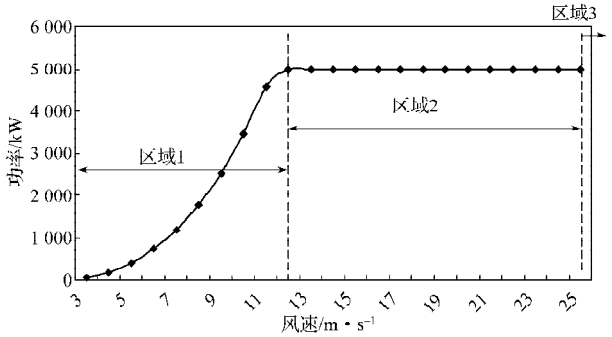


图2 功率曲线

Fig.2 Power curve

在控制区域1：风电机组维持最佳叶尖速比运行，即维持最大$C_p$，使风电机组尽可能多地从风中捕获能量。在此阶段，发电机的转矩和转速成二次关系[4]，即：

$$T_g=k\omega_g^2 \tag{8}$$

式中：$k$——最优模态增益，其数学表达式如式(9)所

示。

$$k=\frac{1}{2}\rho\pi R^5 C_{\text{p_opt}}\frac{1}{\lambda_{\text{opt}}^3 N_{\text{g}}^3} \tag{9}$$

式中：$C_{\text{p_opt}}$——风电机组设计的最优功率系数；$\lambda_{\text{opt}}$——设计的最优叶尖速比。

在控制区域2：风电机组需要维持额定功率运行，为了达到该控制目的，必须采用变桨控制，其工作原理为：发电机参考转速与测量到的发电机转速相减得到转速误差，该转速误差再通过PI控制器调节，得到参考桨距角。其控制框图如图3所示。

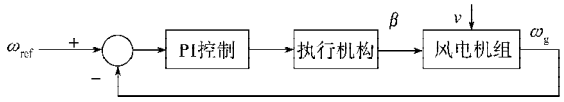


图3 变桨控制框图

Fig.3 Control block diagram of pitch control

PI控制器的传递函数形式为：

$$G(s)=K_{\text{p}}+\frac{K_{\text{i}}}{s} \tag{10}$$

式中：$K_{\text{p}}$——比例增益；$K_{\text{i}}$——积分增益。

## 2 仿真与分析

本文采用文献[5]中的参数，对5 MW双馈风电机组进行了仿真。采用的仿真软件为FAST和Matlab/Simulink。FAST由NREL（National Renewable Energy Laboratory）开发，是一款复杂的气弹仿真软件，可以根据风轮、传动链、发电机等数学模型，为两叶片/三叶片风电机组建立非线性气弹模型，进行载荷计算。同时，FAST还提供了与其他软件相结合的接口，如Matlab/Simulink。本文采用FAST建立风电机组的非线性气弹模型，采用Matlab/Simulink实现风电机组的控制策略，其仿真模型如图4所示。

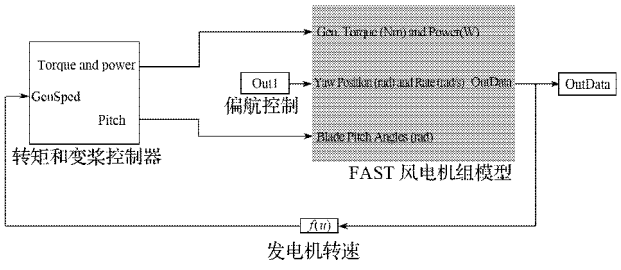


图4 整机仿真模型

Fig.4 Simulation model of the whole wind turbine

（1）定常风工况

分别以额定风速以下（$v$=8 m/s）和额定风速以上（$v$=15 m/s）的定常风作为仿真工况，仿真结果如图5和图6所示。

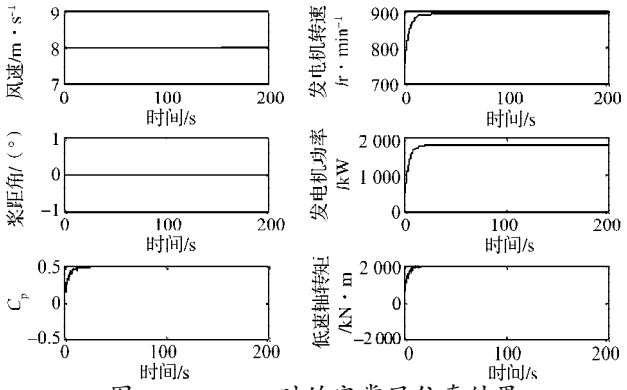


图5 $v$=8 m/s时的定常风仿真结果

Fig.5 Simulation results of steady wind condition ($v$=8 m/s)

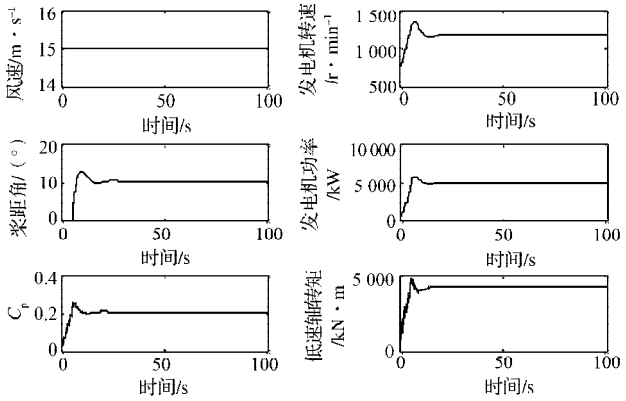


图6 $v$=15 m/s时的定常风仿真结果

Fig.6 Simulation results of steady wind condition($v$=15 m/s)

根据理论计算，当风速为8 m/s时，桨距角为0°，最优$C_{\text{p}}$为0.482，发电机转速为888.132 r/min；当风速为15 m/s时，桨距角为10.45°，发电机转速为1 173.7 r/min。

图5表明，在额定风速以下时，风电机组桨距角（0°）保持不变，经过一个短时间的暂态过程，风电机组能维持最佳叶尖速比运行，$C_{\text{p}}$约为0.481 67，发电机转速约为891.48 r/min，与理论计算结果比较吻合。图6表明，在额定风速以上时，风电机组通过变桨控制，能保持风电机组以额定功率运行，且桨距角约为10.448°，发电机转速为1 178 r/min，这些数据与理论分析的结果偏差也很小。

上述分析表明，在定常风工况下建立的风电机组模型和控制系统是正确的。

（2）湍流风工况

以$v$=14 m/s的IEC湍流风作为复杂工况，进一步测试风电机组模型和控制系统的性能。其结果如图7～图10所示。

图7结果表明，尽管风速频繁波动，但风电机组在控制系统的控制下，桨距角跟随风速变化而变化。另外，当风速在额定值以上波动时，发电机转速和功率均在额定转速和额定功率附近小范围波动，这是因为风速变化太快，而变桨控制器是根据转速误差和经PI控

制后得到桨距角，桨距角执行器有一个执行时间，因此会出现延时，导致上述波动情况。

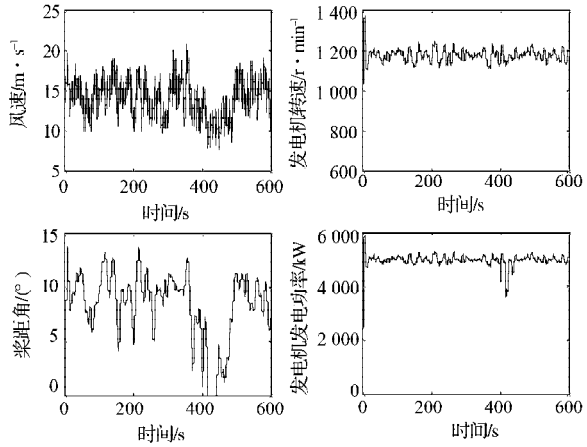


图7 转速、功率及桨距角变化

Fig.7 Change of generator speed, power and pitch

图8和图9为叶片1载荷情况。风电机组运行时，叶片会在旋转平面旋转，叶片面内载荷会随着叶片所处的位置呈周期性变化。面外载荷与传动链同方向，其值随着变桨呈不规则波动。图8和图9仿真结果刚好与理论分析一致。

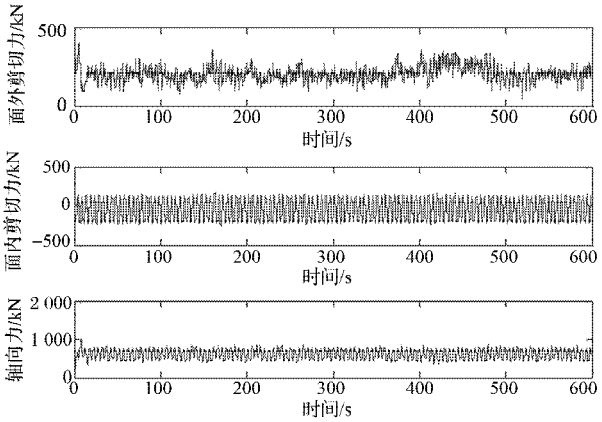


图8 叶片1的受力变化

Fig.8 Force change of blade 1

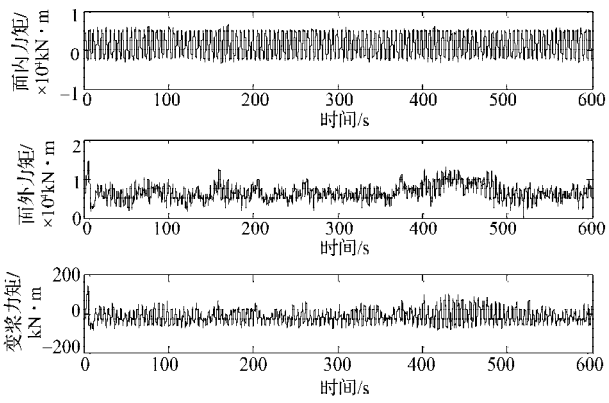


图9 叶片1的力矩变化

Fig.9 Torque change of blade 1

图10为塔架的受力情况，前后方向的最大剪切力为498.312 3 kN，最小剪切力为300.337 4 kN；左右方向的最大剪切力为31.053 8 kN，最小剪切力为−27.587 1 kN；轴向的最大剪切力为−6 840 kN，最小剪切力为−6 903 kN，这些载荷信息可以为塔架强度校核提供数据参考。

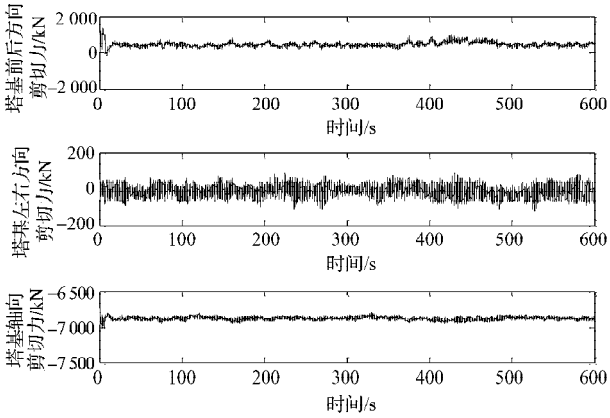


图10 塔架受力变化

Fig.10 Force change of tower

通过定常风工况和湍流风工况的仿真，本文对风电机组的关键参数如$C_p$、发电机组转速、桨距角、发电机功率进行了比较分析。其结果表明：采用FAST建立风电机组气弹模型和Simulink编制控制策略的整机模型是正确可行的。因此，进行大型风电机组概念设计时，可以采用本文的模型和控制策略对整机性能进行仿真；同时，该仿真模型可以输出风电机组零部件，如叶片、塔架等载荷信息，还可以在风电机组设计阶段为关键零部件的强度校核提供数据参考。

## 3 结语

本文首先描述了大型风电机组各组成系统的模型，在此基础上，利用FAST软件建立了整机模型，利用Simulink设计和搭建了控制器。最后对定常风和IEC湍流风工况进行了仿真，以验证系统模型的正确性。结果表明：仿真模型正确，仿真结果与理论计算较为吻合，可以作为大型风电机组的整机仿真模型，其输出的（零部件）载荷情况为结构强度校核提供了有力支持。

**参考文献：**

[1] Jonkman J M, Buhl J R, Marshall L. FAST User's Guide[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2005.

[2] Pisu P, Ayalew B. Robust Fault Diagnosis for a Horizontal Axis Wind Turbine[C]//18th IFAC World Congress,2011:7055−7060.

[3] Prats M, Carrasco J M, Galvan E, et al. Improving Transition between Power Optimization and Power Limitation of Variable Speed, Variable Pitch Wind Turbines using Fuzzy Control Techniques [C]//26th Annual Conference of the IEEE,2000:1497−1502.

[4] Tony B. 风能技术[M]. 武鑫，译. 北京：科学出版社，2007.

[5] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5 MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2009.