

基于 MATLAB 的垂直轴风力机仿真研究

杨 瑞^{1,2}, 李金龙¹, 夏巍巍¹, 李丹丹¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省风力机工程技术研究中心, 兰州 730050)

摘 要:为了描述垂直轴风力机的输出特性,对垂直轴风力机运行风况、传动系统以及转速控制系统在 MATLAB/SIMULINK 模块中进行建模。以 5 kW 垂直轴风力机为例,运用双向多流管模型得到该风力机不同叶尖速比下的功率系数,并将数据导入 MATLAB 并运用曲线拟合工具箱得到该 5 kW 垂直轴风力机的风轮数学模型,从而建立 SIMULINK 模型。将风轮模型与其它模型组成风力机模型,给定风力机的一些运行参数,得到了可供分析的数据。通过仿真研究表明, MATLAB/SIMULINK 可以较好地模拟风力机从风轮到传动系统的整体性能,为今后研究垂直轴风力机的整体性能提供参考依据。

关键词:风力机;垂直轴;性能研究;仿真;MATLAB

中图分类号:TK83

文献标志码:A

引 言

由于能源危机的日益严重,风力发电技术越来越被人们所重视。风力机可分为水平轴风力机与垂直轴风力机。由于垂直轴风力机的电机、制动系统、齿轮箱等主要设备均可以安装在地面上,并且垂直轴风力机不用偏航系统可以随时对风,因此垂直轴风力机相比于水平轴风力机有很大的优势。为了对垂直轴风力机的性能进行预测,通过风力机的运行风况、风轮系统、传动系统和转速控制系统的数学模型,可以在 MATLAB/SIMULINK 模块总进行仿真建模^[1-4],有利于分析风力机的总体性能。风力机系统是一个复杂的机电系统,运行工况复杂。随着科学技术的进步, MATLAB 仿真软件逐渐被运用到风力机模型的建立中。通过对数学模型的分析,就可以将风力机复杂的系统通过 MATLAB 软件进行建模仿真^[5],对于风力机的整体研究有很大的帮助。本文通过分析 5 kW 垂直轴风力机的风轮特性,建立风轮模型,并与其他模型组成风力机模型,分析该风力机的整体输出性能变化。

1 风况模型仿真

垂直轴风力机的性能预测中,风速是否可以较真实地反应风场风况,直接影响到其预测结果,因此,首先需要对真实风况进行模拟仿真。由于真实风况中的风速、风向的不断变化,其变化是随机的,为了使风况的易变性和不确定性得到相对准确的描述,本文将风速模型分为以下四个分量模型^[6-7]:基本风、阵风、阶跃风和随机风。其公式表达为:

$$V_w = V_{WB} + V_{WC} + V_{WS} + V_{WN} \quad (1)$$

式中: V_{WB} 为基本风分量,描述的是风速模型的平均风速; V_{WC} 为阵风分量,描述的是风速突然变化的特性,数学模型为

$$V_{WC} = \begin{cases} 0 & t < t_{1C} \text{ or } t > t_{1C} + t_{2C} \\ \left(\frac{V_{Cmax}}{2}\right) \left\{1 - \cos 2\pi \left[\left(\frac{t}{t_{2C}}\right) - \left(\frac{t_{1C}}{t_{2C}}\right)\right]\right\} & t_{1C} \leq t \leq t_{1C} + t_{2C} \end{cases} \quad (2)$$

V_{WS} 为阶跃风分量,描述的是风速的渐变特性,数学模型为

收稿日期: 2014-05-14

基金项目:国家自然科学基金项目(111620009);教育部博士点基金项目(1106ZBA004)

作者简介:杨 瑞(1970-),男,河南夏邑人,副教授,博士,主要从事风力机方面的研究,(E-mail)562204233@qq.com

$$\begin{cases} 0 & t < t_{1S} \text{ or } t > t_{2S} + t_S \\ V_{Smax} \left\{ 1 - \frac{(t - t_{2S})}{(t_{1S} - t_{2S})} \right\} & t_{1S} \leq t \leq t_{2S} \\ V_{Smax} & t_{1S} \leq t \leq t_{2S} + t_S \end{cases} \quad (3)$$

V_{WN} 为随机风分量,用白噪声进行表达。

根据式(1) - (3)建立风速 SIMULINK 仿真模型,如图 1 所示。

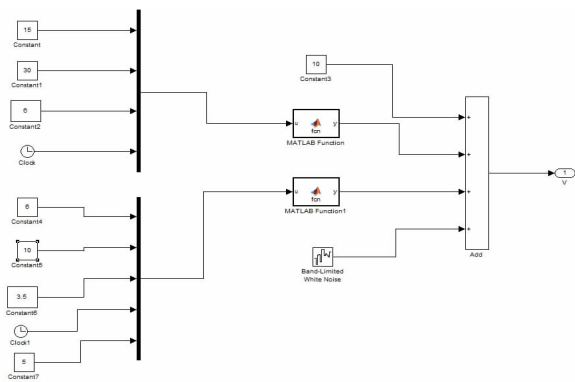


图 1 风速的 SIMULINK 仿真模型

设置基本风风速为 10 m/s;阶跃风的启动、终止和保持时间分别为 6 s、10 s 和 5 s;阶跃风的峰值风速为 3.5 m/s;阵风起始、持续时间分别为 15 s 和 30 s,阵风的峰值风速为 6 m/s;随机风白噪声模块的采样时间为 0.1 s。

2 风轮模型仿真

2.1 垂直轴风力机空气动力学模型

垂直轴风力机气动性能^[8-9]计算方法采用双向多流管模型(DMS)^[10-13]。

本文以额定来流风速为 $V_\infty = 10 \text{ m/s}$,空气密度为 $\rho = 1.225 \text{ m/s}$ 的环境条件,设计一台额定功率为 $P = 5 \text{ kW}$,风能利用系数为 $C_p = 0.4$ 的垂直轴风力机。

风轮扫略面积 S 为:

$$S = \frac{P}{0.5\rho V_\infty^3 C_p} = \frac{5 \times 10^3}{0.5 \times 1.225 \times 10^3 \times 0.4} = 21 \text{ m}^2$$

本文垂直轴风力机采用 H 型风轮设计,为了在一定转速下保证叶尖速比,将叶片的直径取为 5 m、叶片的高度为 5 m,那么叶片的高径比(叶片高度与叶片直径的比值)为 1。

(1) 采用 NACA0018 翼型;

(2) 设计叶尖速比为 3.8。可以计算出风轮的额定工作转速为:

$$n = \frac{60 \cdot V_\infty \cdot \lambda}{\pi D} = \frac{60 \times 10 \times 3.8}{3.14 \times 5} = 146 \text{ rpm}$$

(3) 选取叶片的实度为 0.21,取叶片数量 $Nb = 3$,翼型的弦长为 0.35 m;

(4) 考虑风轮中轴对风力机流场的影响,选取叶片转子的直径为 0.35 m;

(5) 由风轮直径为 5 m,可以计算出雷诺数为:

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1.225 \times 10 \times 5}{1.8421 \times 10^{-5}} = 3.325 \times 10^6$$

2.2 垂直轴风力机风轮模型

将设计的 5 kW 垂直轴风力机数据代入 MATLAB 编写的双向多流管模型中^[14],可以得到风力机的功率系数与叶尖速比的关系(表 1)。

表 1 不同叶尖速比下对应的功率系数

叶尖速比	功率系数	叶尖速比	功率系数
0.5	0.000 175	3.5	0.272 187
1	-0.000 14	4	0.326 031
1.5	-0.008 3	4.5	0.296 144
2	0.007 78	5	0.225 221
2.5	0.044 101	5.5	0.126 309
3	0.140 304	6	0.003 813

运用 MATLAB 曲线拟合工具箱,将风力机功率系数进行拟合,如图 2 所示。

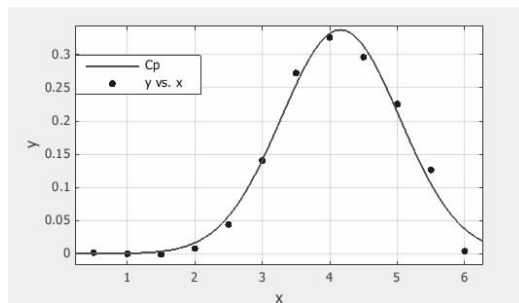


图 2 风力机功率系数拟合曲线

通过风力机功率系数的变化曲线,可以利用高斯逼近拟合功率系数与叶尖速比的方程:

$$C_p = f(\lambda) = 0.3373 * \exp\left(-\left(\frac{\lambda - 4.159}{1.242}\right)^2\right) \quad (4)$$

由此进一步可以得出输出功率的公式为:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot f(\lambda) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \cdot f(\lambda) \quad (5)$$

以及扭矩公式:

$$Tr = \frac{P}{\omega} = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 v^2 \cdot f(\lambda) \quad (6)$$

在 MATLAB 中建立风轮模型,如图 3 所示。

3 传动系统仿真

风力机的传动系统由低速轴、齿轮箱、高速轴以及两端的风轮转子和发电机转子构成。采用质量块模型,将风轮和发电机等效到一端,用以简化传动系统的建模^[15]。

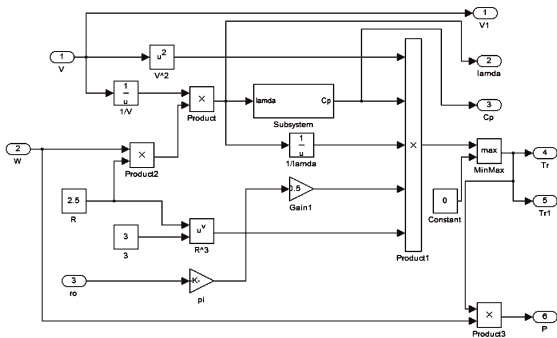


图3 风轮的 SIMULINK 仿真模型

风轮的运动方程为:

$$J_r \frac{d\Omega}{dt} = T_{wt} - T_D - kT_m \quad (7)$$

式中, J_r 为风轮转动惯量,单位是 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; Ω 是风轮转动角速度,单位是 rad/s ; T_{wt} 是风轮的机械转矩,单位是 $\text{N}\cdot\text{m}$; T_D 是能量传递装置中的全部阻力矩,假设均集中于风轮处,单位是 $\text{N}\cdot\text{m}$; k 为此轮传动比; T_m 为高速轴上的扭矩,单位是 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

发电机的运动方程为:

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_m - T_e \quad (8)$$

式中, J_g 为发电机转动惯量,单位是 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; ω_g 为发电机的机械角速度,单位是 rad/s ; T_m 为高速轴上的扭矩,单位是 $\text{N}\cdot\text{m}$; T_e 为发电机上的反扭矩,单位是 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

将式(7)与式(8)结合,令 $T_D = 0$, 可以得到传动系统的一质量块数学模型:

$$T_{wt} - kT_e = (J_r + k^2J_g) \frac{d\Omega}{dt} \quad (9)$$

根据式(9)在 MATLAB 中建立一质量块的传动模型,如图4所示。

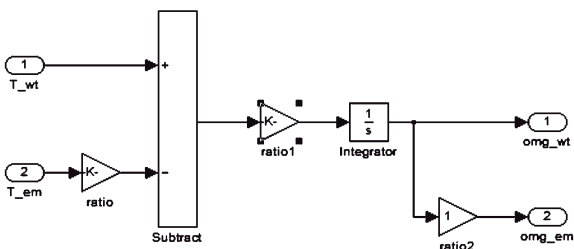


图4 一质量块风力机传动系统仿真模型

4 转速控制模型

采用 PI 控制风轮的转速,转速模型如图5所示。

5 风力机仿真模型

对前面建立的仿真模型,如风速模型、风轮模型、传

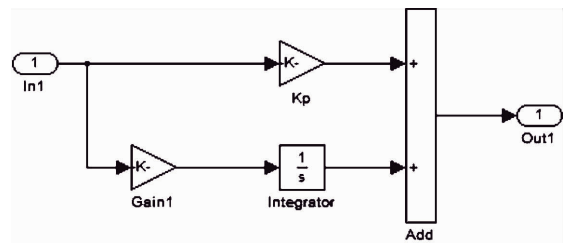


图5 转速控制系统仿真模型

动系统模型以及转速控制模型,将它们组合起来,可以得到风力机的仿真模型。其整体仿真模型如图6所示。

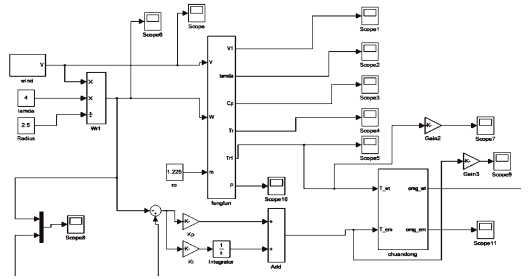


图6 风力机整机仿真模型

6 MATLAB 仿真结果

对于 5 kW 垂直轴风力机,设定其主要参数:风轮转动惯量 $J_r = 500 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,发电机转动惯量 $J_g = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,齿轮传动比 $k = 24$,比例系数 $k_p = 100\ 000$,积分系数 $k_i = 200$,仿真时间 200 s。通过调节比例系数及积分系数对该风力机进行仿真研究,结果如图7-图11所示。

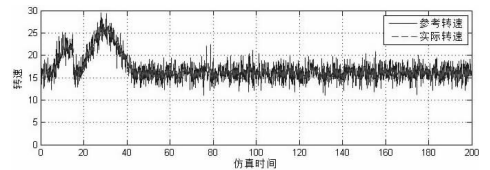


图7 风轮实际转速与参考转速仿真结果图 ($k_p = 100\ 000, k_i = 200$)

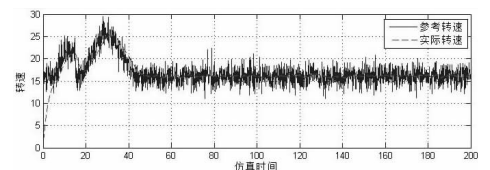


图8 风轮实际转速与参考转速仿真结果图 ($k_p = 10\ 000, k_i = 20$)

图7中显示了转速控制器很好地跟踪了速度的变化;图8中转速控制器并不能很好地跟踪速度的变化,由此可以看出在 k_p, k_i 较大的情况下,转速控制器反应较快,能够很好地跟踪速度的变化;图9中发电机转矩波动较大;图10中发电机波动较小,因此发现在 k_p, k_i

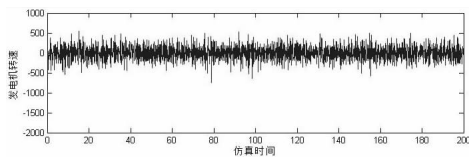


图 9 发电机转矩仿真结果图
($k_p = 100\ 000$, $k_i = 200$)

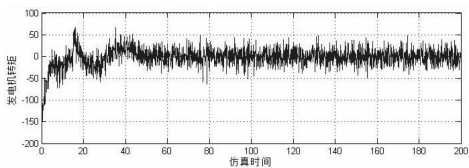


图 10 发电机转矩仿真结果图
($k_p = 10\ 000$, $k_i = 20$)

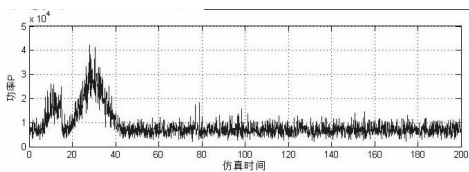


图 11 风轮输出功率仿真结果图

较大的情况下,发电机转矩波动大。综上所述,可以知道转速控制器的 k_p 、 k_i 参数调节不能一味增大或减小;图 11 显示了在不考虑失速的情况下风轮输出功率变化,从中可以看出输出功率能够满足设计要求 5 kW。

7 结束语

在文献[16]中主要对双馈异步发电机的风速、风轮以及传动系统的数学模型进行了细致的分析和全面的总结,而本文应用了 MATLAB 的曲线拟合工具箱建立了 5 kW 垂直风力机风轮的数学模型,并结合文献[16]中的传动模型以及风速模型对该 5 kW 垂直轴风力机的输出特性进行分析。从图 7 - 图 9 可以看出 MATLAB 软件能够较好地模拟风力机的输出特性,风轮转速与发电机转速在一定范围内变化,在风速较稳定的情况下,风轮转速可以稳定在 15 rad/s - 20 rad/s 之间,通过调节比例系数及积分系数可以使发电机转速在较小的范围内波动,为今后的研究提供依据。

参考文献:

- [1] 叶杭治.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 薛定宇,陈阳泉.系统仿真技术与应用[M].北京:清华

大学出版社,2002.

- [3] 李颖,朱伯立,张威.SIMULINK 动态系统建模与仿真基础[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [4] Abdin E S, Xu W.Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine - induction generator unit [J].IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(1): 91-96.
- [5] 王沫然.MATLAB 与科学计算[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [6] 孙建锋.风电场建模和仿真研究[D].北京:清华大学,2004.
- [7] 向恺.基于 Matlab 的风力发电系统仿真研究[D].北京:华北电力大学,2007.
- [8] 戴庚.直叶片垂直轴风力机空气动力学性能研究[D].杭州:浙江工业大学,2010.
- [9] 韩非非,席德科.达里厄型垂直轴风力机风轮设计及性能数值计算[J].太阳能学报,2011,32(10):1533-1537.
- [10] Paraschivou I.Double - Multiple streamtube model for darrieus wind turbines[R].Second DOE/NASA Wind Turbines Dynamics Workshop,NASA CP-2185,1981.
- [11] Paraschivou I.Aerodynamic loads and performance of the darrieus rotor[J].AIAA Journal of Energy,1982(6): 406-412.
- [12] Strickland J H.The darrieus turbine:a performance prediction model using multiple streamtubes[R].Technical Report SAND75-0431,1975.
- [13] Templin R J.Aerodynamic performance theory for the NRC vertical axis wind turbine[R].NRC Canada TR, 1974.
- [14] Yang Rui,Li Jinlong,Xia Weiwei,et al.Rotor design and performance study of a Vertical-Axis wind turbine based on DMS[J].Applied Mechanics and Materials, 2013(35):412-422.
- [15] 金鑫,杜静,何玉林,等.仿真技术在风力机总体性能分析中的应用[J].系统仿真学报,2007,19(2): 2823-2830.
- [16] 杨煜,何炎平,李勇刚.基于 SIMULINK/Matlab 的变速风力发电机组在低于额定风速时的仿真研究[J].华东电力,2009,37(5):816-818.