

文章编号: 1006 - 4729(2011) 05 - 0499 - 04

# 风力发电机特性的模拟系统设计及仿真

易洪京<sup>1</sup>, 罗扬帆<sup>2</sup>, 高亮<sup>2</sup>

(1. 江西中电投新能源发电有限公司, 江西 南昌 330038;  
2. 上海电力学院 电力与自动化工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 采用控制直流电动机电枢绕组电流来实现风力机转矩特性的模拟, 建立风力机模拟硬件平台以满足风力发电研究的需要. 对风速变化及机组转速变化两种典型运行条件下的风力机运行特性进行了模拟实验, 模拟结果与理论分析数据一致. 基于算法的风力机特性模拟可应用于风力发电技术的实验室研究.

**关键词:** 风力发电机; 直流电动机; 特性模拟  
**中图分类号:** TM614      **文献标志码:** A

## Simulation and Design of Wind Turbine's Characteristics

YI Hong-jing<sup>1</sup>, LUO Yang-fan<sup>2</sup>, GAO Liang<sup>2</sup>

(1. Jiangxi CPI New Energy Power Co. Ltd., Nanchang 330038, China;  
2. School of Electric Power and Automation Engineering,  
Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The simulation of the characteristic of wind turbine speed-torque by controlling armature current of DC motor is introduced, which is applied in wind turbine simulation hardware platform. Considering wind variation and rotor speed changing, wind turbine operation characteristic is demonstrated on the platform. A comparison between theoretical calculation and simulation data verifies the correctness of the proposed approach.

**Key words:** wind turbine generator; DC motor; characteristic simulation

实验室的试验和研究对风力发电技术的发展起着重要的引导作用, 随着研究的不断深入, 更多的新技术和新理论将在实验室里被孕育和验证. 但是由于条件的限制, 大多数实验室不具备风场环境或风力机, 这为风力发电技术的实验研究带来了很大的困难. 如果有风力机特性模拟系统, 就可以在实验室进行风力发电的初期实验研究, 风速可以随意设定, 还可以模拟不同特性的风力机, 从而缩短研发周期和减少实验研究的费用. 因此,

探讨在实验室条件下如何模拟风力机特性, 是深入研究风力发电技术的前提. 它对风力发电机技术的试验、应用、推广具有重要意义, 可以带来明显的经济效益和社会效益.

在实验室运行时, 应将交流励磁双馈发电机与直流电动机相连, 作为直流电动机的负载, 而直流电动机可以在风力机模拟控制系统的控制下模拟风力机的运行<sup>[1]</sup>. 本文采用 Matlab 仿真对其进行模拟和分析.

收稿日期: 2011 - 07 - 11( 特约稿)

通讯作者简介: 易洪京(1964 - ) 男, 本科, 高级工程师, 总工程师, 江西宜春人. 主要研究方向为风力发电技术及工程应用. E-mail: jkyhj@163.com.

# 1 风力发电机及直流电机的功率和转矩特性

## 1.1 风力机的功率和转矩特性

风轮吸收的风能可以表示为:

$$P = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3 \quad (1)$$

式中:  $P$ ——风轮输出的功率;

$C_p$ ——风轮的功率系数;

$\rho$ ——空气密度;

$V$ ——风速;

$A$ ——风轮扫掠面积  $A = \pi R^2$ .

故式(1)又可表示为:

$$P = \frac{1}{2} C_p \pi R^2 A \rho V^3 \quad (2)$$

式中:  $R$ ——风轮半径.

而  $C_p$  又与叶尖速比  $\lambda$  和叶片节距角  $\beta$  有关,则有:

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (3)$$

式中:  $\omega$ ——风力机的角速度  $\omega = 2\pi n/60$  ( $n$  为风力机转速).

因此,式(3)又可以表示为:

$$\lambda = \frac{2\pi n R}{60V} \quad (4)$$

根据不同的风速,将风力机功率-转速曲线簇上最大功率点连起来就可以构成最佳功率曲线.

定桨距风力机的特点如下:

(1) 不超过额定风速时,对应某一固定的转速,风速越大,风力机输出的机械功率也越大;

(2) 当风速固定时,风力机在某一转速时可输出最大功率,转速较小或较大时输出功率都会降低,这个转速称为最佳转速;

(3) 最佳转速是对应于某一确定风速的,当风速发生变化时,最佳转速也会随之改变.

由  $T = P/\omega$  和  $\omega = V\lambda/R$ ,易得到转矩风力机转矩:

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi C_T V^2 R^3 \quad (5)$$

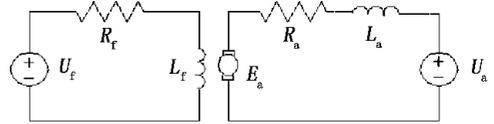
式中:  $C_T$ ——风力机转矩系数,  $C_T = C_p/\lambda$ ,也是叶尖速比  $\lambda$  和叶片节距角  $\beta$  的函数.

由式(5)知,当风力机的叶片半径和  $C_T$  已知时,风力机转矩是可以计算得到的.类似于  $C_p$  与

$\lambda$  的关系,有唯一一个对应  $C_T$  最大的叶尖速比<sup>[2]</sup>.对于不同的风速,同理可以得到风力机的转矩-转速曲线簇,将这些曲线的最大转矩连接起来就可以得到最佳转矩曲线.

## 1.2 他励式直流电动机模型

他励式直流电动机模型见图1.



注:  $R_a$   $L_a$   $R_f$   $L_f$ ——直流电动机电枢绕组和励磁绕组的电阻、电感;  $U_a$   $I_a$ ——电枢绕组端电压和电流;  $U_f$   $I_f$ ——励磁绕组端电压和电流;  $E_a$ ——电枢绕组的反电势.

图1 他励式直流电动机模型

图1中各变量的关系可以表示为:

$$T_e = C_t \phi I_a \quad (6)$$

$$E_a = C_e \phi n \quad (7)$$

$$U_a = I_a R_a + E_a \quad (8)$$

式中:  $C_e$ ,  $C_t$ ——电动势常数和转矩常数,  $C_t = 9.55 C_e$ ;

$\phi$ ——直流电动机的主磁通;

$n$ ——直流电动机转速;

$T_e$ ——电磁转矩.

在忽略各种损耗的情况下,认为直流电动机的输出机械功率为其电磁功率,故有:

$$P_{do} = T\omega = \frac{C_t \phi (U_a - C_e \phi n) \omega}{R_a} \quad (9)$$

将  $\omega = 2\pi n/60$  代入式(9)得到:

$$P_{do} = \frac{C_t \phi (U_a - C_e \phi n) 2\pi n}{60 R_a} \quad (10)$$

忽略各种损耗,直流电动机电磁转矩即为其输出机械转矩,即:

$$T_{de} = T_e = \frac{(U_a - C_e \phi n) C_t \phi}{R_a} \quad (11)$$

而直流电动机模型简单,风力机和直流电动机的转矩(功率)特性具有较大的相似性,电枢电压  $U_a$  对于直流电动机输出转矩(功率)的作用相当于风速  $V$  对于风力机输出转矩(功率)的作用<sup>[3]</sup>.故最简单的风力机特性模拟方法就是改变直流电动机的  $U_a$  来模拟  $V$  的变化.

由  $C_t = 9.55 C_e$  可知,若  $C_t \phi$  已知,则  $T_e$  仅为  $I_a$  的函数,即调节  $I_a$  就可以调节直流电动机转

矩.相反,若已知  $T_e$  和  $C_t\phi$ ,则可以求出  $I_a$ .对于特定的风力机在特定风速下,其转矩-转速关系是一定的,对应每个转速  $n$ ,由风力机的转矩-转速函数得出相应的  $T$ .

因此,用直流电动机模拟风力机的基本思路为:测出直流电动机的角速度  $\omega$ ,利用  $n = 60\omega/2\pi$  得出直流电动机的转速  $n$ ,由风力机的输出转矩公式得出此转速下的输出转矩  $T$ ,由式(8)得出直流电动机输出转矩为  $T$  时的电枢电流  $I_a$ ,再进一步得到  $U_a$ .由此,可以用控制直流电动机电枢电压的方法模拟出风力机的转矩-转速曲线.其主要算法如图2所示.

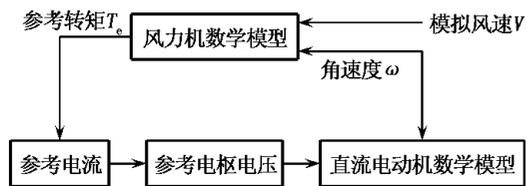


图2 模拟风力机主要算法

根据式(5)若已知空气密度和叶轮半径,在稳定的风速下,  $T$  只与  $C_T$  有关,而  $C_T$  为叶尖速比  $\lambda$  与叶片节距角  $\beta$  的函数.

$$C_T = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \quad (12)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (13)$$

式中:  $C_1 = 0.5176$ ;  $C_2 = 116$ ;  $C_3 = 0.4$ ;  $C_4 = 5$ ;  $C_5 = 21$ ;  $C_6 = 0.0068$ .

也可以采用  $\beta = 0$  的典型曲线,此时  $\lambda_{opt} = 8.1$ .

## 2 风力发电机模拟系统

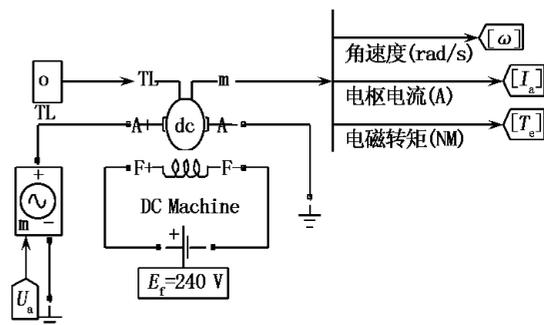
### 2.1 主电路模型

直流电动机模型如图3所示.

三相交流电源通过整流电路变为直流电压.整流后经 LC 低通滤波器,再通过 BUCK 降压斩波电路连接至直流电动机电枢绕组.

降压斩波电路如图4所示,有一个全控型器件 IGBT,其控制开关的周期  $T$  不变,通过调节开关导通点空比来改变电枢电路.当 IGBT 关断时,  $I_{dc1}$  为零,负载侧有较大的电感;在 IGBT 关断时,释放能量,续流二极管为  $I_{dc}$  提供通道,仍为通态.

本文将在仿真中测量  $I_{dc1}$  和  $I_{dc}$  这两个值.



注:  $U_a$  一直流电动机的电枢电压,通过直流斩波控制;  $\omega$  一输出直流电动机的转速;  $I_a$  一直流电动机电枢电流;  $T_e$  一直流电动机电磁转矩; 电压源电压为 150 V; 频率为 50 Hz.

图3 直流电动机模型

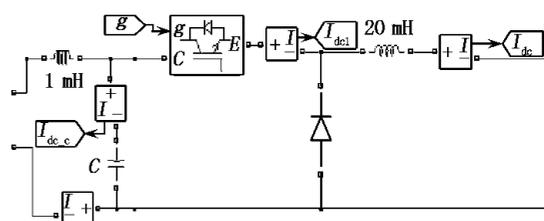


图4 BUCK 降压斩波电路

### 2.2 控制电路部分

可以由直流电动机的角速度得出其转速.直流电机的转速  $\omega$  通过乘法器得到电枢转速  $n = 60\omega/2\pi$ ,并通过显示模块得到直流电动机转速  $n$  和电磁力矩  $T_e$  的关系.

用直流电动机转速模拟风力机的转速,使转速等于风力机的转速,且由信号源产生稳定的风速,再由角速度计算叶尖速,从而得到叶尖速比<sup>[4]</sup>.由叶尖速比  $\lambda$  和叶片节距角  $\beta$ ,可以计算得到风力机的转矩系数,并用示波器显示转矩系数随时间变化的曲线及转矩系数与转速的关系曲线.

由风力机转矩系数和风速以及风力机的叶轮半径来计算风力机的转矩,并根据直流电动机的模型得出电枢电压,由其控制直流电动机<sup>[5]</sup>.再用示波器显示风力机的转矩-转速曲线.

## 3 仿真结果及其分析

当负载转矩  $T_L = 0$ ,风速  $v$  不同时,Matlab 仿真结果如下.

(1)  $T_e-n$  曲线 在不同风速下,电磁转矩与转速的关系见图5.

(2)  $P-n$  曲线 在不同风速下,功率与转速的关系见图6.

(3)  $C_p-\lambda$  曲线 当风速为8 m/s时,风轮的功率系数与叶尖速比的关系曲线见图7.

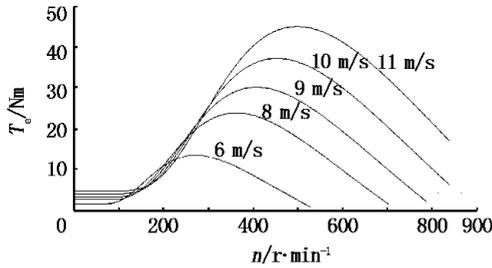


图5  $T_e-n$  曲线簇

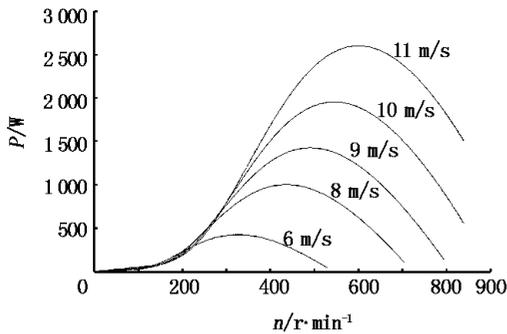


图6  $P-n$  簇曲线

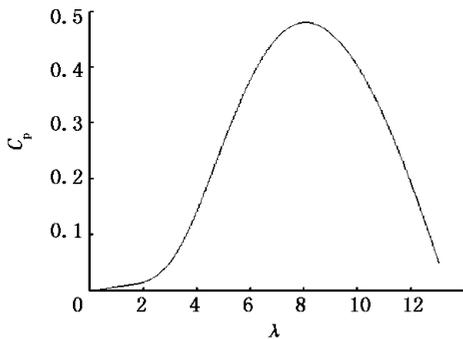


图7  $C_p-\lambda$  曲线

## 4 结 语

本文通过仿真得出的直流电动机电磁转矩-转速曲线和功率-转速曲线,与其对应的风力机电磁转矩-转速曲线和功率-转速曲线基本没有差异,与风轮功率系数-叶尖速比曲线也完全一致,表明本实验研究中用直流电动机模拟风力发电机的准确性和可靠性很高.

### 参考文献:

- [1] 贾要勤. 风力发电实验用模拟风力机[J]. 太阳能学报, 2004, 25(6): 735-739.
- [2] 卞松江, 潘再平, 贺益康. 风力机特性的直流电机模拟[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 360-364.
- [3] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 基于直流电动机的风力机特性模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 134-139.
- [4] MILLER A, MULJADI E, ZINGER D S. A variable speed wind turbine power control [J]. IEEE Trans. Energy Conversion, 1997(12): 181-186.
- [5] THIRINGER T, LINDRES J. Control by variable rotor speed of a fixed pitch wind turbine operating in a wide speed range [J]. IEEE Trans. Energy Conversion, 1993(8): 520-526.

(编辑 胡小萍)