

# 风力发电机组仿真设计

## 一、风速模型

从宏观气象学来说，风是温差引起的大气层内的空气运动。风速受多种因素的影响，情况相对复杂，但无论风况如何变化莫测，我们都可以利用数学模型来描述风的特性。

风速模型的建立比较复杂，根据不同的研究目的可建立不同的风速模型。本文通过划分风速的各种成分，认为风速的时空模型可由以下四部分组成：平均风速  $V_{wb}$ ，阵风风速  $V_{wg}$ ，渐变风速  $V_{wr}$  和噪声风速  $V_{mv}$ ：

$$V_w = V_{wb} + V_{wg} + V_{wr} + V_{mv} \quad (2-1)$$

### 1、平均风速模型

平均风速在风力发电机组运行时一直存在，反映了风电场平均风速的变化。一般设平均风速不变，可取平均风速  $V_{wb} = 8m/s$ 。

在 MATLAB 中搭建平均风速模型，仿真图以及运行曲线如图 2-2 和图 2-3 所示：

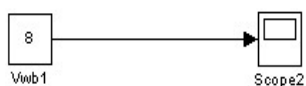


图 2-2 平均风速仿真图

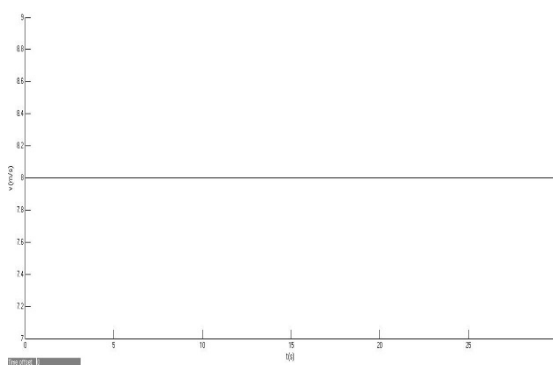


图 2-3 平均风速仿真曲线

### 2、阵风风速模型

根据阵风风速的特点列出动态方程式：

$$V_{wg} = \begin{cases} 0 & t < t_{1g}, t > t_{1g} + t_g \\ (V_{g\max}/2) \{1 - \cos 2\pi[(t/t_g) - (t_{1g}/t_g)]\} & t_{1g} < t < t_{1g} + t_g \end{cases} \quad (2-2)$$

式中， $t_{1g}$  和  $t_g$  分别为阵风的开始时间和持续时间， $V_{g\max}$  为阵风的峰值。

在 MATLAB 中搭建阵风风速模型，仿真图与运行曲线如图 2-4 和 2-5 所示：

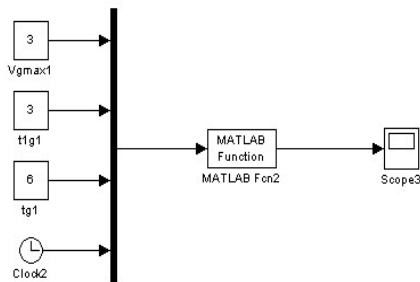


图 2-4 阵风风速仿真图

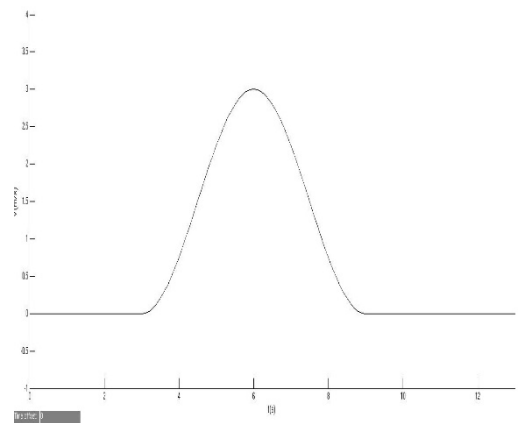


图 2-5 阵风风速仿真曲线

### 3、渐变风速模型

根据渐变风速的特点列出动态方程式：

$$V_{wr} = \begin{cases} 0 & t < t_{1r} \\ V_{r\max} [1 - (t - t_{2r}) / (t_{1r} - t_{2r})] & t_{1r} < t < t_{2r} \\ V_{r\max} & t > t_{2r} \end{cases} \quad (2-3)$$

式中， $t_{1r}$  为渐变时间， $t_{2r}$  为上升截止的时间， $V_{r\max}$  为风速渐变的最大值。

在 MATLAB 中搭建渐变风速模型，仿真图以及运行曲线如图 2-6 和图 2-7 所示：

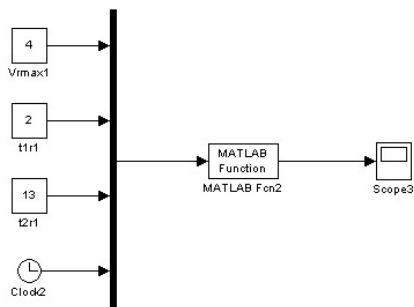


图 2-6 渐变风速仿真图

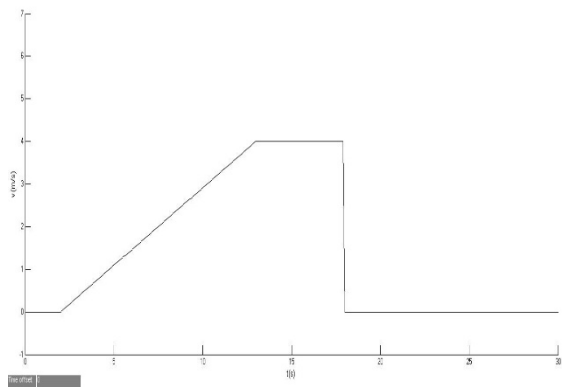


图 2-7 渐变风速仿真曲线

### 4、噪声风速模型

用来表示相对高度上风速变化的特点，在 MATLAB 中利用背景白噪声表示。

整体风速模型仿真图以及模拟风速曲线如图 2-8 和图 2-9 所示：

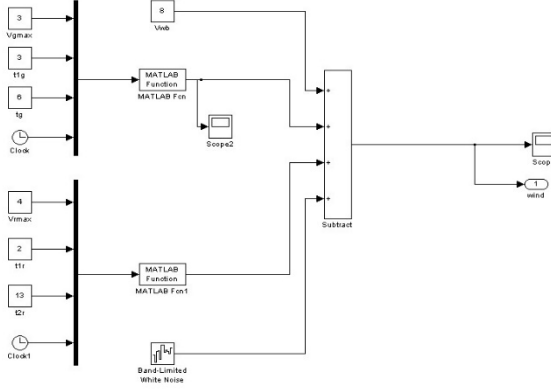


图 2-8 整体风速模型仿真图

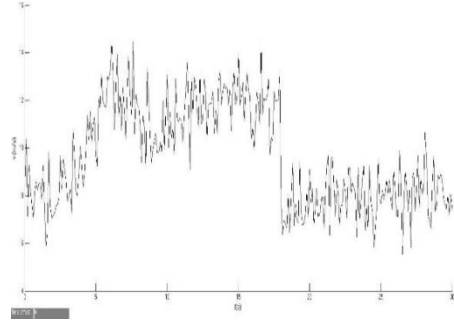


图 2-9 模拟风速仿真曲线

## 二、风力机模型

风力机的主要作用为风能和机械能的转化装置，它吸收风能并将其转换成机械能，传给风力发电机组的后续部分。所以，在研究风力机模型前首先给出风能的概念。

单位体积气流含可存储能量是  $E_k = \frac{1}{2} \rho v^2$ ， $\rho$  是流量密度。穿过横截面积  $A$  的空气流量是  $Av$ 。因此，速度为  $v$  的风经过横截面积  $A$  风能为： $P_v = \frac{1}{2} \rho Av^3$ 。

风力机并不能把这些风能完全转化为机械能，常用风能利用系数来表示风力机捕捉风能的能力，它是所收集风能与风能总量的比值，风力机输出的机械功率公式可表示为：

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi C_p(\lambda, \beta) v^3 R^2 \quad (2-4)$$

风机的输出转矩：

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi C_p(\lambda, \beta) v^2 R^3 / \lambda \quad (2-5)$$

式中， $\rho$  为空气密度 ( $k_g / m^3$ )； $v$  为风速 ( $m / s$ )； $R$  为叶片半径 ( $m$ )； $\lambda$  为转子叶尖速度相对于风速的叶尖速比； $C_p(\lambda, \beta)$  为风力机的风能利用系数。其中：

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (2-6)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2-7)$$

式中， $C_1 = 0.5176$ ， $C_2 = 116$ ， $C_3 = 0.4$ ， $C_4 = 5$ ， $C_5 = 21$ ， $C_6 = 0.0068$ 。

风能利用系数最大值为 0.593，随着桨距角  $\beta$  的变化， $C_p$  的变化形成一簇曲线， $C_p(\lambda, \beta)$  曲线如图 2-10 所示：

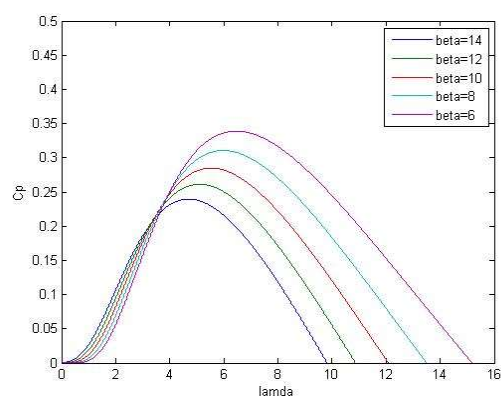


图 2-10  $C_p$  随  $\lambda$  变化曲线

三相坐标下  $C_p(\lambda, \beta)$  曲线如图 2-11 所示：

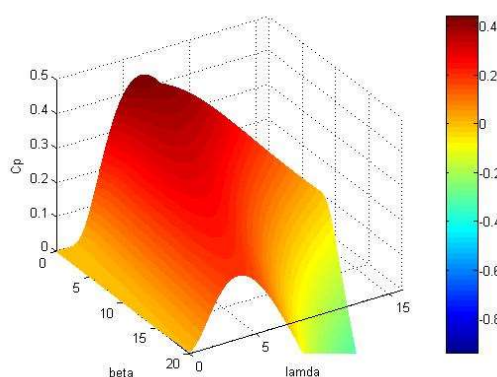


图 2-11 三相坐标下  $C_p$  随  $\lambda$ 、 $\beta$  变化曲线

在 MATLAB 中搭建风机模型，风机仿真图如图 2-12 所示：

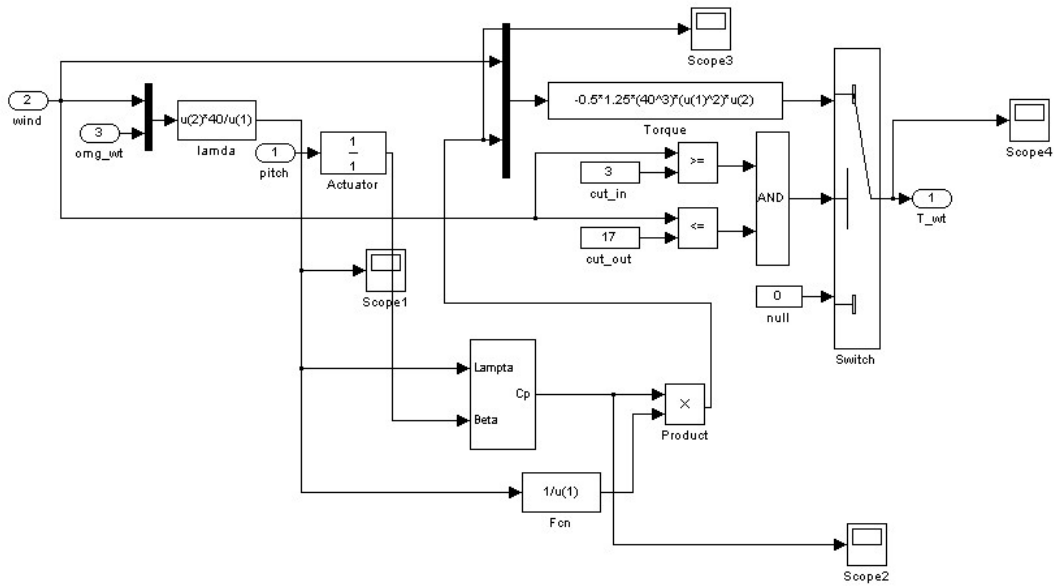


图 2-12 风机仿真图

其中，风速、桨矩角、风机转速为输入，风机转矩为系统输出；搭建风机模型时考虑了风机的启动风速  $cut\_in$  和切除风速  $cut\_out$ ，当风速大于启动风速时风机开始运转，当风速大于切除风速时风机脱网。

### 三、传动装置模型

风力发电机组的传动系统主要包含风力机转子、低速轴、齿轮箱、高速轴和发电机转子等，如图 2-13 所示：

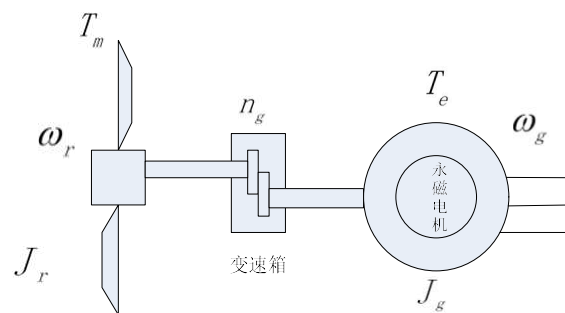


图 2-13 风力发电机组传动系统

#### (1) 风力机转子和低速轴的动态特性

$$J_r \ddot{\theta}_r + B_r \dot{\theta}_r = T_m - T_1 \quad (2-8)$$

$$T_1 = k_1 \cdot (\theta_r - \theta_1) + B_1 \cdot (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_1) \quad (2-9)$$

机械损失发生在传动轴和齿轮箱上， $B_r$  比较小，可以忽略，上式可简化为：

$$J_r \ddot{\theta}_r = T_m - T_1 \quad (2-10)$$

(2) 齿轮箱的动态特性

$$T_1 = n_g \cdot T_2 \quad (2-11)$$

$$\theta_2 = n_g \cdot \theta_1 \quad (2-12)$$

(3) 高速轴和发电机转子的动态特性

$$J_g \ddot{\theta}_g = T_e - T_2 \quad (2-13)$$

$$T_2 = k_2 \cdot (\theta_2 - \theta_g) + B_2 \cdot (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_g) \quad (2-14)$$

以上公式中， $J_r$  是风轮转子的转动惯量， $J_g$  是发电机转子的转动惯量， $T_m$  为传给风机的有效机械转矩， $T_e$  为施加于发电机转轴的电磁转矩， $n_g$  是齿轮箱的传动比， $\theta_g$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_r$  分别是发电机、低速轴、高速轴和风力机的角位移， $k_1$ 、 $k_2$  分别为低速轴和高速轴的刚度， $B_1$ 、 $B_2$  分别为低速轴和高速轴的阻尼系数， $T_1$ 、 $T_2$  分别为低速轴和高速轴转矩<sup>[26]</sup>。

传动装置中惯量和转矩可简化的表示成如下方程：

$$J_t \dot{\omega}_r = T_m - K_t \omega_r - n_g T_e \quad (2-15)$$

式中， $J_t = J_r + n_g^2 J_g$ ， $K_t = K_r + n_g^2 K_g$ ， $n_g = \frac{\omega_g}{\omega_r}$ 。 $\omega_r$  为风机转子角速度， $\omega_g$  为

发电机转子角速度， $K_r$  为风机的摩擦系数， $K_g$  为发电机的摩擦系数

( $J_g = 50e5$ ， $J_r = 90$ ， $n_g = 70$ )。

在 MATLAB 中搭建传动装置模型，如图 2-14 所示：

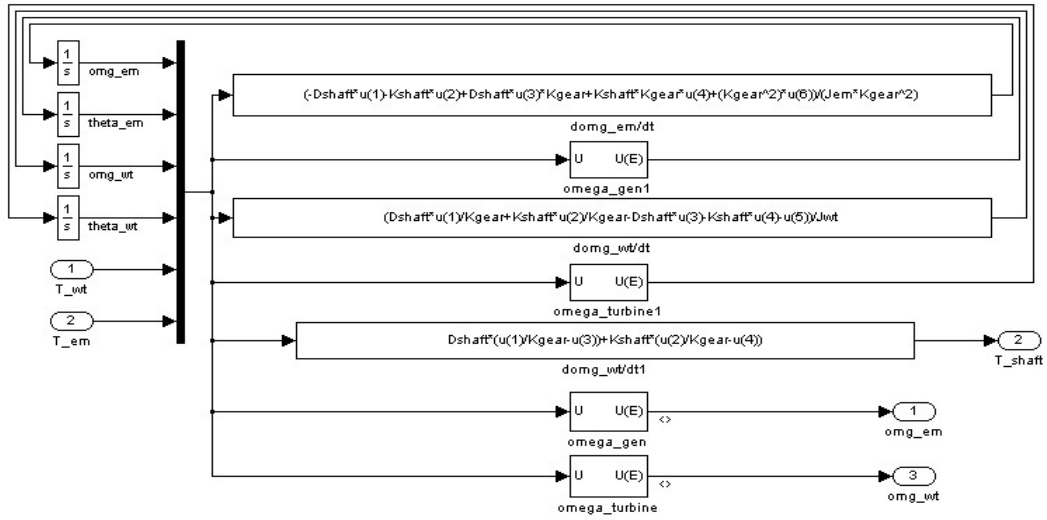


图 2-14 传动装置模型仿真图

其中，风机转矩、发电机反转矩为系统输入，发电机角速度、风机角速度为系统输出。

#### 四、永磁同步发电机模型

在d-q同步旋转坐标系中建立的永磁同步发电机组数学模型<sup>[27]</sup>为：

$$L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - R_s i_d + L_q p \omega_g i_q \quad (2-16)$$

$$L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - R_s i_q - L_d p \omega_g i_d - p \omega_g \psi \quad (2-17)$$

式中， $\psi$  为永磁体磁链， $p$  为极对数， $R_s$  为定子电阻， $L_d$ ， $L_q$  分别为发电机的d轴和q轴电感， $u_d$ ， $u_q$ ， $i_d$ ， $i_q$  分别为d轴和q轴的电压和电流。上述两式表明了电流分量与电压分量的关系。永磁同步发电机的电磁转矩表达式如下：

$$T_e = p(L_d - L_q)i_d i_q + p\psi i_q \quad (2-18)$$

在 MATLAB 中搭建永磁风力发电机模型，如图 2-15 所示：

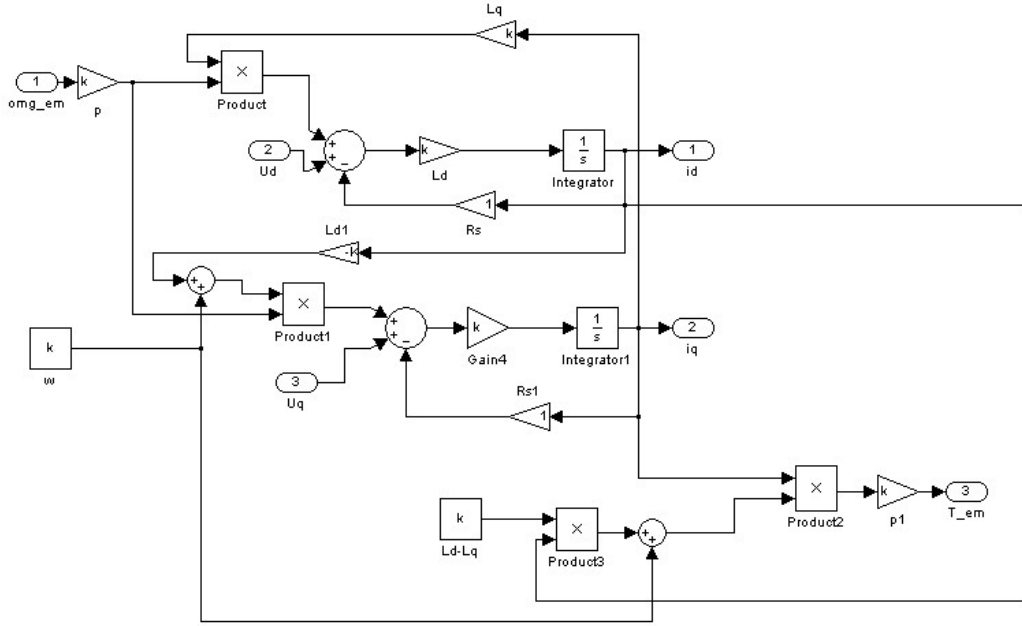


图2-15 永磁风力发电机模型

为了使永磁电机损耗最小，通常假设  $i_d=0$ ，则电磁转矩表达式为  $T_e = p\psi i_q$ ，则(2-17)式化为：

$$L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - R_s i_q - p\omega_g \psi \quad (2-19)$$

上式表明q轴电流分量可以通过q轴电压分量来控制。而(2-15)式则变为：

$$J_t \dot{\omega}_r = T_m - K_t \omega_r - n_g p \psi i_q \quad (2-20)$$

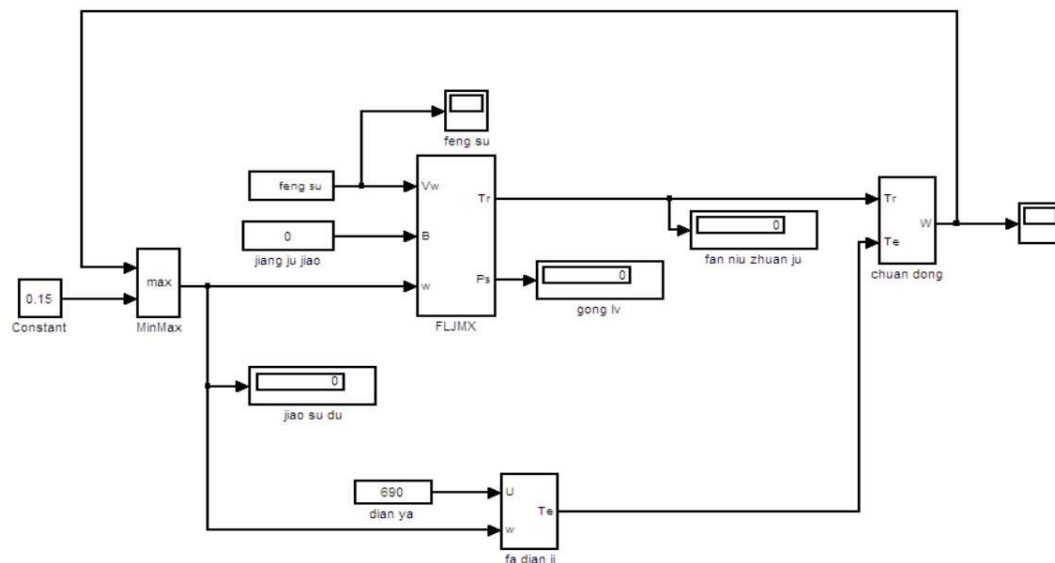
因此，包含传动装置和永磁风力发电机的永磁风力发电机组动态模型可用如下三阶模型表示：（ $J=e-3, k=e-3, R=2.875, L=8.5e-3, p=4, \psi=0.175$ ）

$$\begin{cases} J_t \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - K_t \omega_r - n_g p [(L_d - L_q) i_d i_q + \psi i_q] \\ L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - R_s i_q - L_d p \omega_g i_d - p \omega_g \psi \\ L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - R_s i_d + L_q p \omega_g i_q \end{cases} \quad (2-21)$$



## 五、整体系统建立

对于整体系统的建立，由于比较繁琐，所以在原模块的基础上，使每个部分形成整体的子系统，分别形成自然风子系统（fengsu），风力机子系统（FLJMX），发电机子系统（fadianji）和传动系统子系统（chuandong）几部分。然后形成整体系统，示意图如下。



### 大作业要求：

- 1、在 MATLAB/SIMULINK 中完成仿真系统搭建；
  - 1.1 分别搭建四个环节，并仿真出每个环节的输入（除风速环节外，其他输入采用阶跃、斜坡、正弦信号测试）和输出；
  - 1.2 将以上四个环节串联后搭建整体系统，仿真出风速输入和信号输出（d、q 轴电流  $i_d$  和  $i_q$ ，转速  $\omega$ ，转矩 T）；
- 2、大报告结构可分为：系统背景、仿真搭建、仿真测试、总结、心得体会等部分；
- 3、19 周周五（1 月 6 日）前交给助教，助教信息：邬永（15295767783；851628539@qq.com）。