

# 基于微分几何的风力发电机组恒功率控制

陈思哲<sup>1</sup>, 吴捷<sup>2</sup>, 姚国兴<sup>2</sup>, 杨金明<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 当风速超过额定值时, 可以通过降低风力机的转速实现恒功率控制从而避免使用复杂的变桨距机构, 本文基于微分几何理论设计了非线性控制器, 实现了变速风力发电机组的恒功率控制. 首先, 分析了风力机的空气动力学特性, 这是所提出的恒功率控制方法的理论依据; 然后, 通过微分几何反馈线性化变换, 将风力机的非线性模型全局线性化; 最后, 基于新的线性化模型设计了非线性控制器, 实现了变速风力机全局精确线性化控制. 仿真结果表明, 所提出的控制方法在风速大范围变化的情况下能有效的实现变速风力发电机组额定风速以上的恒功率控制.

**关键词:** 风力机; 空气动力学; 恒功率控制; 反馈线性化

**中图分类号:** TM315 **文献标识码:** A

## Power limitation control of wind turbine system based on differential geometry theory

CHEN Si-zhe<sup>1</sup>, WU Jie<sup>2</sup>, YAO Guo-xing<sup>2</sup>, YANG Jin-ming<sup>2</sup>

(1. College of Automation Science and Technology, South China University of Technology,

Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** When wind speed exceeds the rated level, power limitation control can be realized through decreasing the rotational speed of the wind turbine to eliminate complex pitch control devices, and a nonlinear controller based on differential geometry theory is designed to achieve the power limitation control for a variable speed wind turbine. First, the wind turbine aerodynamics characteristic is analyzed, which is the theoretical foundation of the power limitation control method proposed. Then, the nonlinear model of wind turbine is globally linearized by differential geometry transformation. Finally, a nonlinear controller is designed based upon the new linearized model, and the globally precise linearized control method of the variable speed wind turbine system is achieved. Simulation results indicate that the control method proposed can effectively implement the power limitation control of variable speed wind turbine system at above rated wind speed, even if the wind speed changes in a large range.

**Key words:** wind turbines; aerodynamics; power limitation control; feedback linearization

### 1 引言(Introduction)

随着化石能源的消耗与生态环境的日益恶化, 发展以风能为代表的可再生能源, 保证人类社会的可持续发展, 已经成为世界各国的共识<sup>[1]</sup>.

风力发电机组由于机械结构的限制存在着转速限制, 由于电气元件的负荷承受能力限制存在着功率限制. 因此在额定风速以上时, 必须控制风力机的功率捕获. 定桨距风力发电机依靠叶片的失速效应, 减少所捕获的风能, 这种方法使得风力机在额定风速以上时, 输出功率反而低于额定功率, 风能利用效率低. 对于中小型并网风力发电机组, 变速恒频运行方式不仅可以实现最大风能捕获, 而且在额定风速

以上时, 可以通过降低风轮转速, 减少捕获的风能, 实现恒功率控制.

风力发电系统是一个大范围强风速扰动的非线性系统, 其平衡点时刻随来流风速的变化而变化. 因此, 仅基于某一工况点附近线性化的模型所设计的控制器并不能满足系统大范围扰动下的控制性能.

近年来, 非线性控制理论取得了突破性的进展, 并被应用于各类电气传动系统<sup>[2~4]</sup>. 同时, 也为上述问题的有效解决提供了可能, 已有学者将非线性控制理论应用于风力发电中<sup>[5,6]</sup>. 本文使用基于微分几何反馈线性化的方法, 控制风力机的转速, 从而实现变速风力发电机组额定风速以上的恒功率控制, 仿

真表明控制效果良好。

## 2 空气动力学特性分析(Aerodynamics characteristic analysis)

为了说明降低转速可以达到与变桨距同样的效果,有必要从风力机的空气动力学<sup>[7]</sup>出发加以研究。因此在叶片的半径 $r$ 处,取一段叶素进行分析。

图1为风轮的空气动力学特性分析。风轮的旋转平面与图中风速 $v$ 的方向垂直。 $\beta$ 为桨距角,即叶片的弦线与风轮旋转平面之间的夹角。 $u$ 为叶素在旋转平面内的圆周速度, $v$ 为吹过风轮旋转平面的轴向风速,气流相对于叶片的速度为 $w$ ,则 $v = u + w$ , $w = v - u$ 。气流相对叶片的速度 $w$ 与叶片弦线的夹角,即所说的攻角 $i = I - \beta$ 。其中 $I$ 为 $w$ 与旋转平面之间的夹角,称为倾斜角。

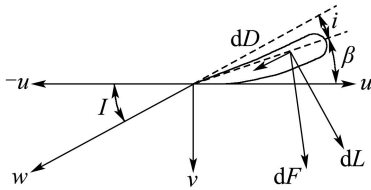


图1 空气动力学特性分析

Fig. 1 Aerodynamics characteristic analysis

叶素受到相对速度 $w$ 的气流作用,进而受到气动升力 $dF$ 作用。 $dF$ 可分为一个升力 $dL$ 和一个阻力 $dD$ ,分别与相对速度 $w$ 垂直或平行(见图1),并对应于某一攻角 $i$ 。

升力 $dL$ 和一个阻力 $dD$ 的值如下:

$$dL = 0.5\rho C_l w^2 dS, dD = 0.5\rho C_d w^2 dS. \quad (1)$$

上式中的 $C_l$ 和 $C_d$ 为叶片的升力系数和阻力系数,其数值由攻角 $i$ 决定(见图2)。

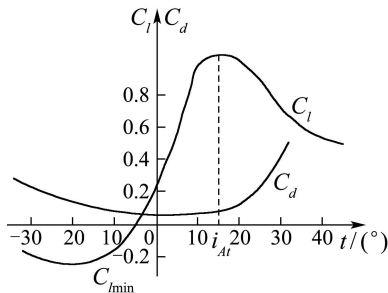


图2 叶片的升力系数和阻力系数

Fig. 2 Lift coefficient and drag coefficient of the blade

从上面的空气动力学特性分析可见,变桨距的实质是:通过改变桨距角 $\beta$ 改变攻角 $i$ ,从而改变升力系数 $C_l$ 和 $C_d$ 的数值,进而改变升力 $dL$ 阻力 $dD$ 及其合力 $dF$ ,使风轮受到的风的作用力减小,降低所捕获的功率。从图1可以看出,保持桨距角 $\beta$ 不变的情况

下,改变叶素在旋转平面内的圆周速度 $u$ ,可以改变倾斜角 $I$ ,一样可以达到改变攻角 $i$ 的效果。上述就是通过降低转速实现恒功率控制的空气动力学原理。

## 3 机理模型(Model of system)

从图3中可以看出,整个风力发电系统分为3个子系统:风力机气动系统、齿轮箱传动系统、发电机。风力机从空气中吸收能量,将空气动能转换为机械能,通过齿轮箱将吸收的能量传递到发电机的轴上,由发电机将机械能转化为电能输出。

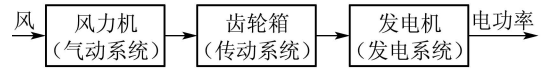


图3 风力发电系统的构成

Fig. 3 Structure of the wind turbine system

### 3.1 气动系统(Aerodynamics system)

$$P_r = 0.5C_P(\lambda, \beta)\rho\pi R^2 V^3, \quad (2)$$

$$\lambda = \omega_r R / V, \quad (3)$$

$$T_r = P_r / \omega_r = 0.5C_P(\lambda, \beta)\rho A R V^2 / \lambda. \quad (4)$$

式(2)~(4)中: $P_r$ 为风力机输出功率, $\rho$ 为空气密度, $R$ 为风轮半径, $A$ 为风轮旋转平面面积, $V$ 为有效平均风速, $T_r$ 为风力机扭矩, $\omega_r$ 为风轮转速。

$C_P(\lambda, \beta)$ 为功率系数,在本系统分析中,为不失一般性,令安装角 $\beta$ 固定为零, $C_P(\lambda)$ 可表示为如下形式:

$$C_P(\lambda) = \alpha_1 \lambda^6 + \alpha_2 \lambda^5 + \alpha_3 \lambda^4 + \alpha_4 \lambda^3 + \alpha_5 \lambda^2 + \alpha_6 \lambda + \alpha_7. \quad (5)$$

### 3.2 传动系统(Transmission system)

为便于分析,不考虑传动轴的柔性和摩擦损耗,并将齿轮箱电机侧的扭矩和转动惯量等效变换到风力机侧,可得整个传动系统的等效转动惯量:

$$J_v = J_r + \nu_i^2 J_g. \quad (6)$$

其中: $J_r$ 为风力机转动惯量, $J_g$ 为电机转动惯量, $\nu_i$ 为齿轮传动比。整个传动系统的模型为

$$J_v \dot{\omega}_r = T_r - \nu_i T_e. \quad (7)$$

其中:风力机扭矩 $T_r$ 为动力转矩,将发电机电磁转矩 $T_e$ 乘以传动比 $\nu_i$ 作为风力机侧等效阻力转矩, $\dot{\omega}_r$ 为风力机的旋转角加速度。由式(7)可见,改变电磁转矩,就可以改变风力机的转动速度。

### 3.3 发电机(Generator)

本文把发电机作为一个转矩源处理,电磁转矩的值由控制器根据额定功率与实际功率的差计算得到。由式(7)可见,电磁转矩可以改变风力机的叶尖速比,从而改变风力机所获得的能量,使实际功率与

额定功率一致.

发电机的电磁转矩可以使用直接转矩控制的方法实现控制. 在双馈电机直接转矩中, 通过控制施加的转子电压矢量就可以控制转子磁链矢量的方向和幅值的大小, 同时控制定子磁链和转子磁链之间的夹角, 就可以控制转矩的大小<sup>[8,9]</sup>.

### 3.4 系统参数(System parameters)

本系统所讨论的风力机为一台功率为400 kW、变转速、定桨距的双馈异步风力发电机组, 其额定风速为10 m/s. 风力机风轮半径24 m, 转速上限为27.8 r/min, 发电机同步转速1500 r/min, 传动比 $\nu_i = 54$ , 风轮转动惯量 $J_r = 1,800,000 \text{ kg/m}^2$ , 发电机转动惯量 $J_g = 52 \text{ kg/m}^2$ . 假定空气密度 $\rho$ 为 $1.2 \text{ kg/m}^3$ , 能量转换效率 $\eta$ 为0.9.

### 4 非线性控制(Nonlinear control)<sup>[10]</sup>

设有单输入单输出仿射非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u, \\ y = h(x). \end{cases} \quad (8)$$

如果相对阶与系统阶相等, 则系统将能够通过选定一个坐标闭环, 全局线性化为一个线性系统.

选择的坐标映射为

$$z(x) = [h(x) \ L_f h(x) \ \cdots \ L_f^{n-1} h(x)]^T,$$

则系统变换为

$$\dot{z} = Az + Bv. \quad (9)$$

$A, B$ 为标准型状态方程矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$v = L_f^n h(x) + L_g L_f^{n-1} h(x)u. \quad (10)$$

对新的线性系统进行极点配置, 可得到其反馈输入:

$$v^* = -K_f z(x), \quad (11)$$

则可得到原非线性系统的反馈控制输入:

$$u = \frac{-1}{L_g L_f^{n-1} h(x)} L_f^n h(x) + \frac{1}{L_g L_f^{n-1} h(x)} v^*. \quad (12)$$

## 5 控制器设计(Controller design)

### 5.1 控制目标(Control objective)

风力发电机组的控制目标: 当风力机在转速极限

以下时, 风轮转速跟踪最佳叶尖速比, 实现最大风能捕获; 转速到达极限, 而功率未到达额定功率时, 按恒转速方式运行; 在额定功率以上时, 降低风轮转速, 按恒功率方式运行. 本文主要讨论系统在额定功率以上的控制目标: 以发电机的电磁转矩 $T_e$ 为系统的控制量, 以额定功率 $P_e^*$ 与输出电功率 $P_e$ 的差额为依据, 调节电磁转矩以改变风力机的转速和叶尖速比, 从而在给定的输入风速 $V$ 下, 改变风力机获得的风能和空气动力转矩, 使输出电功率保持为额定功率. 本系统的控制问题属于使输出功率保持为额定功率的镇定控制问题(图4).

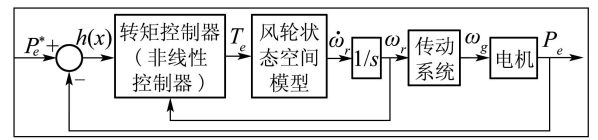


图4 风力发电机组的反馈线性化控制

Fig. 4 Feedback linearization control of wind turbine system

因此, 选择输出函数为

$$h(x) = P_e^* - P_e. \quad (13)$$

其中 $P_e = \eta P_r = 0.5\eta C_P(\lambda)\rho\pi R^2 V^3$ .

### 5.2 仿射模型(Affine model)

令系统的状态变量为风轮转动角速度 $\omega_r$ , 输入控制量为电磁转矩 $T_e$ , 输出量为 $h(x)$ . 则系统的非线性仿射模型为

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (14)$$

$$h(x) = P_e^* - 0.5\eta C_P(\lambda)\rho\pi R^2 V^3. \quad (15)$$

其中:  $x = \omega_r$ ,  $u = T_e$ ,  $g(x) = -\nu_i/J_v$ ,  $f(x) = \frac{1}{2J_v} \frac{C_P(\lambda)}{\lambda} \rho A R V^2$ .

### 5.3 线性化条件检验(Inspection of linearization condition)

选择新坐标为

$$z = h(x). \quad (16)$$

对状态变量 $x$ 求偏导, 得

$$\frac{\partial h(x)}{\partial x} = \frac{1}{2}\eta\rho\pi R^2 V^3 \frac{\partial C_P}{\partial \omega_r} \dot{x}, \quad (17)$$

则输出函数关于 $f(x)$ 和 $g(x)$ 的李导数为

$$L_f h(x) = -\frac{1}{2}\eta\rho\pi R^2 V^3 \frac{\partial C_P}{\partial \omega_r} f(x), \quad (18)$$

$$L_g h(x) = -\frac{1}{2}\eta\rho\pi R^2 V^3 \frac{\partial C_P}{\partial \omega_r} g(x). \quad (19)$$

因此,  $L_g h(x) \neq 0$ , 系统的相对阶为1, 与系统的阶数相等. 满足全局线性化条件.

## 5.4 控制器设计(Controller design)

按照上面的推导, 可得到新的坐标为

$$z = h(x) = P_e^* - 0.5\eta C_P(\lambda)\rho\pi R^2 V^3, \quad (20)$$

组成一新的线性坐标方程:

$$\dot{z} = v, \quad (21)$$

$$v = L_f h(x) + L_g h(x)u. \quad (22)$$

对新的线性坐标方程进行极点配置得反馈量:

$$v^* = -k_f z(x), \quad (23)$$

则非线性反馈输入为

$$u = T_e = \frac{-1}{L_g h(x)} L_f h(x) + \frac{1}{L_g h(x)} v^*. \quad (24)$$

将上述式子代入并化简得所需的控制转矩为

$$T_e = \frac{1}{2\nu_i} \frac{C_P(\lambda)}{\lambda} \rho A R V^2 + \frac{k_f z(x)}{\frac{1}{2}\eta\rho\pi R^2 V^3 \frac{\partial C_P}{\partial \omega_r} g(x)}. \quad (25)$$

## 6 仿真结果(Simulation results)

图5为风速从10 m/s阶跃到14 m/s时的响应曲线. 当风速上升时, 发电机输出功率上升, 非线性控制器输出电磁转矩上升, 以降低风轮转速, 减小叶尖速比, 从而降低功率系数, 减少风轮捕获的功率, 使发电机输出功率迅速下降到额定值, 较好的实现恒功率控制. 从图中可以看出, 当风力机转速下降时, 发电机电磁转矩上升, 发电机输出功率等于发电机的电磁转矩与转速之积, 故功率维持在额定值附近. 该系统的调节时间较长, 这是由于风轮转动惯量较大, 而且输出功率是风速的3次方.

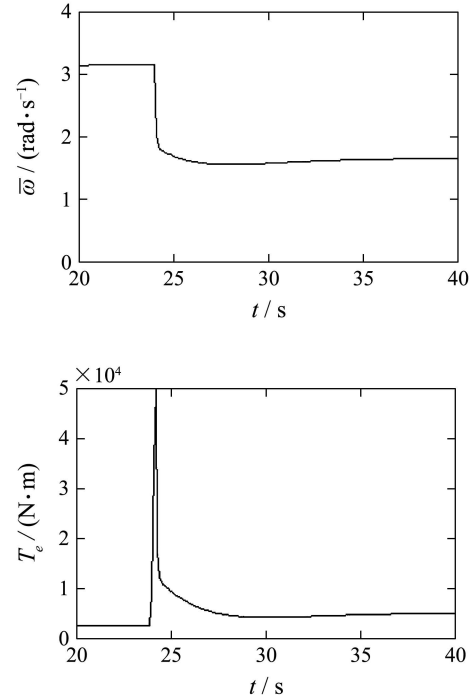
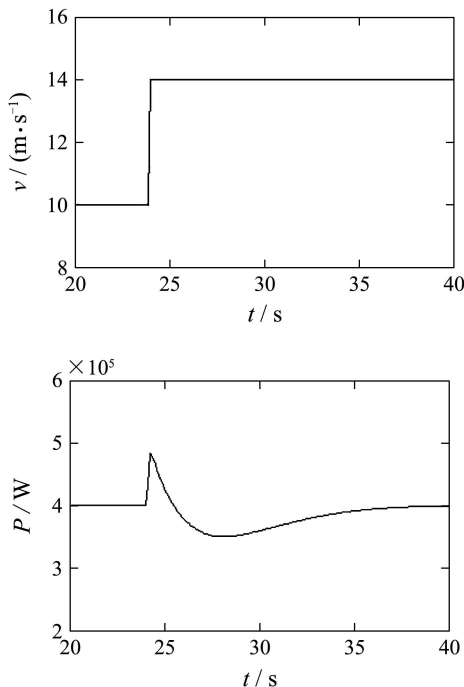
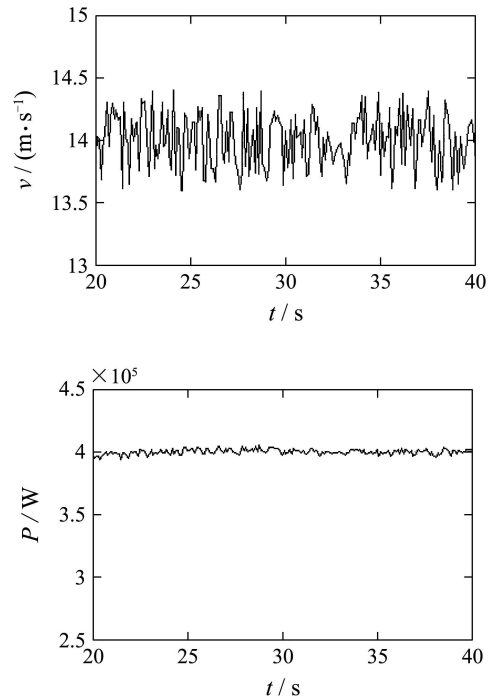


图5 风速由10 m/s阶跃到14 m/s时的响应曲线

Fig. 5 Responses curves when wind speed jumps from 10 m/s to 14 m/s

图6为额定风速以上实际风速输入的响应曲线. 当输入风速剧烈变化时, 控制器对大范围强扰动响应迅速, 能够将发电机输出功率很好的控制在额定值附近. 可见, 与基于平衡点附近局部线性化模型的控制器相比, 基于微分几何理论设计的非线性控制器, 能够更好的适应风速的大范围变化.



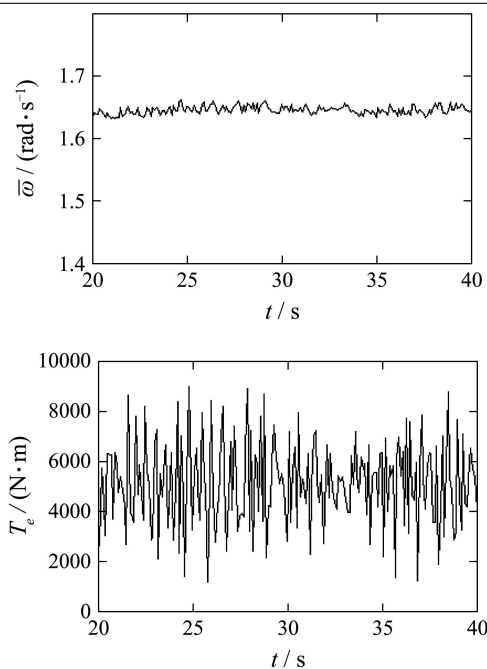


图6 实际风速响应曲线

Fig. 6 Responses curves under actual wind speed

## 7 结论(Conclusion)

本文先从空气动力学的角度,分析了通过降低风轮转速以实现变速风力发电机组额定风速以上恒功率控制的原理;接着建立了系统的模型,并将微分几何的反馈线性化方法用于变速风力发电机组额定风速以上的恒功率控制;最后的仿真结果表明,基于微分几何的反馈线性化方法较好的实现了变速风力发电机组额定风速以上的恒功率控制。

本文所提出的控制方法与文献[5,6]中的控制方法相比,系统动态性能接近,表明了本文控制方法的有效性,但是本文所提出的变速恒功率控制方法不需要昂贵复杂的桨距角调节系统,因此在风力机的成本和维护方面更具有优越性。

## 参考文献(References):

- [1] 吴捷, 杨俊华. 绿色能源与生态环境控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 864 – 869.  
(WU Jie, YANG Junhua. Control on green energy source and ecologic environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 864 – 869.)
- [2] LEE Tzann-Shin. Input-output linearization and zero-dynamics control of three-phase AC/DC voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(1): 11 – 22.
- [3] LIAO Zhiling, JIA Hongping, LIU Guohai. Comparative study on vector control and differential geometry decoupling control method of induction motor[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2005, (2): 1539 – 1543.
- [4] 黄松清. 电压型变频器、三相交流异步电动机传动系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(2): 223 – 228.  
(HUANG Songqing. Stability for motor driver fed by voltage-type inverter [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(2): 223 – 228.)
- [5] 包能胜, 姜桐. 微分几何在水平轴恒速风力发电机系统的应用[J]. 太阳能学报, 1999, 20(2): 130 – 134  
(BAO Nengsheng, JIANG Tong. Application of differential geometry in horizontal axis fixed speed wind turbine system[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1999, 20(2): 130 – 134.)
- [6] 包能胜, 叶枝全. 水平轴失速型风力机主动非线性控制[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4): 519 – 524.  
(BAO Nengsheng, YE Zhiquan. Active nonlinear control of the stall horizontal wind turbine system[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2004, 25(4): 519 – 524.)
- [7] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 14 – 23.  
(YE Hangye. *Control Techniques in Wind Energy Conversion System*[M]. 2nd edition. Beijing: China Machine Press, 2006: 14 – 23.)
- [8] JOVANOVIĆ M G, YU J, LEVI E. A review of control methods for brushless doubly-fed reluctance machines[C]//*2002 International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*. Bath, United Kingdom: IEE Press, 2002, (s): 528 – 533.
- [9] GOMEZ S A. Grid synchronisation of doubly fed induction generators using direct torque control[C]//*Proceedings of the 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Sevilla, Spain: IEEE Press, 2002, (4): 3338 – 3343.
- [10] JEAN-JACQUES E S. *Applied Nonlinear Control*[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 152 – 170.