

变速风力发电机模型参考自适应控制

郑黎明, 许移庆

(汕头大学 能源与环境科学研究所, 汕头 515063)

摘要: 风力机系统是一个非线性不稳定的复杂系统, 系统具有不确定性, 模型很难建立。自适应控制研究对象就是这种具有不确定性的系统, 它能够通过修正控制器的参数来降低不确定性对系统的影响。采用模型参考自适应方法对变速风力发电机在额定风速下进行控制, 使风力机获得最大风能。仿真结果表明此方法对额定风速下变速风力发电机的控制效果很好。

关键词: 风力发电机; 模型参考自适应控制; 李雅普若夫方程

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1007-2691 (2005) 02-0057-05

Model reference adaptive control of variable speed wind turbine generator

ZHENG Li-ming, XU Yi-qing

(Institute of Energy and Environmental Science, Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract: This paper is based upon the point to control a variable speed wind turbine generator below rated wind speed by model reference adaptive method, and make wind turbine capture maximal wind energy. Simulation results show that the control effectiveness to variable speed wind turbine generator below rated wind speed is very well.

Key words: wind turbine generator; model reference adaptive control; Lyapunov equation

引言

近 5 年来国内风电场的新装机容量为过去的两倍, 这得益于对环境保护的重视和风力机技术的发展。虽然国内运行的风力机仍然以定转速为主, 但变转速风力机正逐步成熟并投入运行。通过转速的调节使得风力机的叶尖速比 λ 保持在最佳位置, 变转速风力机具有高出多达 20% 的风能利用率, 并使桨叶的负荷减小和单机容量增大, 但同时也增加了控制系统和电力系统的复杂性。因此控制系统的研究显得十分必要。

风力机的风轮将风动能部分转换为机械能, 其效率随叶片桨距角和叶尖速比变化。对变桨距风力机, 高于额定风速时调节桨距角来实现输出功率的调节。在低于额定风速下变转速风力机的桨距角通

常为零度, 转换效率在某一叶尖速比下达到最大值, 理论上不会超过贝茨极限 (0.593)。考虑到风力机的非线性和系统的工作特点, 文献 [1,4] 采用在工作点附近线性化建立线性模型, 并运用线性系统方法设计控制器。运用非线性理论建立较为精确的非线性模型, 建立误差方程且使误差渐近稳定^[2], 这种方法需要模型和对象的高度吻合。另外, 智能控制方法近年来也有相关报道^[4]。

事实上, 风力机的非线性来源于气动关系, 因此其精确度不高, 而且由于气候、温湿度的影响, 系统通常存在慢时变。本文采用模型参考自适应控制方法 (MRAC) 来分析变转速风力机系统。风力机系统在工作点附近的线性化模型在第 2 部分介绍, 由于风速不可控制, 因此只能作为扰动输入。模型参考自适应方法在第 3 部分详细叙述。考虑到扰动输入与风力机系统固有频率之间的差

收稿日期: 2004-08-01.

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (2000789).

作者简介: 郑黎明 (1964 —), 男, 汕头大学能源与环境科学研究所副教授.

异,以惯性环节作为参考模型,并设计控制输入以满足 MRAC 的要求^[3],获得控制量的自适应率。最后对某一机型进行了仿真,验证了该方法的有效性。

1 风力机系统模型

由于控制方法和目的的不同,风力机系统有不同的理论简化模型。风力机系统简化方框图如图1所示。其主要由风轮、增速齿轮箱和同步发电机组成。把弹性转矩和阻尼转矩都集中到风轮一侧。根据力传递的方向,可得出如下方程组(1)^[1,2]:

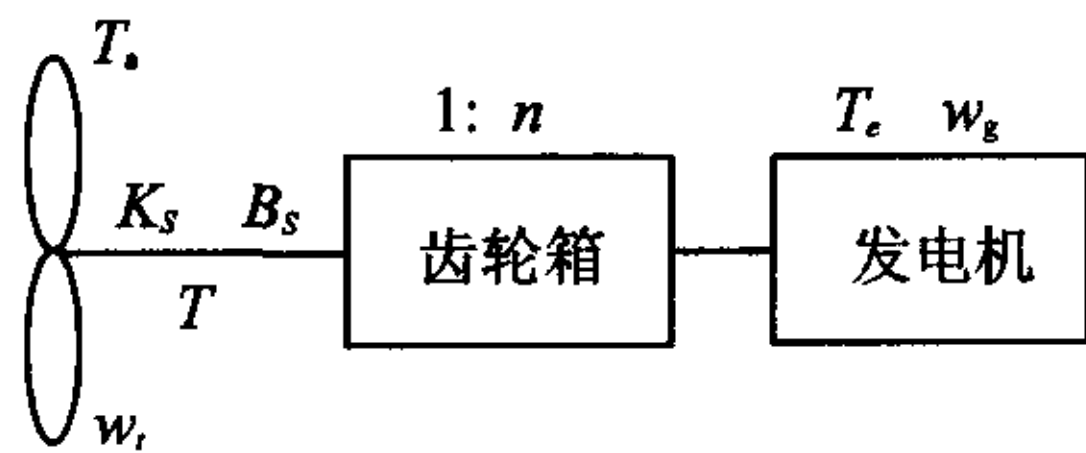


图1 风力机系统方框图

Fig.1 Structural diagram of wind turbine system

$$\begin{cases} T_a - T = J_i \dot{w}_i \\ \frac{1}{n} T - T_e = J_g \dot{w}_g \\ T = T_s + T_D = K_s \int_0^t \left(w_i - \frac{1}{n} w_g \right) d\tau + B_s \left(w_i - \frac{1}{n} w_g \right) \end{cases}, (1)$$

式中

$$T_a = \frac{1}{2} \rho S R C_T(\lambda) v^2 = H C_T(\lambda) v^2, (2)$$

其中 \$C_T(\lambda)\$ 为风轮的转矩系数,它是叶尖速比的非线性函数。对 \$T_a\$ 线性化,有

$$\Delta T_a = \alpha \Delta v + \gamma \Delta w_i. (3)$$

在某个工作点时:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\partial T_a}{\partial v} \Big|_{\text{o.p.}} = H v_0 (2 C_{T0}(\lambda) - \lambda_0 C_T' \Big|_{\text{o.p.}}) \\ \gamma &= \frac{\partial T_a}{\partial w_i} \Big|_{\text{o.p.}} = H R v_0 C_T' \Big|_{\text{o.p.}} \end{aligned} (4)$$

$$\begin{cases} \dot{w}_i = \frac{\gamma - B_s}{J_i} w_i + \frac{B_s}{n J_i} w_g - \frac{1}{J_i} T_s + \frac{\alpha}{J_i} v \\ \dot{w}_g = \frac{B_s}{n J_g} w_i - \frac{B_s}{n^2 J_g} w_g + \frac{1}{n J_g} T_s - \frac{1}{J_g} T_e \\ \dot{T}_s = K_s \left(w_i - \frac{w_g}{n} \right) \end{cases} (5)$$

写成状态方程形式为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + w_1 \\ y = Cx \end{cases}, (6)$$

式中 \$x^T = [w_i, w_g, T_s]\$, \$u = T_e\$, \$w_1^T = \left[\frac{\alpha}{J_i} v, 0, 0 \right]\$。

系数矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\gamma - B_s}{J_i} & \frac{B_s}{n J_i} & -\frac{1}{J_i} \\ \frac{B_s}{n J_g} & -\frac{B_s}{n^2 J_g} & \frac{1}{n J_g} \\ K_s & -\frac{K_s}{n} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ 0 \end{bmatrix}, C^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

这就是风力机系统的简化线性模型。

2 自适应控制器设计

本文设计的是模型参考自适应控制器,系统的控制框图如图2所示。其中查询表部分为根据最佳叶尖速比算得的气动转矩 \$T_a\$ 与期望的发电机转速 \$w_{gd}\$ 之间的曲线关系。根据系统的特性,控制变量可设为

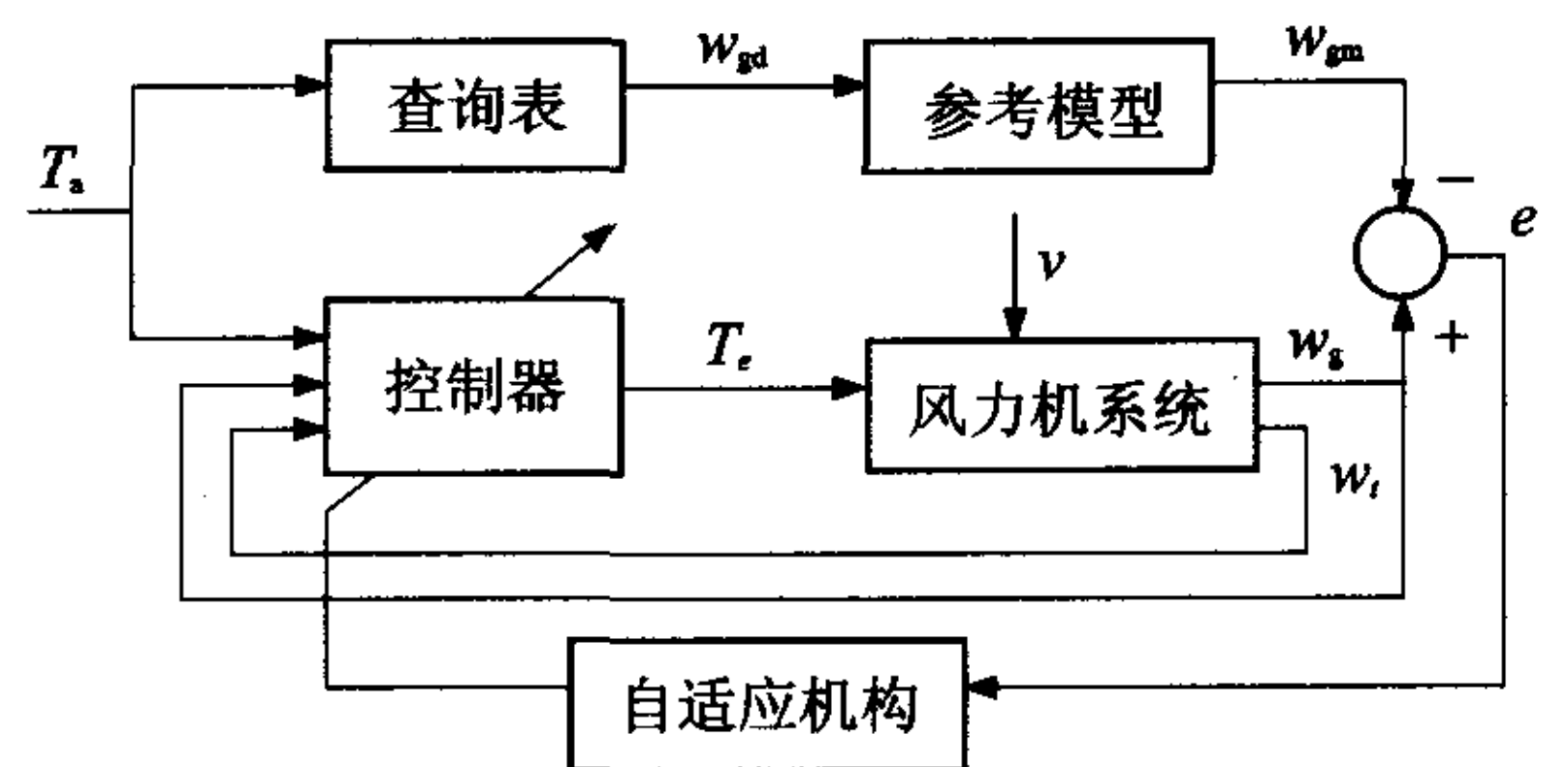


图2 系统控制框图

Fig.2 Structural diagram of system control

$$T_e = K_1 \int_0^t \left(w_i - \frac{w_g}{n} \right) d\tau + K_2 \left(w_i - \frac{w_g}{n} \right) + K_3 (w_g - w_{gd}). (7)$$

由于风轮和发电机都存在惯性,当风速变化时,它们都不能立即跟上变化,因此参考模型可取为

$$\dot{w}_{gm} = a w_{gm} = a w_{gd}. (8)$$

把式(7)代入式(5)得

$$\dot{w}_g + a(w_g - w_{gd}) = \frac{1}{J_g} \Phi^T W. (9)$$

式中 \$\Phi = K - K\$, \$K^T = \left[\frac{K_s}{n}, \frac{B_s}{n}, a J_g \right]\$, \$K^T = [K_1, K_2, K_3]\$, \$W^T = \left[\int_0^t \left(w_i - \frac{w_g}{n} \right) d\tau, w_i - \frac{w_g}{n}, w_g - w_{gd} \right]\$。

定义输出误差为

$$e = w_g - w_{gm}, (10)$$

两边求导则有

$$\dot{e} = \dot{w}_g - \dot{w}_{gm}, \quad (11)$$

式(9)减去式(8), 并把式(11)代入得

$$\dot{e} + ae = \frac{1}{J_g} \Phi^T W. \quad (12)$$

因为风速是个很不确定的输入, 而且时时在变化, 为了减缓由于输出误差 e 剧烈变化所带来的控制器参数的剧烈变化, 可以定义新的误差信号^[3]

$$\varepsilon = e - \frac{\varepsilon e^2}{s+a}, \quad (13)$$

则稳态时有

$$\varepsilon = \frac{ae}{a+e^2}. \quad (14)$$

当 $|e| > 1$ 时, $\varepsilon < e$; 当 $|e| < 1$ 时, $\varepsilon \approx e$ 。这样将控制量限制在低频范围内可以提高系统的鲁棒性。

取李雅普若夫函数为

$$V = \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{\Phi^T \Gamma^{-1} \Phi}{2J_g}, \quad (15)$$

式中 $\Gamma = \text{diag}(\gamma_1 \ \gamma_2 \ \gamma_3)$, 且 $\gamma_1 \ \gamma_2 \ \gamma_3$ 均大于零, 它们可以根据实验或仿真来选取。对 V 求导得

$$\dot{V} = -a\varepsilon^2 - \varepsilon^2 e^2 + \frac{1}{J_g} (\varepsilon \Phi^T W + \Phi^T \Gamma^{-1} \dot{\Phi}). \quad (16)$$

要使 $\dot{V} \leq 0$, 可取

$$\varepsilon \Phi^T W + \Phi^T \Gamma^{-1} \dot{\Phi} = 0, \quad (17)$$

由此可推得自适应律为

$$K(\varepsilon, t) = \int_0^t (\varepsilon \Gamma W) dt + K_0. \quad (18)$$

按照李雅普若夫方法设计的控制器保证全局稳定。而式(16)在平衡点附近总是小于零, 因此整个过程渐近稳定。

当 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 时, K 变为常阵, 收敛性考察是否存在 $\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi \rightarrow 0$ 。由于此时 W 向量中各元素线性独立, 而且通常情况下不为零, 因此能够收敛到 K^* 。

3 仿真与分析

下面是对一台 387.5 kW 的风力机在低于额定风速时的仿真, 风力机系统的参数如下: $J_r = 350\ 000$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), $J_g = 32$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), $R = 15$ m, $n = 28.78$, $B_s = 100$ $\text{N} \cdot \text{ms}/\text{rad}$, 切入风速、额定风速和切出风速分别是 4 m/s, 15 m/s, 22 m/s, $\rho = 1.25$ kg/m^3 。为了得到更好的控制效果, 在计算中, 可以对上面得到的风力机系统模型的一些参数 ($\lambda_{opt} = 7.0$, 风速在 10 m/s 时算得的) 作适当的处理, 它们的改变并不影响系统变量的输出值, 控制器的初始值选为 0.1 (也可以选为在最佳工作点时的值)。下面所有图形的横坐标均

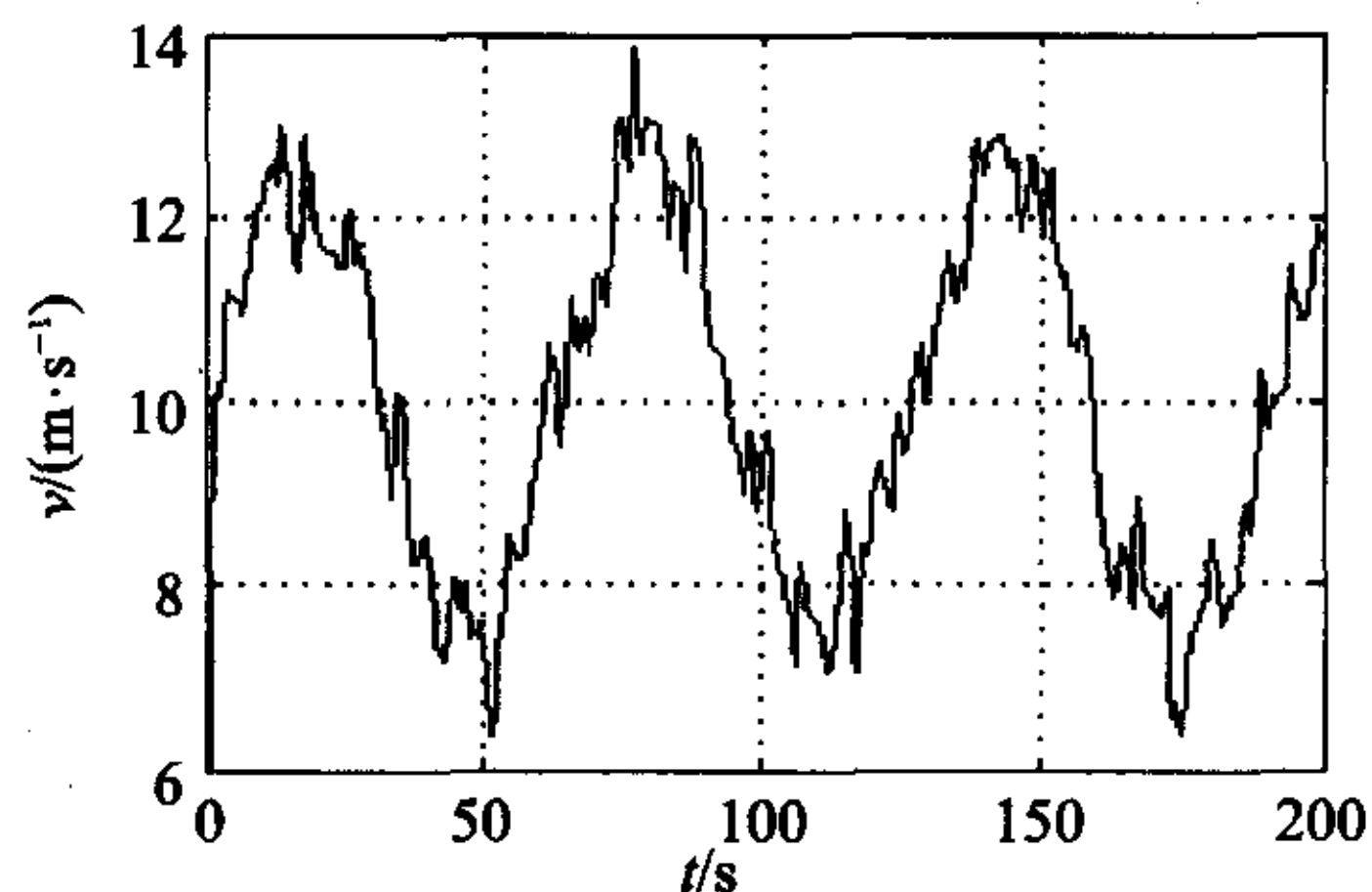


图3 输入的风速

Fig.3 Input wind speed

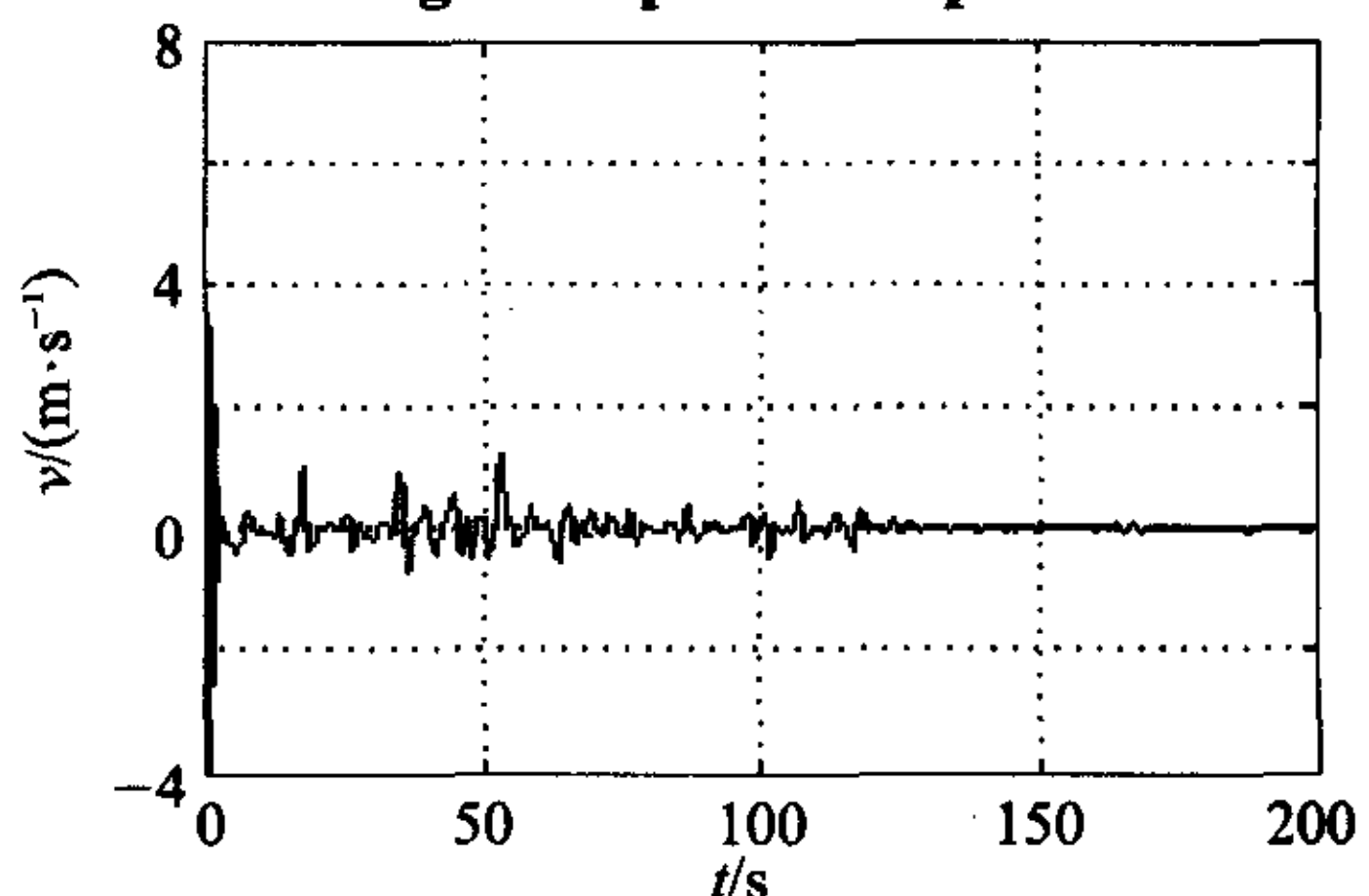


图4 系统输出误差

Fig.4 System output error

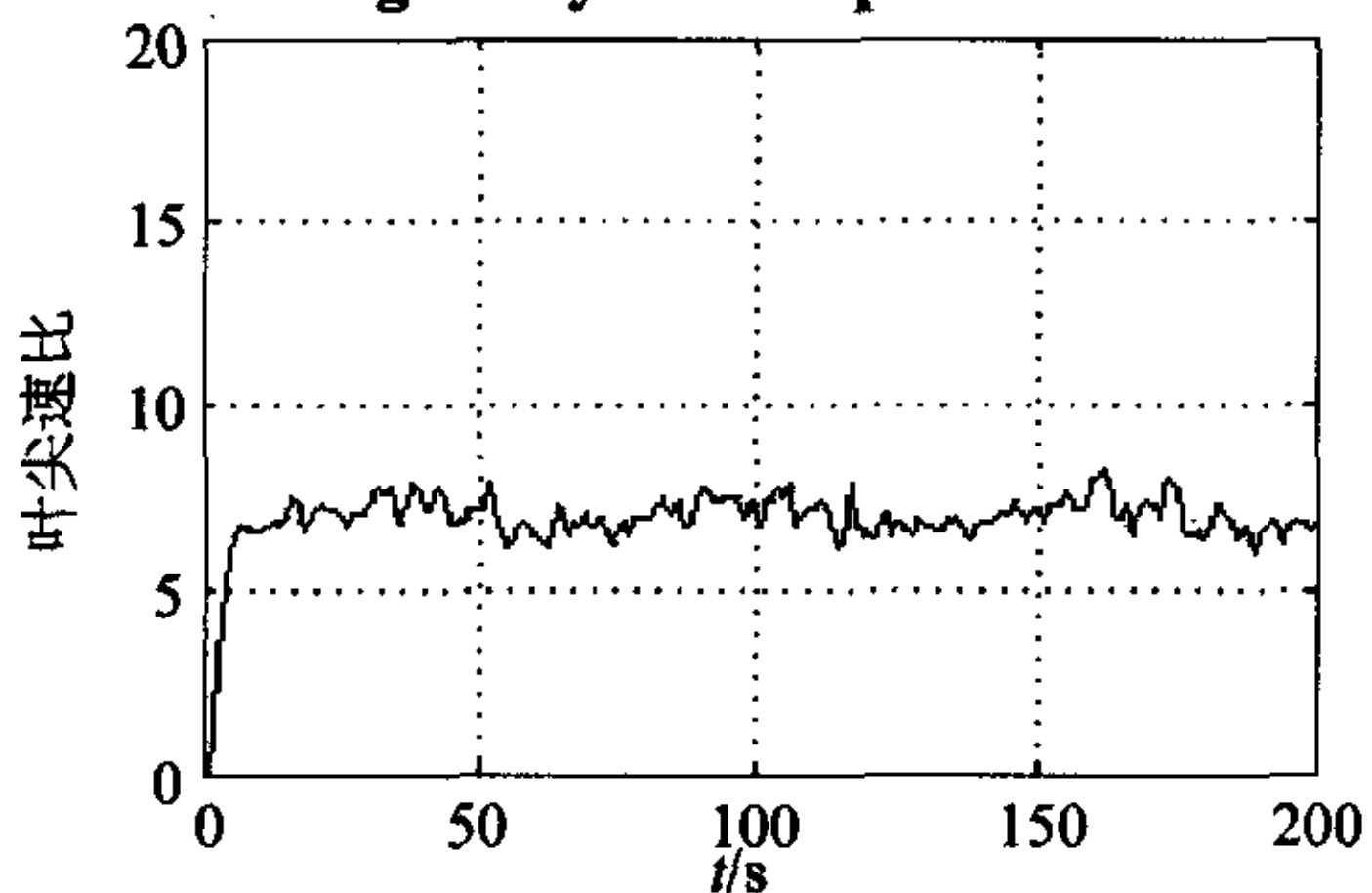


图5 叶尖速比

Fig.5 Tip-speed ratio

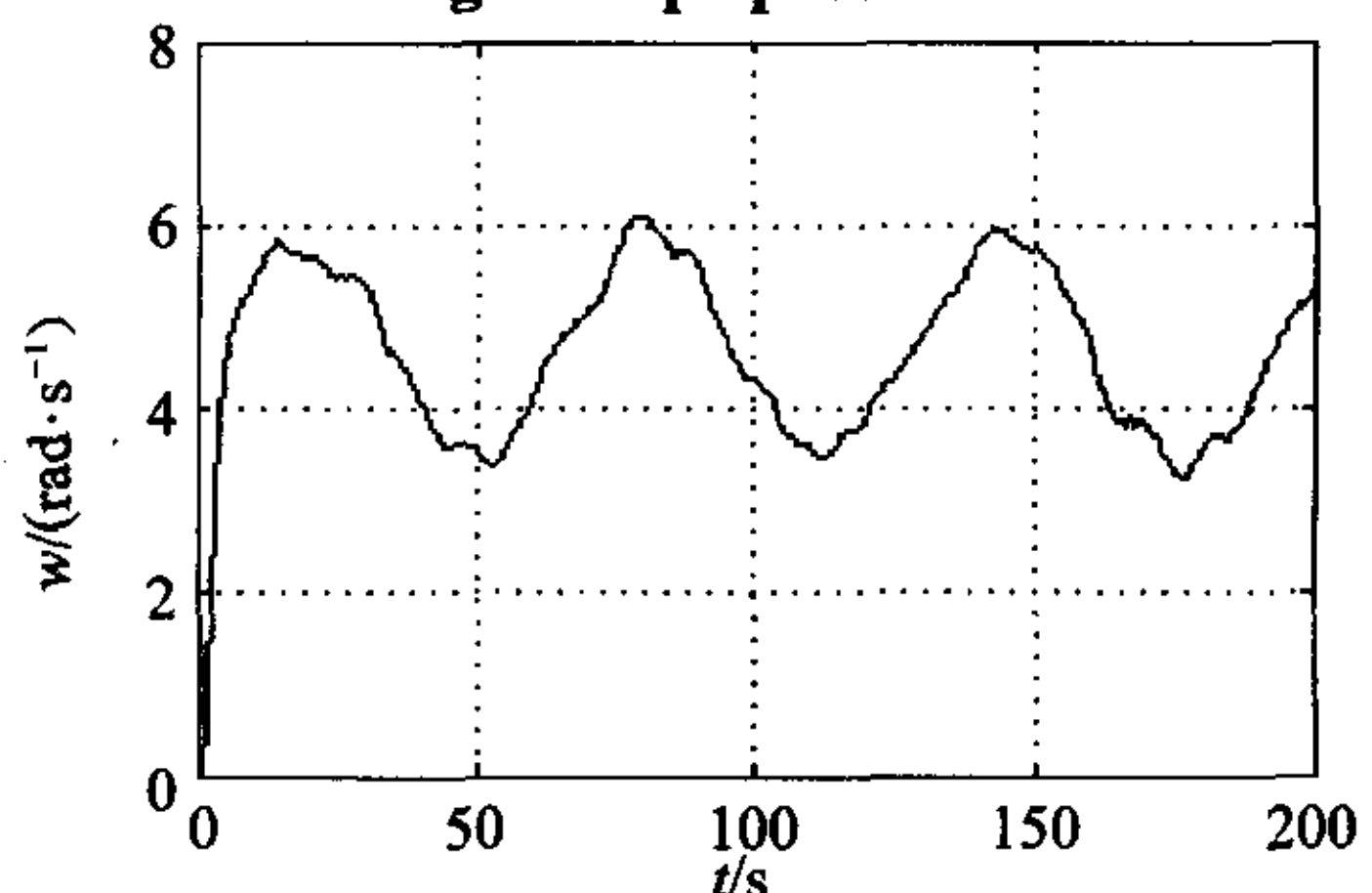


图6 风轮转速

Fig.6 Rotor angular speed

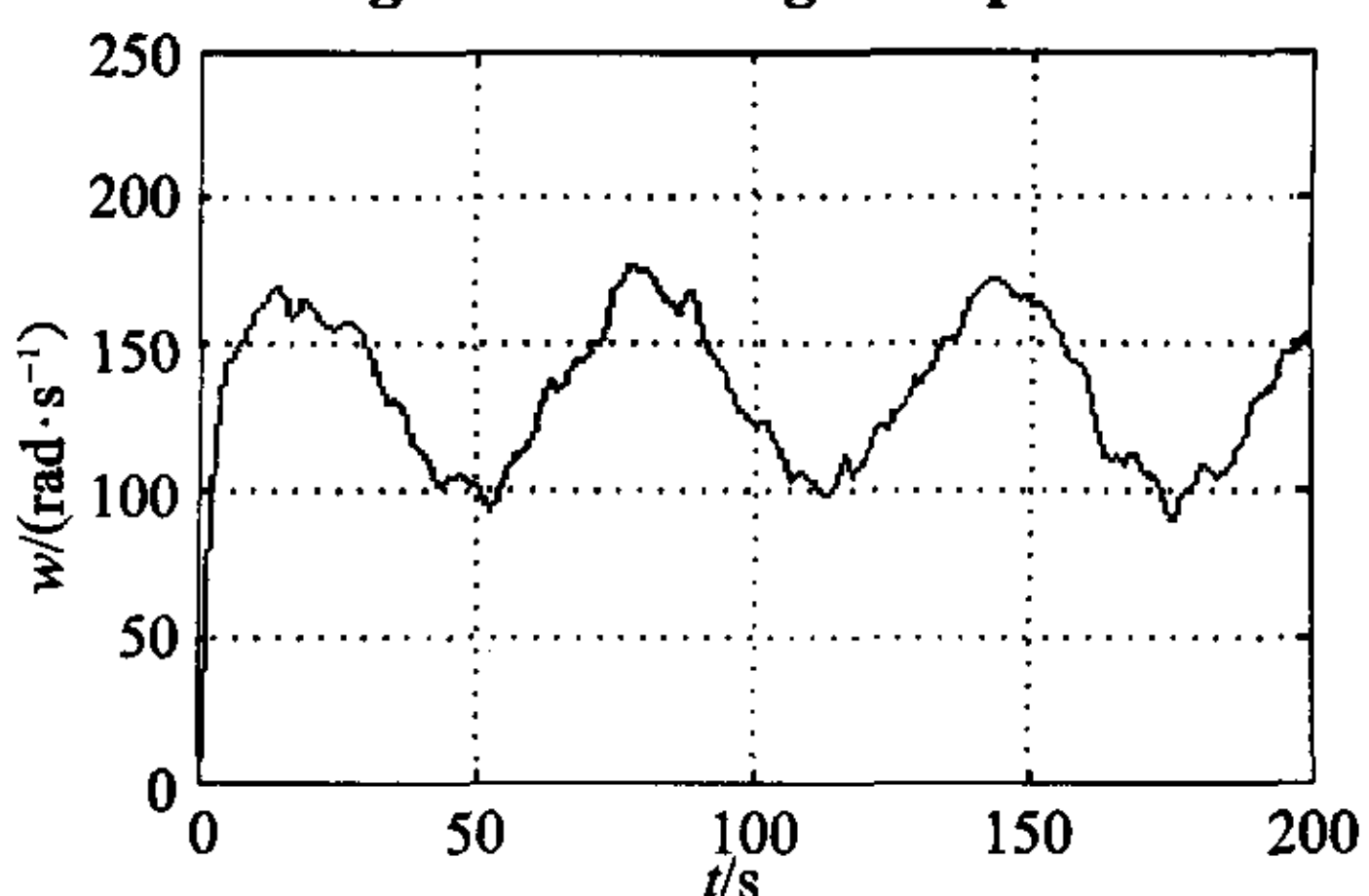


图7 发电机转速

Fig.7 Generator angular speed

为仿真时间 s 。当输入风速如图 3 所示的连续并有扰动时,系统输出误差、叶尖速比、风轮转速和发电机转速分别如图 4~7 所示。

系统模型中的一些参数是假定风速为 10 m/s 时计算得到的(有些作了适当的修改),从仿真结果我们可以很清楚地看出,在切入风速与额定风速之间,风轮转速和发电机转速都能很快地跟踪上期望的目标,输出误差很快地趋向于零。

风速是一个很不确定的变量,它的变化是随机而没有规律的。以上仿真是在风速变化不是很剧烈的情况下得到的结果。下面验证在切入风速与额定风速之间,若风速发生突变,所设计的模型参考自适应控制器是否还能很好地控制风力机系统。当输入风速如图 8 所示突变并有扰动时,系统输出误差、叶尖速比、风轮转速和发电机转速的仿真结果分别如图 9~12 所示。

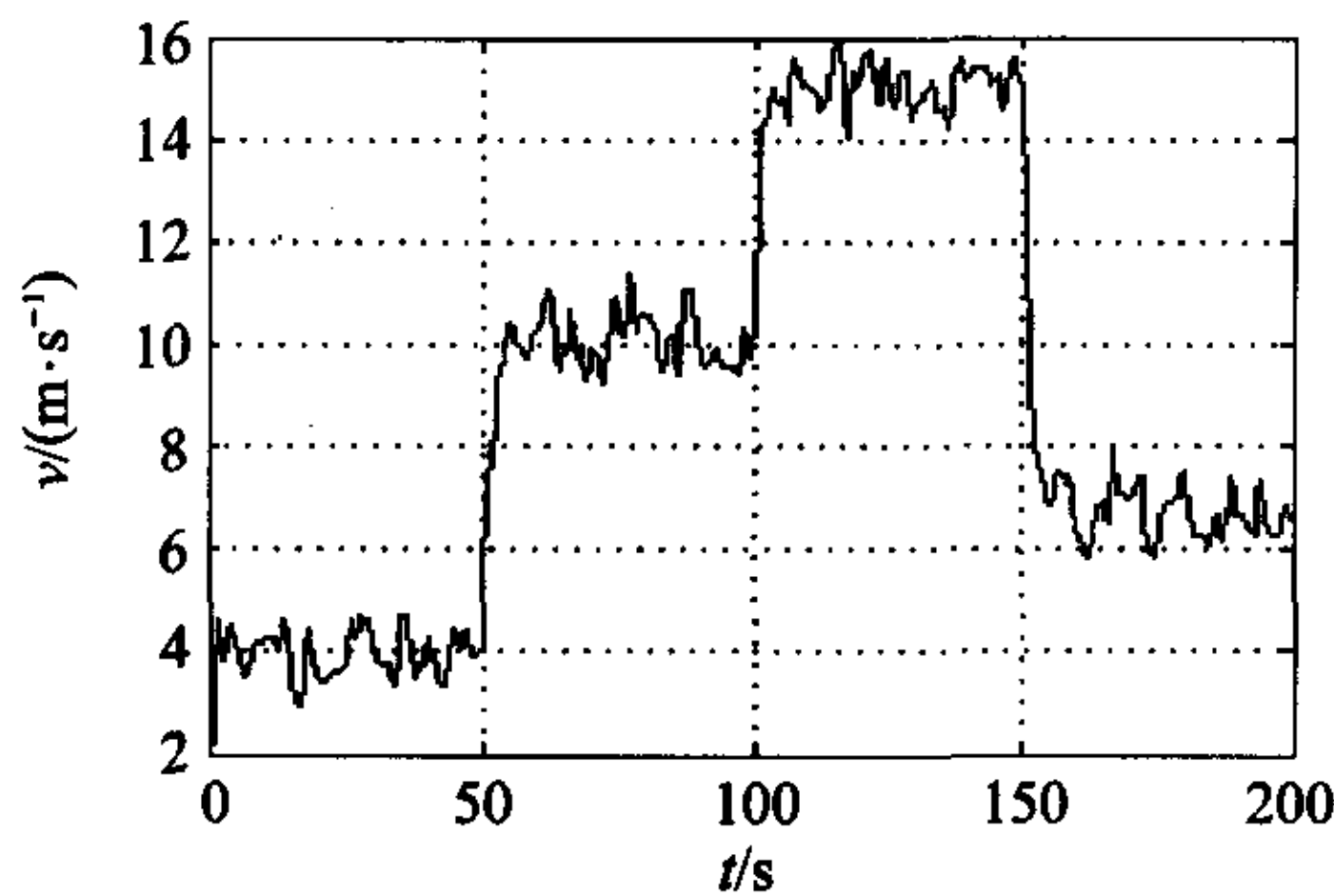


图 8 输入的风速

Fig.8 Input wind speed

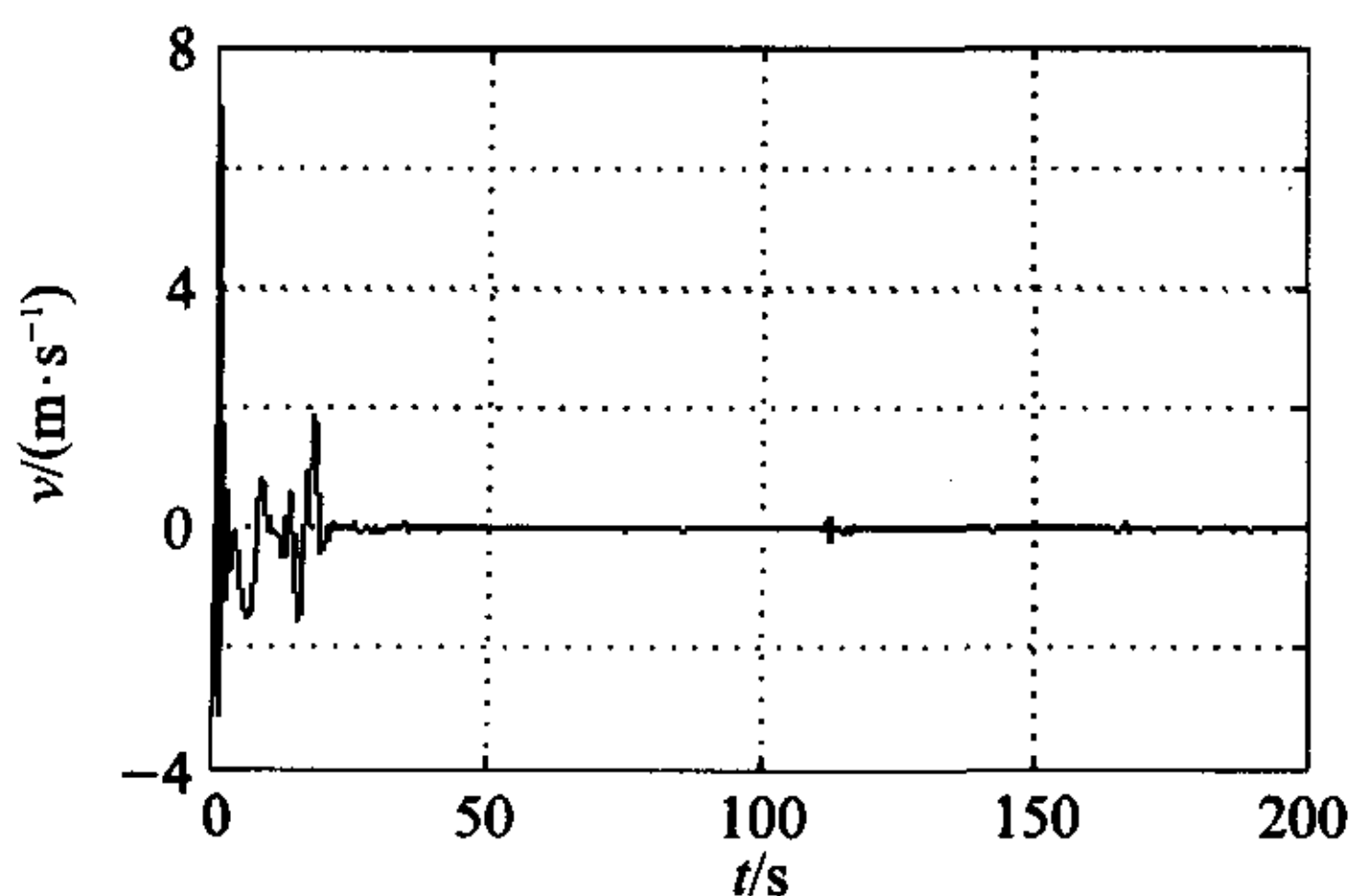


图 9 系统输出误差

Fig.9 System output error

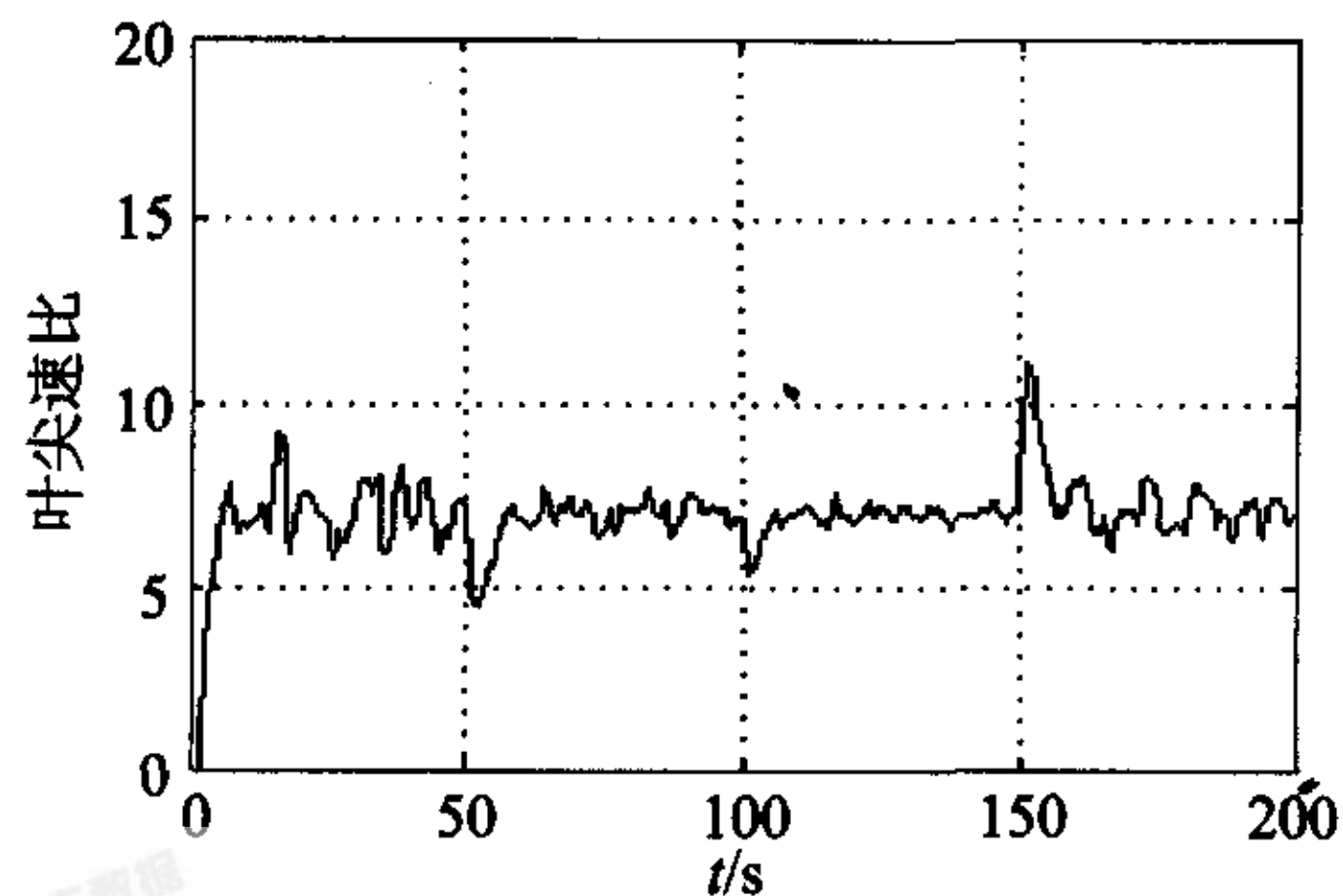


图 10 叶尖速比

Fig.10 Tip-speed ratio

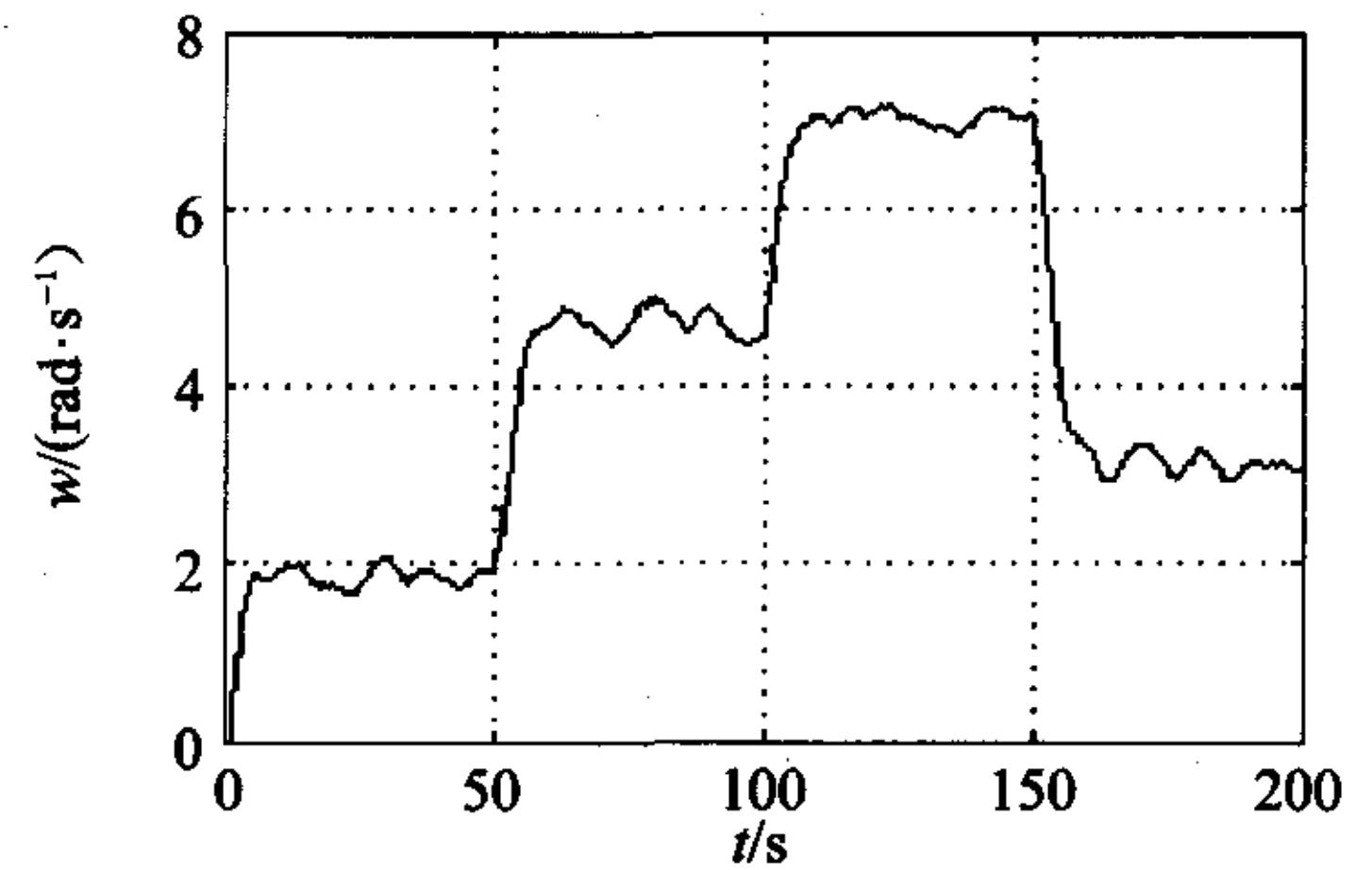


图 11 风轮转速

Fig.11 Rotor angular speed

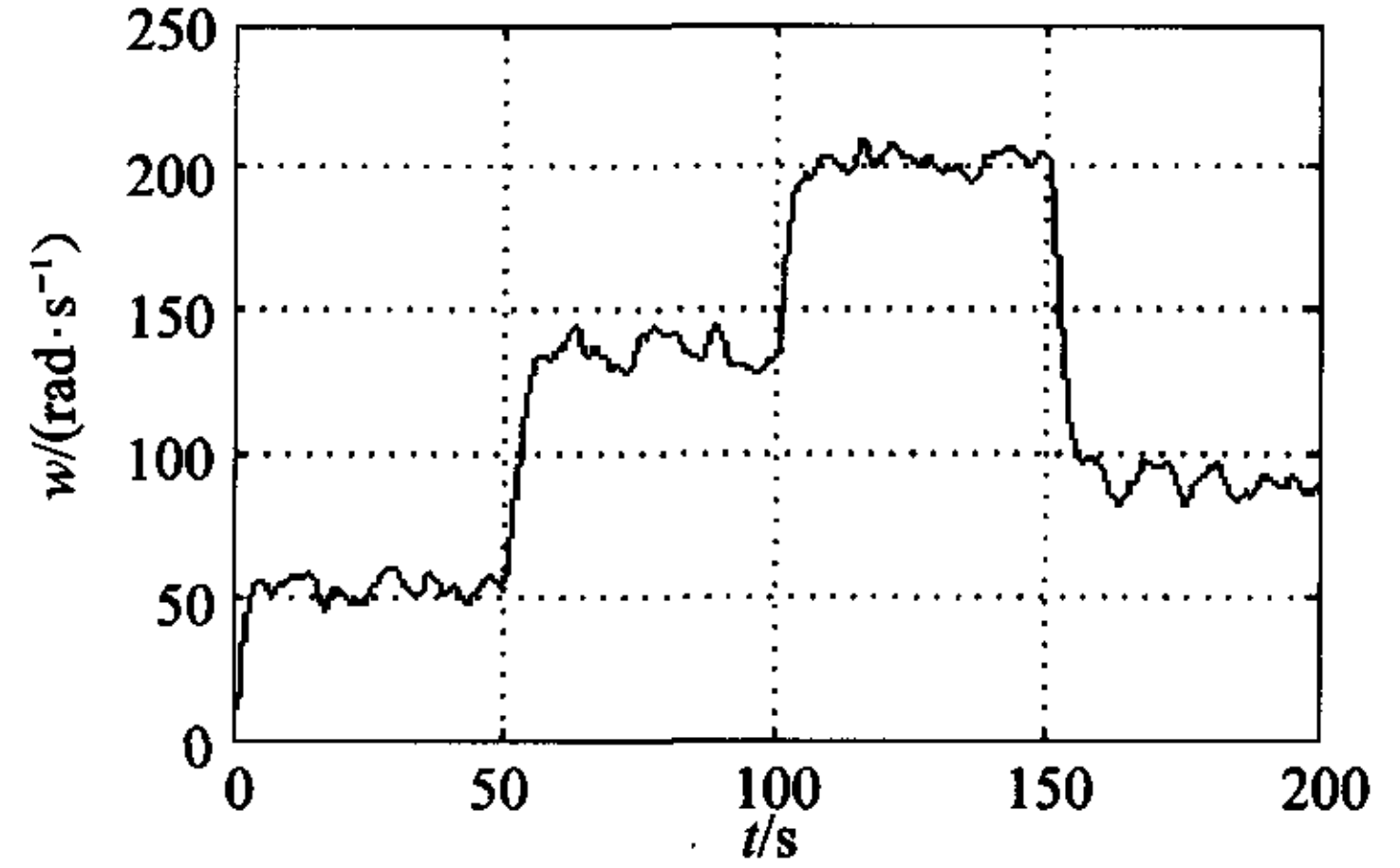


图 12 发电机转速

Fig.12 Generator angular speed

从图中可以看到,在切入风速与额定风速之间,即使风速发生突变,控制器仍然能很好地对系统进行控制。这说明自适应控制器的自适应能力很强,这也正是设计自适应控制器的目的。

4 结论

本文针对变速风力发电机设计了一种模型参考自适应控制器,并对变速风力发电机在额定风速下进行了仿真。仿真结果表明:在额定风速下,模型参考自适应方法能很好地控制风力机,使风力机风轮转速实时跟踪上风速的变化,保持叶尖速比不变,从而获得最大风能,达到了在额定风速下的控制目的。设计的自适应控制器的自适应能力很好。

附录:文中运算符号含义及单位:

T_a 为风轮气动转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$

T_e 为发电机电磁转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$

T_s 为弹性扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$

T_D 为阻尼扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$

w_r 为风轮转速, rad/s

w_g 为发电机转速, rad/s

J_r 为风轮惯性系数, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

J_g 为发电机惯性系数, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

K_s 为弹性系数, $\text{N}\cdot\text{ms/rad}$

B_s 为阻尼系数, $N \cdot ms/rad$

R 为风轮半径, m

S 为风轮的扫风面积, m^2

v 为上游风速, m/s

ρ 为空气密度, kg/m^3

λ 为风轮的叶尖速比, 即叶尖线速度与风速的比值

n 为齿轮传动比

参考文献:

- [1] Novak P, Ekelund T, Jovik I, et al. Modeling and control of variable-speed wind-turbine drive-system dynamics [J]. IEEE. Control Systems, 1995.
- [2] Song Y D, Dhinakaran B, Bao X Y. Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000,85.293-308.
- [3] Petros A Ioannou, Aniruddha Datta. Robust adaptive control: a unified approach [J]. Proceeding of the IEEE, 1991,79(12).
- [4] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] 吴士昌, 臧瀛芝. 自适应控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [6] 谢新民, 丁锋. 自适应控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [7] [法] Mohand Mokhtari, Michel Marie. MATLAB 与 SIMULINK 工程应用 [M]. 赵彦玲, 吴淑红译. 北京: 电子工业出版社, 2002.

(责任编辑: 王立新)



《华北电力大学学报》被下列检索工具刊 及文献数据库收录或为其来源刊

国外:

1. 美国《化学文摘》(CA)
2. 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
3. 英国《科学文摘》(SA)
4. 美国《剑桥科学文摘》(CSA)

国内:

1. 《全国报刊索引》
2. 《电力科技文摘》
3. 《中国机械工程文摘》
4. 《动力机械文摘》
5. 《中国学术期刊(光盘版)》
6. 《中文科技期刊数据库》
7. 《计算机应用文献数据库》
8. 《中国科技文献数据库》
9. 《中国科技论文统计与引文分析数据库》
10. 《中文科技期刊论文题录库》
11. 万方数据资源系统