

# 直驱型永磁同步风力发电机组中混沌运动的反步自适应控制\*

郑刚<sup>†</sup> 邹见效 徐红兵 秦钢

(电子科技大学自动化工程学院, 成都 611731)

(2010年8月20日收到; 2010年9月13日收到修改稿)

以直驱型永磁同步风力发电机为研究对象, 推导了发电机在参数不确定以及风速扰动情况下的数学模型, 验证了系统在某些参数及工作条件下会呈现出混沌属性. 并提出了直驱型永磁同步风力发电机混沌运动下的基于反步自适应控制算法, 并对其进行了仿真, 仿真结果表明, 所提出的算法对于具有参数不确定以及风速干扰的直驱型风力发电系统具有较好的鲁棒性.

**关键词:** 风力发电, 直驱型永磁同步风力发电机组, 混沌控制, 反步自适应控制

**PACS:** 05.45.Gg

## 1. 引言

目前风力发电机组的发电量在能源系统中的比重正在不断增加, 对风力发电机组可靠性, 稳定性和优化设计要求也在不断提高. 目前, 主流的变速型风力发电机组有两种: 双馈感应风力发电机组 (doubly fed induction generators, 简记为 DFIG) 和直驱型永磁同步风力发电机组 (direct-driven permanent magnet synchronous generators, 简记为 D-PMSG), 而国内外采用最多的变速风力发电机组是双馈变速风力发电机组<sup>[1]</sup>. 然而随着发电机组功率等级的升高, 增速齿轮箱的成本随着风力发电机组单机容量的不断增大而增大, 且易出现故障, 需要经常维护, 可靠性差<sup>[2]</sup>. 因此, 直驱型永磁风力发电机组的研发受到越来越多的关注. 该机型省去了增速齿轮箱, 大大减小了 D-PMSG 系统的机械噪声, 提高了可靠性; 此外, 永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, 简记为 PMSM) 的稳定性由于在某些参数以及工作条件下会出现混沌运动而受到广泛的关注. 其危害在于 D-PMSG 系统在发电过程中会出现转矩, 转速和输出功率的间歇振荡, 控制性能不稳定, 系统产生不规则的电磁噪

声<sup>[3,4]</sup>. 因此, PMSM 的混沌现象势必会使 D-PMSG 的输出功率产生较大的振荡和波动进而对电网产生较大的冲击.

近年来, 对混沌控制的研究是非线性科学领域中的热点之一. 自 OGY 控制方法提出以来, 现在已经提出了大量的混沌控制理论和方法<sup>[5]</sup>. 而针对 PMSM 特别是 D-PMSG 混沌属性的控制研究却相对较少. 文献[6]利用微分几何控制理论中的状态反馈准确线性化方法控制 PMSM 中的混沌运动, 该方法通过非线性坐标变换将非线性系统的状态方程准确地化为完全可控的线性系统, 这样准确线性化控制方法能够适应 PMSM 状态大范围的变化. 就控制实现而言, 由于系统考虑了泰勒级数的高阶项而增加了计算成本, 使得实现较困难. 文献[7]提出了采用纳入轨道和强迫迁徙方法控制 PMSM 中混沌的方法, 该控制策略在理论上虽然有效, 但是由于它需要系统轨道处于吸引域中时才能施加控制, 而对于吸引域以外的轨道必须设计其他的控制方法, 这样为 PMSM 设计及实现增加了难度. 文献[8]利用状态延迟反馈研究了 PMSM 中的混沌控制, 但是该方法不容易确定控制的周期目标轨道延迟关系, 并且不容易控制到预知的轨道. 此外, 目前对于直驱型风力发电机混沌控制的研究更是鲜有报道. 文

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60972107) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zg800705@163.com

献[1]采用滑模变结构控制对直驱型风力发电机进行控制,而 D-PMSG 的输出振荡最终会对电网产生破坏性的影响.此外,该文献在设计过程中,未将风速的干扰下系统的稳定输出作为控制指标,这样限制了该控制算法的实用性.

反步自适应控制方法在混沌系统中的应用得到了较大的应用<sup>[9-14]</sup>,但是针对 D-PMSG 的混沌属性,进行鲁棒稳定性设计的论文尚未见报道.本文以大功率直驱型风力发电机作为研究对象,推导了其数学模型,论证了 D-PMSG 的混沌属性,提出了 D-PMSG 在风速干扰下的反步自适应控制方法,并将该方法应用于整个直驱型风力发电机组中.仿真结果表明,该方法不仅可以很好地将精确模型未知的混沌系统控制到预期目标,响应速度快;而且在存在外界干扰的情况下,同样能够将该混沌系统控制到预期目标,控制鲁棒性好.

## 2. D-PMSG 的系统模型及分析

D-PMSG 的基本结构如图 1 所示.

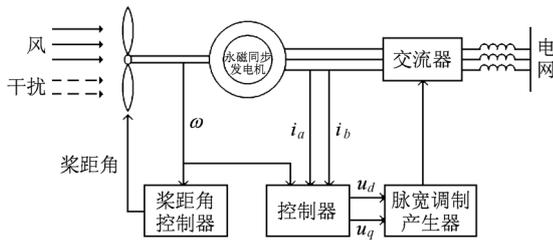


图 1 D-PMSG 的基本结构

直驱型风力发电机组由风力机,永磁同步发电机,变流器,控制系统及其他输变电装置和机械装置组成.其中,风力机将风能转化为机械能,永磁同步发电机将机械能转化为电能,变流器将电能馈入电网.风以速度  $V$  吹向风轮时,风轮转动.设风轮的扫风面积为  $A$ ,空气密度为  $\rho$ ,若风轮半径为  $R$ ,则风机吸收功率  $N_v$  为

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

考虑到(1)式中的风能不可能全部被风轮捕获,设风能利用系数为  $C_p$ ,风轮实际吸收的功率如下式所示:

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

而  $C_p$  为  $\lambda, \beta$  的函数,由此可以推出风轮输出转矩为

$$T_L = 0.5 \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 \omega. \quad (3)$$

其中,  $R$  为风轮半径(单位为 m),  $V$  为风速(单位为 m/s),  $\omega$  为风轮转速(单位为 rad/s),  $\lambda$  为叶尖速比,  $\beta$  为桨叶角度.此外,由(3)式可以看出,风速变化产生的扰动可以直接看做作用在气动转矩上进而转化为气动转矩的扰动.由于三相静止坐标系下永磁同步发电机数学模型中参数为变参数,因此矢量控制系统的设计一般采用如下  $d-q$  坐标系下的动态数学模型

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + n_p \omega i_q + \frac{1}{L} u_d, \quad (4)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - n_p \omega i_d - \frac{n_p \phi}{L} \omega + \frac{1}{L} u_q, \quad (5)$$

这里,  $i_d$  和  $i_q$  分别为发电机的  $d$  轴和  $q$  轴的电流,  $u_d$  和  $u_q$  分别为发电机  $d$  轴和  $q$  轴的电压,  $L$  是发电机  $d$  轴和  $q$  轴的电感,  $R$  为定子电阻,  $\omega$  为发电机转速,  $n_p$  为发电机转子极对数,  $\phi$  为发电机磁通量.

直驱型风力发电机的风轮转轴直接与发电机连接,其传动轴模型为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3n_p \phi}{2J} i_q - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_L}{J}, \quad (6)$$

其中,  $J$  为发电机等效转动惯量,  $B$  为发电机的转动黏滞系数.

## 3. D-PMSG 的混沌属性

当风速较低,接近于直驱型风力发电机的临界速度时, D-PMSG 系统将处于混沌运动状态,风力发电机组的输出功率,电压等参量将会出现振荡,这势必会严重危害 D-PMSG 系统的稳定工作以及危及电网,甚至导致 D-PMSG 系统的崩溃.选取参数  $L =$

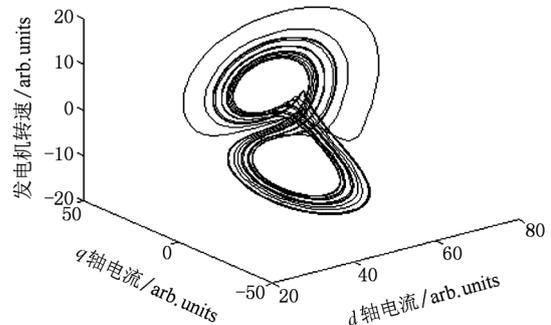


图 2 永磁同步发电机中的混沌吸引子

3 mH,  $R = 0.003 \Omega$ ,  $J = 8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $B = 0.1$ . 在气动转矩为 250—2500 N·m 之间进行试验, 发现 D-PMSG 系统呈现混沌状态, 如图 2—图 5 给出了当  $T_L = 250 \text{ N} \cdot \text{m}$  时, 混沌吸引子以及系统状态变量. 此外, 利用文献[15]计算得到直驱型风力发电机系统的李雅普诺夫指数为  $\lambda_1 = 13.0755$ ,  $\lambda_2 = -2.6467$ ,  $\lambda_3 = -26.8361$ .

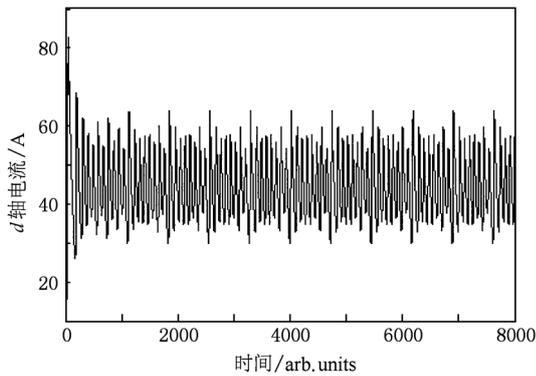


图3 d轴电流变化曲线

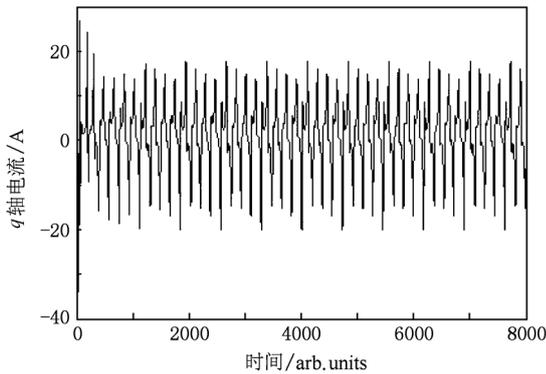


图4 q轴电流变化曲线

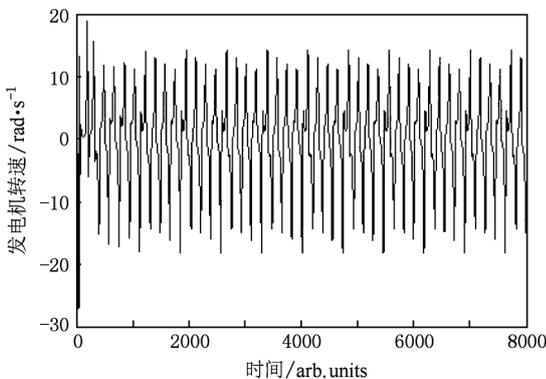


图5 发电机转速变化曲线

如图 6 可见, 系统在所选取参数下的确处于混沌状态. 由于系统在临界点的混沌属性, 即风力发电系统在工作状态时会有间歇性的震荡发生在扭矩, 转速上面, 这样就会导致发电机的输出功率产生震荡. 因此研究有效的方法控制和抑制这种混沌现象, 保证系统控制性能的稳定性, 并且设计系统在干扰的情况下的鲁棒控制显得尤为必要.

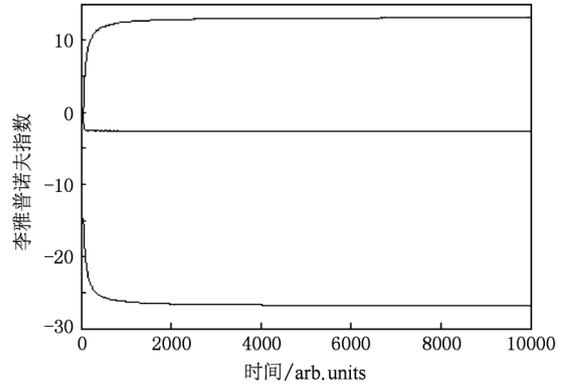


图6 李雅普诺夫指数

#### 4. D-PMSG 的反步自适应控制器设计

对于上述具有不确定参数和外部干扰的 D-PMSG 系统(4)—(6)式, 采用反步自适应控制方法来设计一个非线性控制器. 对于(4), (5)式, 考虑到发电机启动过程中电阻及转动黏性系数的变化, 引入了参数  $R$  和  $B$  的不确定性. 同时对于(6)式, 考虑到风速干扰引起转矩的变化, 同时也引入了参数  $T_L$  的不确定性:

$$\begin{aligned} \Delta R &= R - R_N, \\ \Delta B &= B - B_N, \\ \Delta T_L &= T_L - T_{LN}. \end{aligned} \quad (7)$$

这样, 具有不确定参数的 D-PMSG 系统可表示为

$$\dot{x} = f(x) + \Delta f(x) + g_1(x)u_d + g_2(x)u_q, \quad (8)$$

其中,  $x = (i_d, i_q, \omega)$ ,  $g_1 = \left(\frac{1}{L}, 0, 0\right)^T$ ,  $g_2 = \left(0, \frac{1}{L}, 0\right)^T$ ,

$$f(x) = \begin{pmatrix} -\frac{R_N}{L}i_d + P_w i_q \\ -\frac{R_N}{L}i_q - P_w i_d - \frac{n_p \phi}{L}\omega \\ \frac{3n_p \phi}{2J}i_q - \frac{B_N}{J}\omega - \frac{T_{LN}}{J} \end{pmatrix}$$

$$\Delta f(x) = \begin{pmatrix} -\frac{\Delta R_i}{L} i_d \\ -\frac{\Delta R_i}{L} i_q \\ -\frac{\Delta B}{J} \omega - \frac{\Delta T_L}{J} \end{pmatrix}.$$

对于 D-PMSG 风力发电系统,控制目标为在混沌属性下设计的控制器使发电机转速稳定在期望转速. 下面,对(8)式所描述的 D-PMSG 系统进行反步自适应控制设计,其步骤主要分为 3 步:

第 1 步考虑系统(8)是一个非线性系统,采用下述的变换:

$$\begin{aligned} z_1 &= h_1(x) = \omega, \\ z_2 &= L_r h_1(x), \\ z_3 &= h_2(x) = i_d. \end{aligned} \quad (9)$$

使(8)式有线性表达为

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_2 \\ L_r^2 h_1 \\ L_r h_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u}_d \\ \bar{u}_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \theta_1 \varphi_1 \\ \theta_2 \varphi_2 \\ \theta_3 \varphi_3 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta_1 \varphi_1 &= \begin{pmatrix} \frac{\Delta B}{J} & \frac{\Delta T_L}{J} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -w \\ -1 \end{pmatrix}, \\ \theta_2 \varphi_2 &= \begin{pmatrix} \frac{B_N \Delta B}{J^2} & \frac{B_N \Delta T_L}{J^2} & \frac{3P_{\Delta R}}{2JL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega \\ 1 \\ -i_q \end{pmatrix}, \\ \theta_3 \varphi_3 &= -\frac{\Delta R_i}{L} i_d, \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{u}_d \\ \bar{u}_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & L_{g2} L_r h_1 \\ L_{g1} h_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}.$$

定义系统的不确定参数:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_1 &= \theta_1 - \hat{\theta}_1, \\ \tilde{\theta}_2 &= \theta_2 - \hat{\theta}_2, \\ \tilde{\theta}_3 &= \theta_3 - \hat{\theta}_3. \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3$  分别为  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  的估计值,  $\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \tilde{\theta}_3$  是对应的估计误差.

第 2 步根据反步自适应控制设计思路,若把(10)式的  $z_2$  看做第一个方程的虚拟输入,取李亚普诺夫函数  $V_1 = \frac{1}{2} z_1^2$ , 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \cdot \dot{z}_1 \\ &= z_1 z_2 + z_1 \theta_1 \varphi_1. \end{aligned} \quad (12)$$

如果令

$$z_2 + \theta_1 \varphi_1 = -k_1 z_1,$$

并且假设  $\theta_1$  是一个确定的参数,选取  $z_2$  如下式:

$$z_2 = -k_1 z_1 - \theta_1 \varphi_1, \quad (13)$$

可得  $\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 \leq 0$ .

一步考虑  $\theta_1$  并不是确定参量,定义新的状态变量如下式:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= z_1, \\ \eta_2 &= z_2 - \alpha, \\ \eta_3 &= z_3. \end{aligned} \quad (14)$$

因此,考虑考虑  $\hat{\theta}_1$  作为  $\theta_1$  的估计,可得

$$\alpha = -k_1 e_1 - \hat{\theta}_1 \varphi_1. \quad (15)$$

这样,新的系统方程可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= \dot{z}_1 = z_2 + \theta_1 \varphi_1 = -k_1 \eta_1 + \eta_2 + \tilde{\theta}_1 \varphi_1, \\ \dot{\eta}_2 &= \dot{z}_2 + \dot{\alpha} = L_r^2 h_1 + \theta_2 \varphi_2 + \bar{u}_d - k_1 \dot{\eta}_1 + \dot{\hat{\theta}}_1 \varphi_1 \\ &= L_r^2 h_1 + \theta_2 \varphi_2 + \bar{u}_d + k_1 \eta_1^2 - k_1 \eta_1 \eta_2 \\ &\quad - k_1 \tilde{\theta}_1 \varphi_1 + \dot{\hat{\theta}}_1 \varphi_1, \\ \dot{\eta}_3 &= L_r h_2 + \theta_3 \varphi_3 + \bar{u}_q. \end{aligned} \quad (16)$$

第 3 步选取李雅普诺夫函数,进行控制律以及参数估计法则设计

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \eta_1^2 + \frac{1}{2} \eta_2^2 + \frac{1}{2} \eta_3^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{\theta}_1 \tilde{\theta}_1^T \\ &\quad + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{\theta}_2 \tilde{\theta}_2^T + \frac{1}{2\gamma_3} \tilde{\theta}_3 \tilde{\theta}_3^T, \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  是设计参数. 对(17)式求导可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \eta_1 \dot{\eta}_1 + \eta_2 \dot{\eta}_2 + \eta_3 \dot{\eta}_3 + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\theta}_1 \dot{\tilde{\theta}}_1^T \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\theta}_2 \dot{\tilde{\theta}}_2^T + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{\theta}_3 \dot{\tilde{\theta}}_3^T \\ &= -k_1 \eta_1^2 + \tilde{\theta}_1 (\eta_1 \varphi_1 + k_1 \eta_2 \varphi_1 + \frac{1}{\gamma_1} \dot{\tilde{\theta}}_1^T) \\ &\quad + \tilde{\theta}_2 (\eta_2 \varphi_2 + \frac{1}{\gamma_2} \dot{\tilde{\theta}}_2^T) + \tilde{\theta}_3 (\eta_3 \varphi_3 + \frac{1}{\gamma_3} \dot{\tilde{\theta}}_3^T) \\ &\quad + \eta_2 (\eta_1 + L_r^2 h_1 + \hat{\theta}_2 \varphi_2 + \bar{u}_d - k_1^2 \eta_1 + k_1 \eta_2 \\ &\quad + \hat{\theta}_1 \varphi_1) + \eta_3 (L_r h_2 + \hat{\theta}_3 \varphi_3 + \bar{u}_q). \end{aligned} \quad (18)$$

对(18)式进行分析,为了使  $\dot{V} \leq 0$ , 可以令(18)式中的第 2—4 项等于 0

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_1 &= \gamma_1 (\eta_1 + k_1 \eta_2) \varphi_1^T, \\ \hat{\theta}_2 &= \gamma_2 C_2 \varphi_2^T, \end{aligned}$$

$$\dot{\hat{\theta}}_3 = \gamma_3 \eta_3 \varphi_3^T, \quad (19)$$

并且令第5项等于  $-k_2 \eta_2^2$ , 第6项等于  $-k_3 \eta_3^2$ :

$$\begin{aligned} u_{\bar{d}} = & -k_2 \eta_2 - \eta_1 - L_1^2 h_1 - \hat{\theta}_2 \varphi_2 + k_1^2 \eta_1 \\ & - k_1 \eta_2 - \hat{\theta}_1 \varphi_1, \\ u_{\bar{q}} = & -k_3 \eta_3 - \eta_1 - L_1 h_2 - \hat{\theta}_3 \varphi_3, \end{aligned} \quad (20)$$

通过利亚普诺夫函数和  $\bar{u}_d, \bar{u}_q$  计算出 D-PMSG 的控制规律

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & L_{g2} L_1 h_1 \\ L_{g1} h_2 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \bar{u}_d \\ \bar{u}_q \end{pmatrix}. \quad (21)$$

下面,在(21)式的控制规律下分析 D-PMSG 系统的稳定性. 如果选取系统的控制律如(21)式和系统的参数估计法则如(20)式,那么

$$\dot{V} = -(k_1 \eta_1^2 + k_2 \eta_2^2 + k_3 \eta_3^2) \leq 0. \quad (22)$$

由(22)式可知

$$V(t) \leq V(0) \quad (t > 0). \quad (23)$$

定义

$$M(t) = k_1 \eta_1^2 + k_2 \eta_2^2 + k_3 \eta_3^2 \geq 0,$$

对(19)式进行积分可知

$$\begin{aligned} V(t) &= V(\eta(0), \tilde{\theta}(0)) + \int_0^t V(t) dt \\ &= V(\eta(0), \tilde{\theta}(0)) - \int_0^t M(t) dt, \end{aligned} \quad (24)$$

由(24)式可知

$$\int_0^t M(t) dt = V(\eta(0), \tilde{\theta}(0)) - V(t). \quad (25)$$

由于  $\dot{V} \leq 0$  并且  $V(t) > 0$ , 可得结论如下所示:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t M(t) dt < \infty. \quad (26)$$

根据文献[16]可知, D-PMSG 系统满足稳定性条件. 由此,在参数不确定情况及外界干扰存在的情况下,通过反步自适应控制方法设计的控制器可以使发电机的转速稳定在期望转速,即可以保证具有混沌属性的 D-PMSG 系统是稳定的.

### 5. 控制仿真结果与分析

对于控制律,在(20)式中,选取  $k_1 = k_2 = k_3 = 1$ , 再结合参数,选取给定输入在给定输入  $T_L = 250 \text{ N}\cdot\text{m}$  的情况下,通过 Matlab 仿真可以得到风速和 D-PMSG 系统各状态变量的变化情况如图 7—9 所示. 图 7 为  $i_d$  的变化情况,图 8 为  $i_q$  的变化情况,图 9 为  $\omega$  的变化情况. 从图中不难看出,状态变量经过

几个周期的振荡后出现稳定.

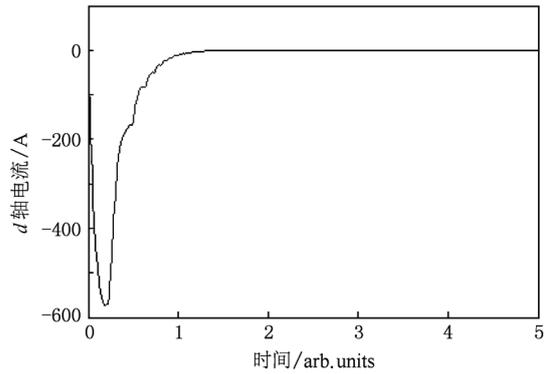


图 7 d 轴电流变化曲线

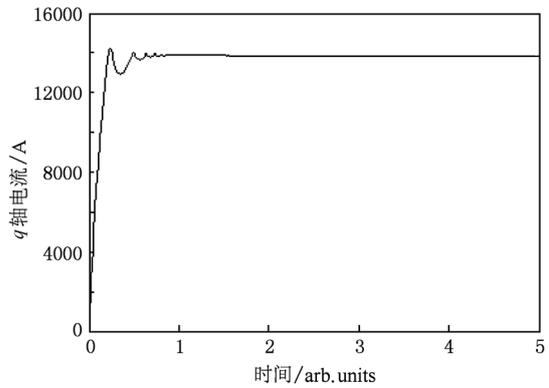


图 8 q 轴电流变化曲线

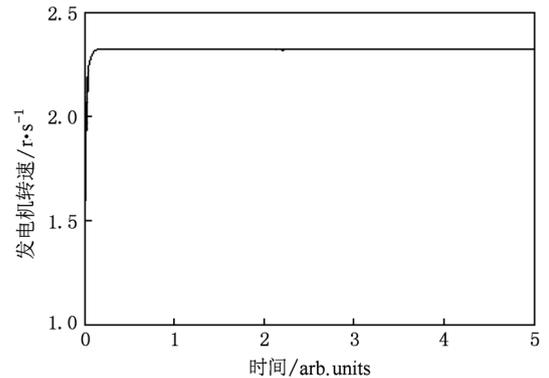


图 9 发电机转速变化曲线

D-PMSG 发电系统中,控制器的控制目标为实现风力发电机组功率的稳定输出,避免 D-PMSG 系统出现振荡. 通过在 Matlab/Simulink 环境下对风机控制系统进行仿真试验. 风力机和发电机的参数如下:输出额定功率 2 MW,风机半径 40 m,发电机定

子电感 3 mH, 定子电阻 0.01  $\Omega$ , 极对数 32, 磁通量 1.0 Wb, 发电机等效转动惯量 8000, 最佳叶尖速比 6.3, 最大风能利用系数 0.45, 风速采用均值为 18 m/s 的随机风, 如图 10 所示. 给出整个 D-PMSG 重要的运行指标: 机组输出功率, 发电机转速如图 11, 图 12. 机组输出功率稳定在 2 MW 附近, 发电机转速稳定在 2.3 rad/s 附近. 同时给出 D-PMSG 系统中 3 个状态变量的变化情况如图 12—14.

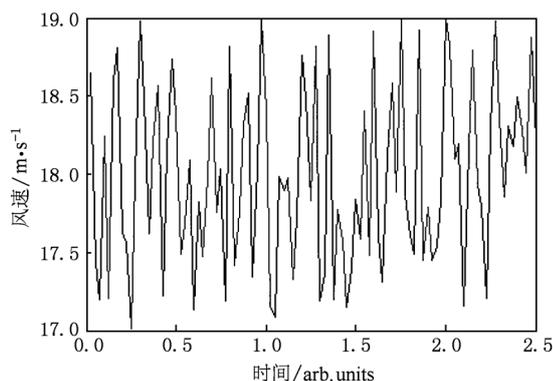


图 10 风速变化曲线

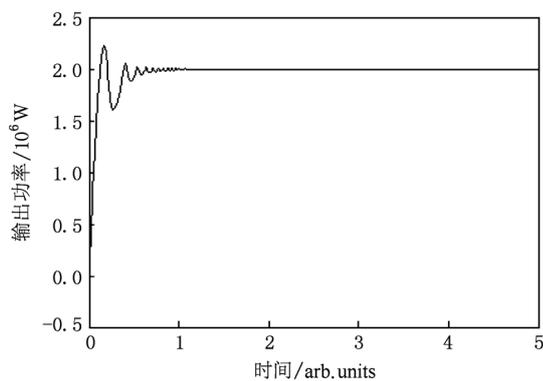


图 11 发电机输出功率变化曲线

通过仿真结果可以看出, 采用反步自适应控制方法实现 D-PMSG 系统在扰动下的鲁棒控制能对具有不确定参数的多变量非线性直驱型风力发电系统实现较好的控制.

## 6. 结 论

D-PMSG 中采用基于反步自适应控制算法可以在部分参数不确定的情况下保证 D-PMSG 系统稳定以及达到系统的预期控制目标. 该算法具有简单有效并具有良好的控制响应速度和扰动下的鲁棒性

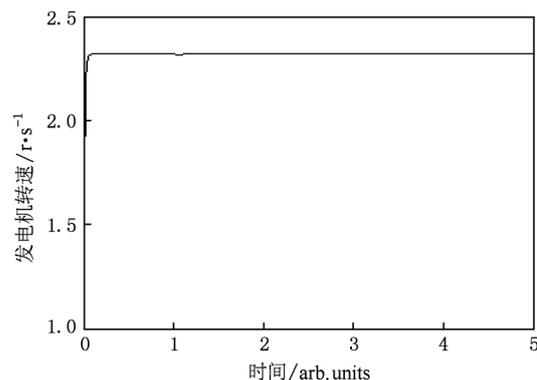


图 12 发电机转速变化曲线

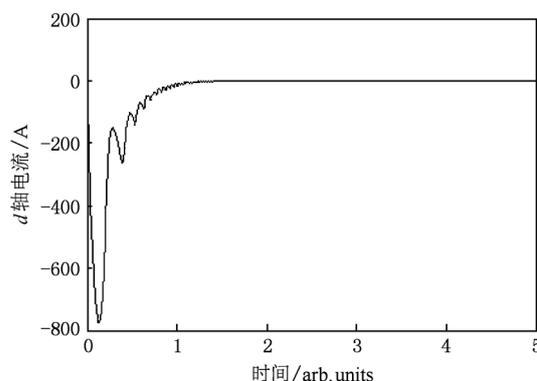


图 13 d轴电流变化曲线

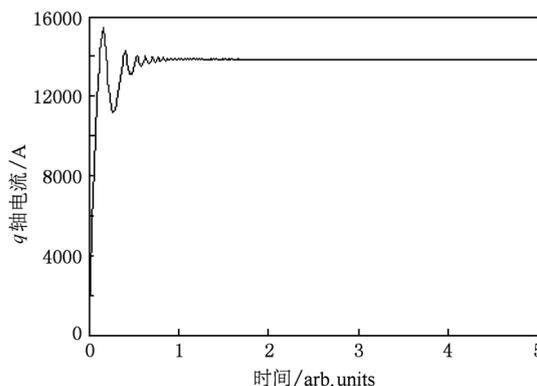


图 14 q轴电流变化曲线

的特点. 此外, 实现了对具有混沌特性的 D-PMSG 在风速干扰下的控制, 为直驱型风力发电机组运行过程中保证其稳定性和可靠性提供了依据. D-PMSG 特别是大功率 D-PMSG 的混沌控制策略及控制算法国内研究的较少, 有待进一步深入研究. 对于实际的风力发电系统, 其运行状况和参数不确定性以及

干扰更复杂. 因此, 研究在更复杂的条件下 D-PMSG 的混沌属性以及混沌控制问题是今后的研究及工作方向.

- [1] Yang G L, Li H G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7552 (in Chinese) [杨国良、李惠光 2009 物理学报 **58** 7552]
- [2] Amirat Y, Benbouzid M E H, Al-Ahmar E, Bensaker B, Turri S 2009 *Renewa. Sustain. Energ. Rev.* **13** 2629
- [3] Zhang B, Li Z, Mao Z Y, Pang M X 2001 *Proce. Chin. Soc. Electric. Engng.* **21** 40 (in Chinese) [张波、李忠、毛宗源、庞敏熙 2001 中国电机工程学报 **21** 40]
- [4] Li C L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8134 (in Chinese) [李春来 2009 物理学报 **58** 8134]
- [5] Li W D, Wang X Y 2009 *Techniq. Automat. Appl.* **28** 1 (in Chinese) [李卫东、王秀岩 2009 自动化技术与应用 **28** 1]
- [6] Wei D Q, Luo X S, Fang J Q, Wang B H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 54 (in Chinese) [韦笃取、罗晓曙、方锦清、汪秉宏 2006 物理学报 **55** 54]
- [7] Li Z, Zhang B, Mao Z Y 2002 *Contr. Theo. Appl.* **53** (in Chinese) [李忠、张波、毛宗源 2002 控制理论与应用 **53**]
- [8] Ren H P, Liu D, Li J 2003 *Proce. Chin. Soc. Electric. Engng.* **23** 175 (in Chinese) [任海鹏、刘丁、李洁 2003 中国电机工程学报 **23** 175]
- [9] Wang C, Ge S S 2000 *Proce. of the 39th IEEE Conference on Decision and Control Sydney, Aistrilia*, 12—15 December, 2000 **5** 4827
- [10] Mascolo S, Grassi G 1999 *Int. J. Bifur. Chaos* **9** 34
- [11] Tan X, Zhang J, Yang Y 2003 *Chaos, Solitons. Fract.* **16** 37
- [12] Guan X P, Chen C L, Fan Z P 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 0753 (in Chinese) [关新平、陈彩莲、范正平 2002 物理学报 **51** 0753]
- [13] Lv L, Guo Z A, Li Y, Xia X L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 95 (in Chinese) [吕翎、郭治安、李岩、夏晓岚 2007 物理学报 **56** 95]
- [14] Dang H G, Jiang H 2009 *J. Tianshui Norm. Univ.* **9** 5 (in Chinese) [党红刚、江浩 2009 天水师范学院学报 **9** 5]
- [15] He D H, Xu X J, Chen Y H 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 833 (in Chinese) [何岱海、徐健学、陈永红 2000 物理学报 **49** 833]
- [16] Slotine J 1991 *Applied Nonlinear Control* (New Jersey: Prentice-Hall) p123

# Adaptive backstepping control of chaotic property in direct-driveven permanent magnet synchronous generators for wind power \*

Zheng Gang<sup>†</sup> Zou Jian-Xiao Xu Hong-Bing Qin Gang

(*University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

(Received 20 August 2010; revised manuscript received 13 September 2010)

## Abstract

In this paper, a mathematical model of direct-driven permanent magnet synchronous generator(D-PMSG) is derived with taking into account the parametric uncertainty and the disturbance of wind. And also the chaotic property under the condition of certain system parameters and a certain operation is verified. Furthermore, the adaptive backstepping approach is designed to compensate the parametric uncertainty and wind disturbance. The simulation results show that the proposed controller for D-PMSG is effective and robust against the parametric uncertainty and the wind disturbance.

**Keywords:** wind power, direct-driveven permanent magnet synchronous generators, control of chaos, backstepping

**PACS:** 05.45.Gg

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60972107).

<sup>†</sup> E-mail: zg800705@163.com