

直驱式永磁同步风力发电机中混沌运动的滑模变结构控制^{*}

杨国良[†] 李惠光

(燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

(2009 年 2 月 21 日收到 2009 年 3 月 18 日收到修改稿)

以直驱式永磁同步风力发电机(D-PMSG)作为研究对象,推导了其数学模型,论证了在某些参数及工作条件下会出现混沌运动,提出了 D-PMSG 混沌运动的滑模变结构控制方法,通过控制桨距角 β 来实现.针对风力机系统的非线性、参数变化等特性,根据风力机机理,基于一定假设得到风力机在某一工况点线性模型,进而提出滑模变结构控制方案,充分利用变结构控制对被控对象的模型误差、对象参数的变化以及外部干扰有极佳的不敏感性的优点.仿真结果表明所提出控制方案的有效性,控制响应速度快,控制鲁棒性好,能适用于系统具有不确定性参数情形等优点.研究结果为直驱式风力发电系统的混沌控制应用提供了有价值的参考.

关键词:风力发电,直驱式永磁同步风力发电机组(D-PMSG),混沌控制,滑模变结构控制

PACC:0545,8610D

1. 引言

风力发电是一种很有潜力的可再生能源,10 多年来得到了快速的发展.目前主流变速风力发电机组有 2 种:双馈感应风力发电机组和直驱永磁同步风力发电机组.国内外对基于双馈感应发电机(doubly fed induction generators,DFIG)的变速风力发电技术的研究很多,已经发展得很成熟.关于直驱永磁同步风力发电机组(D-PMSG)的研究则相对较少,但其以效率高、噪声小、发电机结构简单和维护工作量小等特点,在风力发电领域受到了越来越多的重视.

近年来,永磁同步电动机(PMSM)的稳定性、可靠性研究受到了人们广泛关注,这是由于 PMSM 在某些参数及工作条件下会出现混沌运动,其主要表现为转矩和转速的间歇振荡,控制性能的不稳定、系统不规则的电磁噪声等^[1,2].电机中混沌现象的存在严重影响 PMSM 的稳定工作,因此如何控制和消除这种混沌现象已成为人们所关注的研究课题.由此可以推想,直驱永磁同步风力发电机在某些参数及工作条件下会不会出现混沌运动?本文对此进行了数学模型的推导,得出了结论并且提出了相应的混

沌控制方法.

混沌控制是非线性科学研究领域中的热门之一.自 1990 年 OGY 控制方法的提出,现已提出了大量的混沌控制理论和方法^[3-5],然而其中很多方法不一定都能直接运用到控制 PMSM 的混沌运动.至今,有关 PMSM 混沌运动的控制研究报道尚不多^[6-8],且控制性能还不够完善,与工程的实际控制需要还有一定的差距.文献 6 采用纳入轨道和强迁徙方法控制 PMSM 的混沌现象,该方法需系统轨道处于吸引域附近才能施加控制策略,控制策略较被动,控制速度较慢,且从工程实现的角度来看,选择负载转矩作为控制量是很难实现的.文献 7 利用状态延迟反馈研究 PMSM 中的混沌控制,该控制方法延迟时间不易确定,控制目标必须为系统的不动点或周期轨道,且这些不动点或周期轨道不可预知,因此无法实现所期望的目标轨道.文献 8 选择电机直轴和交轴电压作为控制量,实施部分解耦的控制策略,控制方法能实现对电机转速任意目标的稳定控制,但该方法存在着对两个电压同时施加控制,因此控制代价较高.

滑模变结构控制方法具有算法简单、抗干扰性能好、易于在线实现且可适用于众多具有不确定性

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号:50837003),河北省教育厅自然科学研究计划项目(批准号:Z2008474)资助的课题.

[†] E-mail: y99ygl@yahoo.com.cn

系统参数的多变量非线性受控对象等优点.近 20 年来,随着计算机技术和大功率电子切换器件的迅速发展,滑模变结构控制技术愈受到国内外控制界的广泛重视^[9,10].采用滑模变结构实现混沌控制已有研究报告^[11,12].本文以直驱式永磁同步风力发电机作为研究对象,推导了其数学模型,论证了在某些参数及工作条件下会出现混沌运动.提出了 D-PMSG 混沌运动的滑模变结构控制方法.针对风力发电机的变桨距系统采用滑模变结构鲁棒控制方案.仿真结果表明,该方法具有控制时刻任意加入,不仅能实现对 D-PMSG 混沌吸引域内外的任意目标轨道稳定控制,而且控制响应速度快,控制鲁棒性好,能适用于系统具有不确定性参数情形等优点.研究结果为直驱式风

力发电系统的混沌控制应用提供了有价值的参考.

2. 直驱式 PMSG 的系统模型及其混沌特性

直驱式永磁同步风力发电系统的基本结构如图 1 所示.可分为气动设备部分和同步发电机与整流逆变部分.气动设备输入部分包括风速 v 、叶片桨距角 β 及转子转速 ω_r .采用伺服机构可以调节叶片桨距角 β ;同步发电机与整流逆变部分包括:PMSG 永磁同步风力发电机;battery 储能蓄电池;定子侧和网侧变换器均由六个 IGBT 管桥式联接组成.网侧变换器和电网之间的电感和电容组成 LC 滤波器.

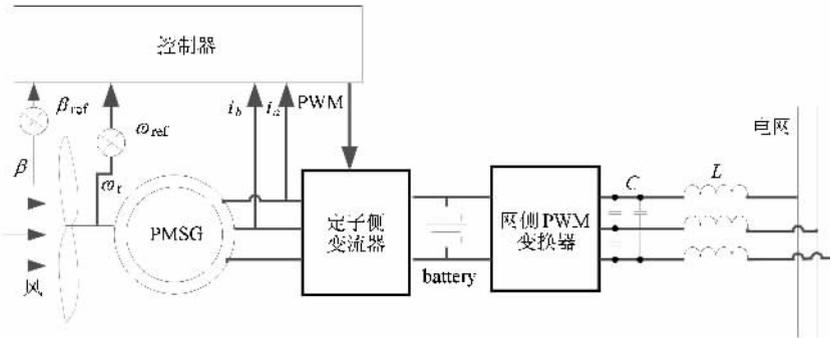


图 1 直驱式永磁同步风力发电系统结构原理图

叶轮转矩由下式给出:

$$T_t = 0.5 C_{q_0} \rho v \pi R^3, \quad (1)$$

$$C_{q_0} = f(\omega_t, v, \beta), \quad (2)$$

式中 ρ 为空气密度; v 为风速; R 为叶轮半径; C_{q_0} 为转矩系数; ω_t 为叶轮角速度; β 为桨距角.

在高速区, $\beta = 0$ 时获得 $C_{q_{max}}$,桨距角增加使 C_{q_0} 值降低,致系统的性能变坏;在低风速状态下,调节桨距角也可以用来提高 C_{q_0} 值.调节桨距角同样也可以在高风速下通过降低叶轮的空气动力学性能来限制功率输出.

C_{q_0} 和输出功率系数 C_p 二者有直接的联系:

$$C_p = \lambda C_{q_0}, \quad (3)$$

式中 λ 为叶尖速比,由下式给出:

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v}. \quad (4)$$

在给定风速条件下的机械输出能量完全受风轮的顶点速度率(TSR)的影响.在给定风速的条件下,最大风能能量变换功效发生在最佳 TSR 点.因此,当风速改变时,风轮的转子速率需要相应的改变以

保持最佳 TSR,从而有效从风源中吸收最大能量.

因此风力机输出的功率为

$$P_T = 0.5 \pi R^5 \rho \frac{C_p}{\lambda^3} \omega_t^3. \quad (5)$$

在 dq 同步旋转坐标系下建立的永磁同步发电机组数学模型^[13]为

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R_a}{L_d} i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} u_d, \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R_a}{L_q} i_q - \omega_e \left(\frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{1}{L_q} \lambda_0 \right) \\ &\quad + \frac{1}{L_q} u_q, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 i_d 和 i_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电流; L_d 和 L_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电感; R_a 为定子电阻; ω_e 为电角频率, $\omega_e = n_p \omega_g$; n_p 为发电机转子的极对数; λ_0 为永磁体的磁链; i_{u_d} 和 i_{u_q} 分别为 u_g 的 d 轴和 q 轴分量; J_{eq} 为机组的等效转动惯量; B_m 为转动黏滞系数; T_e 为电磁转矩; ω_g 为发电机转子

的转速,且 $\omega_g = \omega_w$.

PMSG 的电磁转矩表达式可简化为

$$T_e = 1.5 n_p i_d \lambda_0. \quad (7)$$

假设发电机 d 轴和 q 轴电感相等,即 $L_d = L_q = L$,经过无量纲变换的均匀气隙的 PMSG 数学模型为^[14]

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} &= -\tilde{i}_d + \tilde{\omega}_g \tilde{i}_q + \tilde{u}_d, \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} &= -\tilde{i}_q - \tilde{\omega}_g \tilde{i}_d + \gamma \tilde{\omega}_g + \tilde{u}_q, \\ \frac{d\tilde{\omega}_g}{dt} &= \sigma (\tilde{i}_q - \tilde{\omega}_g) - \tilde{T}_w, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 \tilde{i}_d , \tilde{i}_q , $\tilde{\omega}_g$ 分别为经过变换的直流电流、交轴电流和发电机角速度; \tilde{u}_d , \tilde{u}_q 和 \tilde{T}_w 分别为经过变换的 d, q 轴电压和风力机转矩; σ 和 γ 为系统参数.

若设 $x = \tilde{i}_d$, $y = \tilde{i}_q$, $z = \tilde{\omega}_g$, 则(8)式可写为

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -x + yz + \tilde{u}_d, \\ \frac{dy}{dt} &= -y - xz + \gamma z + \tilde{u}_q, \\ \frac{dz}{dt} &= \sigma(y - z) - \tilde{T}_w. \end{aligned} \quad (9)$$

取 $\tilde{u}_d = -0.542$, $\tilde{u}_q = 0.824$, $\tilde{T}_w = 2.3$, $\sigma = 16$, $\gamma = 45.92$ ($x(0), y(0), z(0) = (20, 0.1, -5)$), 采用四阶龙格-库塔算法,取积分步长 $\Delta t = 0.01$, 双精度数值求解(9)式,系统呈现混沌状态.混沌吸引子如图2所示(其中 x, y, z 无量纲).

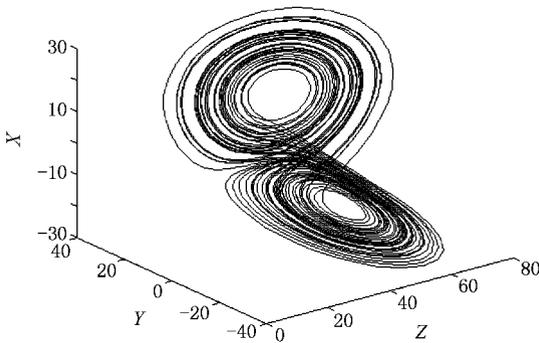


图2 永磁同步发电机中的混沌吸引子

当风力机速度较低接近于 PMSG 发电的临界速度,且其他参数匹配的条件下,系统将处于混沌运动状态, PMSG 出现无规则振荡,频率忽大忽小,电压电流忽高忽低,这将严重危及系统的稳定工作,甚至会导致机电系统的崩溃,因此必须研究采取有效的

方法控制和消除这种混沌现象.

3. PMSG 混沌运动的滑模变结构控制

由风力机运行原理,对于风力发电系统的状态表达,可以用桨距角 β 作为系统的一个可控确定性输入信号,风速 v 可以看作系统的不可控输入.根据某风力机实际数据,在一定假设条件下,并在某一工况点线性化,利用预报误差法忽略其随机扰动项.考虑机械传动系统的柔性,可得到某风力机的状态空间表达式

$$\dot{x} = Ax + Bu + e, \quad (10)$$

式中 $x \in R^n$, $u \in R^m$. 选取切换函数为 $s = Cx$, C 为 $m \times n$ 待定系数矩阵.当系统进入滑模态时控制为等效控制 u_{eq} ,代入(10)式得

$$\dot{s} = Cx - C(Ax + Bu_{eq}) = 0. \quad (11)$$

若 $[CB]$ 满秩,可解也等效控制为

$$u_{eq} = -[CB]^{-1}CAx. \quad (12)$$

为了保证由状态空间任意位置运动点在有限时间内到达切换面的要求,需要对趋近运动的具体轨迹做一些限制.因此,实际控制律为等效控制加切换控制.选取切换控制律为指数趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \quad \varepsilon > 0, k > 0. \quad (13)$$

使趋近速度从一个较大值逐步减小到零,这样不仅缩短趋近时间,而且使运动点到达切换面时速度很小.总的变结构控制规律可为

$$u = -(CB)^{-1}(CAx + Ws + K \operatorname{sign}(s)), \quad (14)$$

式中 $K = \operatorname{diag}(k_i)$, $W = \operatorname{diag}(w_i)$ ($k_i > 0, w_i \geq 0$), CB 为可逆方阵.

因此设计的主要问题是设计适当的切换系数矩阵 C ,使得滑动模运动具有良好的动态特性,且 CB 可逆.具有良好动态特性的滑模面设计如下^[15]:

因为 $\operatorname{rank}(B) = m, m < n$,易作线性变换 J 使 B 矩阵可分解为

$$JB = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \det B_2 \neq 0, \text{ 即 } \operatorname{rank} B_2 = m,$$

即对(10)式存在变换阵 $x = J^{-1}q$,使(10)式化为

$$\dot{q} = JAJ^{-1}q + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u. \quad (15)$$

进一步地,对于(15)式则存在

$$T_1^{-1} = \begin{bmatrix} I_{n-m} & -B_1 B_2^{-1} \\ 0 & I_m \end{bmatrix},$$

使

$$T_1^{-1}B = \begin{bmatrix} I_{n-m} & -B_1B_2^{-1} \\ 0 & I_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix}.$$

也就是说,存在坐标变换 $x = TZ$ 使(10)式化为下列形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} u, \quad (16)$$

式中 $z_1 \in R^{n-m}$, $z_2 \in R^m$; B_2 为 $m \times n$ 可逆方阵.

$$x = J^{-1}q = J^{-1}T_1z, T = J^{-1}T_1,$$

又因为

$$T_1^{-1} = \begin{bmatrix} I_{n-m} & -B_1B_2^{-1} \\ 0 & I_m \end{bmatrix},$$

$$(J^{-1}T_1)^{-1}B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix},$$

则

$$(J^{-1}T_1)^{-1}A(J^{-1}T) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}.$$

在此变换下,切换面为

$$s = CTz = C_1z_1 + C_2z_2 = 0. \quad (17)$$

在此基础上,若再设 C_2 为 $m \times m$ 的正则矩阵,由下列变换:

$$\begin{aligned} z_1 &= z_1, \\ z_2 &= C_2^{-1}s - C_2^{-1}C_1z_1, \end{aligned}$$

可以得到

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= (A_{11} - A_{12}C_2^{-1}C_1)Z_1 + A_{12}C_2^{-1}s, \\ \dot{s} &= [(C_1A_{11} + C_2A_{21}) - (C_1A_{12} + C_2A_{22})C_2^{-1}C_1]Z_1 \\ &\quad + (C_1A_{12} + C_2A_{22})C_2^{-1}s + C_2B_2u. \end{aligned} \quad (18)$$

当系统到达切换面时,有

$$s = 0, \dot{s} = 0, \dot{z}_1 = (A_{11} - A_{12}K)z_1, K = C_2^{-1}C_1.$$

于是,线性系统的滑动模态可视为由(18)式描述的具有反馈式的 $n-m$ 维子系统.可证明 (A, B) 可控时 (A_{11}, A_{12}) 也必为可控的.对该子系统可根据线性反馈设计方法任意设置极点,从而达到预期的良好动态特性.并且,由于 z_2 可由 z_1 线性表示出来,只要 z_1 以适当的指数衰减率趋向于零,则 z_2 也以同样的指数衰减率趋向于零.

由于 K 可由极点配置任意确定,此时

$$C = [C_1 \quad C_2] = C_2[K \quad I_m],$$

其中为方便起见可选取 $C_2 = I_m$.

4. 控制仿真结果与分析

永磁同步风力发电系统中,控制目标一般是避

免系统出现无规则振荡,即无功功率 Q 控制在一定范围内,而无功功率与 i_q 有关,因此,在设计目标时可以根据要求的无功功率值,求出对应的 i_q . 系统参数取值为 $\tilde{u}_d = -0.542$, $\tilde{u}_q = 0.824$, $\tilde{T}_w = 2.3$, $\sigma = 16$, $\gamma = 45.92$, 初始条件为 $(x(0), y(0), z(0)) = (20, 0.1, -5)$, 此时如果不控制,系统呈现混沌状态,系统呈现的混沌吸引子如图 2 所示. 交轴电流 \tilde{i}_q 变化曲线如图 3 所示. 本文采用滑模变结构控制方法对风力发电系统中桨距角 β 的变换机构进行控制,从而对系统的混沌状态进行控制.

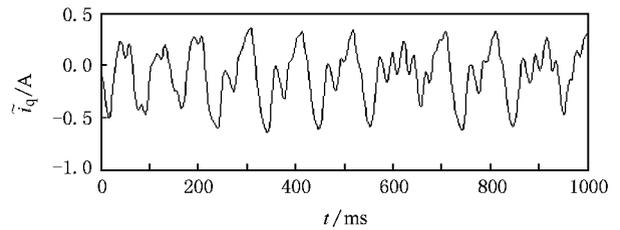


图3 交轴电流 \tilde{i}_q 变化曲线

按照通常线性反馈设计方法,选取主导极点 $-8, -2+2j, -2-2j$, 算出滑模面系数矩阵

$$C = \begin{bmatrix} 94.2 & 188.4 & 15.3 & 5 & 23.1 \\ 36 & 33.7 & 10 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix},$$

施加滑模控制后交轴电流 \tilde{i}_q 变化曲线如图 4 所示.

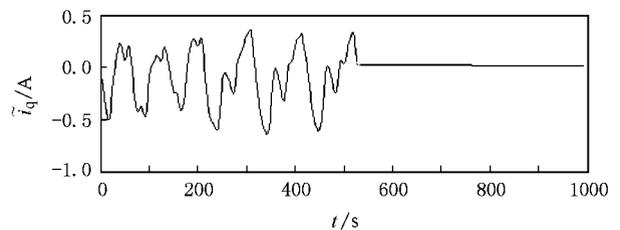


图4 施加控制后交轴电流 \tilde{i}_q 变化曲线

在上述建立的数学模型的基础上,对整个控制系统进行仿真研究,取一组参数:额定功率 $P_n = 2.1 \text{ kW}$, $U_n = 220 \text{ V}$, 额定频率 $f = 50 \text{ Hz}$, 极对数 $n_p = 17$, 磁通 212 mWb , 定子绕组电阻 $r_1 = 1.14 \Omega$, 定子绕组电感 $L_s = 2.7 \text{ mH}$, 转动惯量 $J_1 = 0.089 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 所用风力机参数为:风轮转动惯量 $J_2 = 16 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 风轮

扫过面积 $S = 4\text{m}^2$, 最佳叶尖速比 $\lambda_{\text{opt}} = 0.9$, 最大风能利用系数值 $C_{\text{pmax}} = 0.3$.

通过运用 MATLAB 得到的仿真曲线如图 5 和图 6 所示. 图 5 是逆变器输出 AB 相线电压波形, 图 6

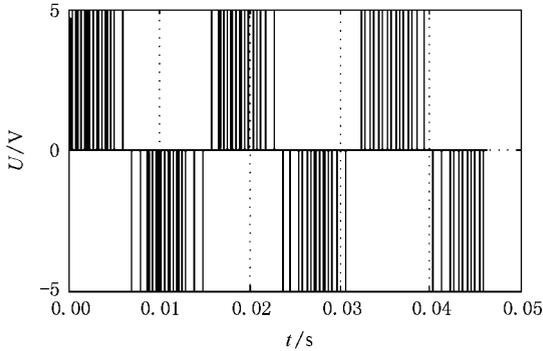


图 5 逆变器输出 AB 相线电压

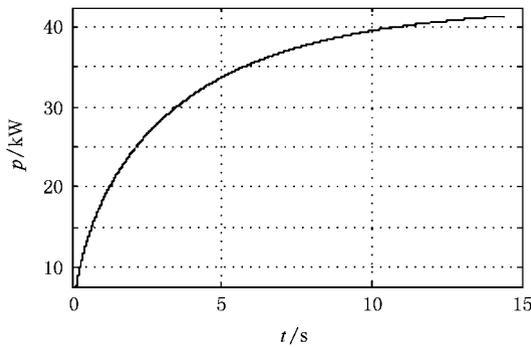


图 6 输出功率曲线

是发电机输出功率曲线. 发电机实际工作条件参数往往会受到外界的影响而发生不确定性变化. 通过仿真结果可以看出, 采用滑模变结构控制能对具有不确定性参数的多变量非线性风力发电机系统进行鲁棒性控制, 并且控制响应速度快.

5. 结 论

风力发电机采用滑模变结构控制方案可以在参数不确定的情况下保证系统稳定及各项指标要求. 本文推导出用于控制 PMSG 混沌运动的滑模变结构控制规律, 该控制方法具有算法简单, 行之有效, 良好的控制响应和控制鲁棒性, 并可适用于控制不确定性参数的 PMSG 混沌系统等诸多优点. 仿真结果说明在风速不断变化的情况下, 变速变距风力发电机桨距角和输出功率的控制采用滑模变结构控制响应速度快, 超调量小, 而且具有良好的鲁棒性. 研究结果为实现 PMSG 系统的混沌控制, 保证其工作的稳定可靠性提供了有价值的参考. 滑模变结构控制在直驱永磁风力发电系统中混沌控制的应用并不很多, 国内尚无人进行研究, 有待进一步深入探讨. 对于实际风力发电系统, 其运行状况受外界的影响很大, 如阵风的影响, 结合其他控制技术如模糊控制、神经网络控制、自适应控制以及无源性控制等先进控制方法的混合滑模变结构控制, 是以后风电控制及混沌控制问题的主要研究应用方向.

- [1] Zhu J J, Chang Y, Guan R C 2004 *Chaos, Solitons and Fractals* **22** 831
- [2] Cao Z T, Zheng Z S 1998 *Proceedings of the CSEE* **18** 318 (in Chinese) [曹志彤、郑中胜 1998 中国电机工程学报 **18** 318]
- [3] Wang X Y, Wu X J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5083 (in Chinese) [王兴元、武相军 2006 物理学报 **55** 5083]
- [4] Wang X Y, Wu X J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 605 (in Chinese) [王兴元、武相军 2006 物理学报 **55** 605]
- [5] 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]
- [6] Li Z, Zhang B, Mao Z Y 2002 *Control Theory & Applications* **11** 53 (in Chinese) [李 忠、张 波、毛宗源 2002 控制理论与应用 **11** 53]
- [7] Ren H P, Liu D, Li J 2003 *Proceedings of the CSEE* **23** 175 (in Chinese) [任海鹏、刘 丁、李 洁 2003 中国电机工程学报 **23** 175]
- [8] Li J, Ren H P 2005 *Control Theory & Applications* **22** 637 (in Chinese) [李 洁、任海鹏 2005 控制理论与应用 **22** 637]
- [9] Ha Q H, Nguyen Q H 2001 *IEEE Tra. Industrial Electr.* **48** 38
- [10] Li W L, Chen X Q, Shen Z P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 87
- [11] Huang L Y, Luo X S, Fang J Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 543 (in Chinese) [黄良玉、罗晓曙、方锦清 2005 物理学报 **54** 543]
- [12] Lou X Y, Cui B T 2008 *Chin. Phys. B* **17** 520
- [13] Ahmad M H 2004 *Chaos, Solitons and Fractals* **19** 1217
- [14] Ren H P, Liu D 2006 *IEEE Tra. Circuits and Systems* **53** 45
- [15] Gao T G, Chen Z Q, Yuan Z Z 2005 *Chin. Phys.* **14** 2421

Sliding mode variable-structure control of chaos in direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines^{*}

Yang Guo-Liang[†] Li Hui-Guang

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 21 February 2009; revised manuscript received 18 March 2009)

Abstract

The directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator (D-PMSG) is investigated. Its mathematical model is deduced and chaotic behaviors is demonstrated while its parameters have a certain range of values or under certain working conditions. A sliding mode variable structure method for controlling chaos in D-PMSG is presented, and realized through controlling pitch angle β . In view of the non-linear property and parameter changing characteristic, etc. for wind turbine, and based on the mechanism of the wind turbine, this paper obtained the wind turbine's linear model at a certain condition point under some assumptions, and then proposed the sliding model control strategy by taking full use of the SMC's non-sensitivity merit towards the model error and the parameter change as well as exterior disturbance. The simulation result indicates that the proposed control plan is effective, the control property of response is obtained quickly and the system also has good robustness, and is suitable for uncertain parameter in the system. Research results may have value for D-PMSG chaos control.

Keywords: wind power generation, directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generators (D-PMSG), chaos control, sliding mode variable structure control

PACC: 0545, 8610D

^{*} Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50837003) and the the Natural Science Research Programme of Education Bureau of Hebei Province (Grant No. Z2008474).

[†] E-mail: y99ygl@yahoo.com.cn