

# 混沌状态下永磁同步发电机的故障 诊断——LMI 法研究\*

吴忠强<sup>†</sup> 杨阳 徐纯华

(燕山大学电气工程学院工业计算机控制工程河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2013年1月10日收到; 2013年4月11日收到修改稿)

本文以永磁同步风力发电机为研究对象, 在两相同步旋转坐标系下建立了永磁同步发电机的数学模型. 应用时间尺度和线性仿射变换建立了系统混沌模型, 验证了系统在某些参数和工作条件下会出现混沌运动. 随后在考虑系统不确定性的情况下设计了故障观测器, 在系统发生故障时, 通过所设计的故障观测器能对混沌状态下永磁同步发电机的故障做出准确估计. 仿真结果表明基于线性矩阵不等式方法的故障观测器能够对系统故障做出快速准确的诊断.

**关键词:** 永磁同步发电机, 混沌, 非线性不确定系统, 故障诊断

**PACS:** 05.45.Gg, 05.45.Ac

**DOI:** 10.7498/aps.62.150507

## 1 引言

风能是一种清洁可再生能源, 充分开发和利用风能是解决环境和能源问题的必然选择. 风力发电是目前新能源发电技术中最成熟, 开发规模最大的发电方式之一<sup>[1-3]</sup>. 它的实质是通过叶片捕获风能并将其转化为机械能, 经过传动系统后通过发电机再将机械能转化为电能的过程. 发电机是风力发电系统中的一个重要环节. 永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)凭借结构简单, 运行效率高等优点在风力发电中得到了广泛的应用<sup>[4-7]</sup>.

混沌控制是非线性研究领域的热点问题, 它普遍存在于医学, 工学, 生物及经济等各个领域<sup>[8]</sup>. 1994年 Hemati 通过人为引进参数建立了第一个永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)混沌模型. 1998年张波等人在没有引进任何参数的情况下, 通过时间尺度和线性仿射变换建立了一个 PMSM 混沌模型, 现在国内外开展的 PMSM 研究均是以此模型为基础<sup>[9]</sup>, 涌现出大量的

混沌控制方法. 如状态延迟反馈控制<sup>[9]</sup>, 微分几何法控制<sup>[10]</sup>, 基于有限时间稳定理论的控制<sup>[11]</sup>, 模糊控制<sup>[12]</sup>, 基于模糊模型的脉冲控制<sup>[13]</sup>, 线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)方法脉冲控制<sup>[14]</sup>等. 目前针对永磁同步发电机混沌系统的研究不是很多, 文献[15]对混沌运动状态下 PMSG 基于 Hamilton 模型设计了  $H_\infty$  控制方案, 能够在对混沌运动进行控制的同时有效抑制外部干扰. 文献[16]采用滑模变结构方法控制直驱永磁同步风力发电系统中的混沌, 且提高了系统的鲁棒性和控制的快速性.

对永磁同步风力发电机进行控制时, 应当考虑测量误差, 机械磨损和参数变化等引起的模型不确定性. 本文从永磁同步风力发电机着手, 建立其混沌数学模型和非线性不确定故障模型, 并设计了故障观测器, 对在混沌状态下的系统故障能进行快速准确估计.

## 2 永磁同步风力发电机模型的建立

直驱永磁同步风力发电系统主要由三部分组

\* 河北省自然科学基金(批准号: F2012203088)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: mewzq@163.com

成: 风力机, 永磁同步发电机和交-直-交变频器. 典型直驱永磁同步风力发电系统结构如图 1 所示. 风力机将空气动能转换为有效机械能, 带动永磁同

步风力发电机旋转, 永磁同步风力发电机负责把机械能转换为电能, 通过交-直-交变频器和变压器并入电网.

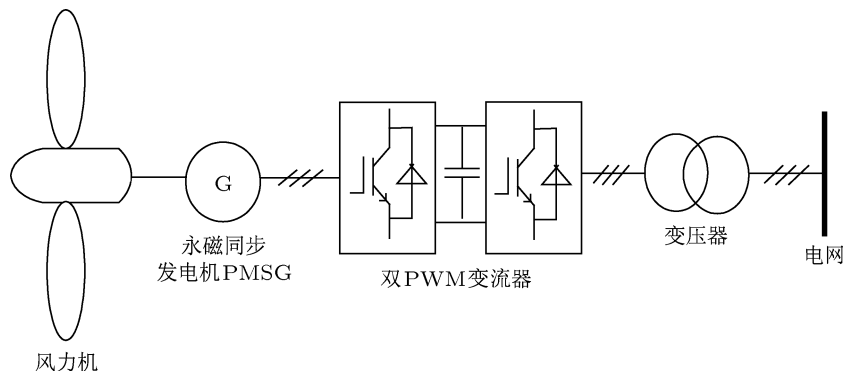


图 1 直驱永磁同步风力发电系统结构

## 2.1 永磁同步风力发电系统数学模型的建立

永磁同步风力发电机的输出功率主要由三部分决定: 输入风速  $v$ , 桨距角  $\beta$  和叶尖速比  $\lambda$ . 根据空气动力学中的贝兹 (Betz) 理论, 单位时间内风力机吸收的机械功率  $P_m$  为<sup>[17]</sup>

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 C_P(\lambda, \beta) v^3, \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为空气密度,  $R$  为风轮半径,  $C_P(\lambda, \beta)$  为风能利用系数.

由  $T_m = P_m/\omega$ , 得风力机的机械转矩方程为

$$T_m = 0.5\rho\pi R^3 C_Q(\lambda, \beta) v^2, \quad (2)$$

式中,  $\omega$  为风力机转速,  $C_Q(\lambda, \beta)$  为转矩系数.

永磁同步发电机在风力机的带动下旋转, 通过三相静止坐标系向两相静止坐标系的变换, 两相静止坐标系再向两相旋转坐标系的变换, 可得到在两相同步旋转坐标系下永磁同步风力发电机的数学模型为

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{1}{L_d} R i_d + \omega_e i_q \frac{L_q}{L_d} - \frac{1}{L_d} u_d, \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{1}{L_q} R i_q - \omega_e i_d \frac{L_d}{L_q} \\ &\quad + \frac{1}{L_q} \omega_e \psi_f - \frac{1}{L_q} u_q. \end{aligned} \quad (3)$$

永磁发电机电磁转矩方程为

$$T_e = n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \quad (4)$$

发电机传动系统的模型为

$$J \frac{d\omega_e}{dt} = n_p T_m - n_p T_e - B \omega_e, \quad (5)$$

式中  $u_d, u_q, i_d, i_q$  分别为发电机电压和电流在两相同步旋转坐标系下的  $d$  轴和  $q$  轴分量,  $L_d, L_q$  和  $R$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴电感和定子电阻,  $\psi_f$  为永磁体磁链;  $n_p$  为发电机电极对数;  $\omega_e$  为电机的电角速度, 且  $\omega_e = n_p \omega$ .  $T_e$  为电磁转矩,  $J$  和  $B$  分别为总转动惯量和总粘滞阻尼系数.

考虑均匀气隙永磁同步发电机, 有  $L_d = L_q = L$ , 由 (3)—(5) 式得永磁同步风力发电系统整体数学模型为

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} [T_m - n_p \psi_f i_q - B \omega], \\ \frac{di_d}{dt} &= -\frac{1}{L} R i_d + \omega_e i_q - \frac{1}{L} u_d, \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{1}{L} R i_q - \omega_e i_d + \frac{1}{L} \omega_e \psi_f - \frac{1}{L} u_q. \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.2 永磁同步风力发电机混沌模型的建立

对 (6) 式进行如下时间尺度变换和线性仿射变换<sup>[18]</sup>

$$\begin{aligned} \tilde{t} &= t/\tau, \\ x_1 &= \tilde{\omega} = \tau(\omega_e - \omega_e^*), \\ x_2 &= \tilde{i}_d = i_d/k, \\ x_3 &= \tilde{i}_q = i_q/k, \end{aligned}$$

其中,  $\tau = L/R$ ,  $k = B_e/n_p \tau \psi_f$ ,  $B = n_p B_e$ ,  $\omega_e^*$  为电角速度的参考值.

变换后系统模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\sigma(x_1 + x_3) - \sigma \tau \omega_e^* + \tilde{T}_m, \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + x_1 x_3 + x_3 \tau \omega_e^* - \tilde{u}_d, \end{aligned}$$

$$\dot{x}_3 = -x_3 - x_1x_2 - x_2\tau\omega_c^* + \gamma\tau\omega_c^* - \tilde{u}_q + \gamma x_1. \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\psi_f}{kL}, \\ \sigma &= \frac{B_c \tau n_p}{J}, \\ \tilde{T}_m &= \frac{n_p \tau^2}{J} T_m, \\ \tilde{u}_d &= \frac{1}{Rk} u_d, \\ \tilde{u}_q &= \frac{1}{Rk} u_q. \end{aligned}$$

根据文献 [19], 此时永磁同步发电机系统的混沌模型与著名的混沌系统——Lorenz 混沌系统在一定条件下相同, 类比取  $\gamma = -25$ ,  $\sigma = 5.456$ ,  $\tilde{T}_m = \tilde{u}_d = \tilde{u}_q = 0$ ,  $\tau = 0.01275$ ,  $\omega_c^* = 32 \text{ rad/s}$ . 永磁同步风力发电机的混沌行为如图 2 所示.

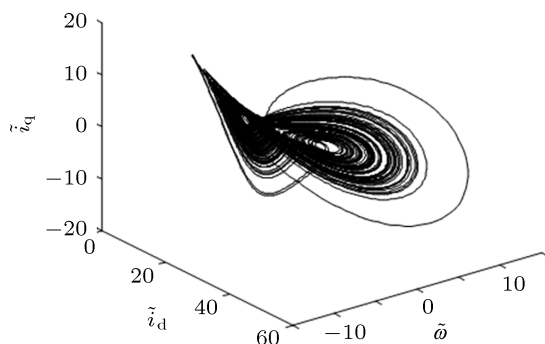


图2 永磁同步风力发电机混沌运动的吸引子

### 3 永磁同步风力发电机故障观测器的设计

#### 3.1 永磁同步风力发电机故障模型的建立

针对系统 (7), 设状态变量  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [\tilde{\omega} \ \tilde{i}_d \ \tilde{i}_q]^T$ , 控制变量为  $\mathbf{u} = [\tilde{u}_d \ \tilde{u}_q]^T$ ,  $\Phi(\mathbf{x}) = [0 \ x_1x_3 \ -x_1x_2]^T$ , 已知干扰  $\boldsymbol{\eta} = [\tilde{T}_m - \sigma\tau\omega_c^* \ 0 \ \gamma\tau\omega_c^*]^T$ . 系统状态方程可写为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \Phi(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\eta}, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\sigma & 0 & -\sigma \\ 0 & -1 & \tau\omega_c^* \\ \gamma & -\tau\omega_c^* & -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

考虑到永磁同步风力发电机测量误差, 机械磨损和参数变化等因素会导致模型的不确定性, 并且 PMSG 运行过程中可能发生未知故障, 具有未知故障和不确定性的 PMSG 模型可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \Phi(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{D}f, \\ \mathbf{y} &= (\mathbf{C} + \Delta\mathbf{C})\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ ,  $f$  为时变故障, 假设  $f$  有界, 即  $|f| \leq f_0$ ,  $\Delta\mathbf{A}$ ,  $\Delta\mathbf{C}$  分别为定子阻值变化对系统状态和输出矩阵的影响.

#### 3.2 PMSG 故障观测器的设计

对系统设计观测器之前, 首先给出引理 1 和假设 1,2.

**引理1**<sup>[20]</sup> 对任意常数  $\mu > 0$ , 如下不等式成立:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{Y} + \mathbf{Y}^T \mathbf{X} \leq \mu \mathbf{X}^T \mathbf{X} + \mu^{-1} \mathbf{Y}^T \mathbf{Y}.$$

**假设1** 非线性函数  $\Phi(\mathbf{x})$  对所有  $\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}^3$  满足利普希茨 (Lipschitz) 条件

$$\|\Phi(\mathbf{x}) - \Phi(\hat{\mathbf{x}})\| \leq l \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|,$$

式中  $l$  是 Lipschitz 常数, 且  $\Phi(0) = 0$ .

**假设2** 假设  $\Delta\mathbf{A}$ ,  $\Delta\mathbf{C}$  范数有界, 且存在  $\|\Delta\mathbf{A}\| < a$ ,  $\|\Delta\mathbf{C}\| < b$ .

设计如下故障观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \Phi(\hat{\mathbf{x}}) + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{D}\hat{f} \\ &\quad + \mathbf{G}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) + \mathbf{g}_1 + \mathbf{g}_2, \\ \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $\hat{f} = c\mathbf{L}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})$ ,  $c$  为大于零的常数,  $\hat{\mathbf{x}}$  和  $\hat{f}$  分别是状态向量  $\mathbf{x}$  和时变未知故障  $f$  的估计值,  $\mathbf{G}$  和  $\mathbf{L}$  是观测器待设计的参数,  $\mathbf{g}_1$  和  $\mathbf{g}_2$  是待设计的函数.

**定义**  $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ ,  $\mathbf{r} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}$ , 由 (9) 和 (10) 式得观测误差和输出误差方程为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{C})\mathbf{e} + \Delta\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{G}\Delta\mathbf{C}\mathbf{x} + \Phi(\mathbf{x}) \\ &\quad - \Phi(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{D}f - \mathbf{D}\hat{f} - \mathbf{g}_1 - \mathbf{g}_2, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{C}\mathbf{e}. \quad (12)$$

下面以定理 1 的形式给出故障观测器的存在条件.

**定理1** 假设存在正定对称阵  $\Gamma > 0$ , 矩阵  $H$ ,  $L$ ,  $G$  和正常数  $q_1, q_2, n_i, i = 1, 2, 3$  满足如下线性条件:

$$\begin{bmatrix} H & H & \Gamma & \Gamma \\ H^T & -q_2 I & 0 & 0 \\ \Gamma & 0 & -q_2 I & 0 \\ \Gamma & 0 & 0 & -\frac{1}{l^2} I \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

$$g_1 = \begin{cases} \frac{1}{2} a^2 q_1 \left(1 + \frac{q_1}{n_1 - q_1}\right) \frac{\Gamma^{-1} C^T r}{r^T r} \hat{x}^T \hat{x}, & r \neq 0, \\ 0, & r = 0, \end{cases}, \quad (17)$$

$$g_2 = \begin{cases} \frac{1}{2} b^2 \left(q_2 \left(1 + \frac{q_2}{n_2 - q_2}\right) + q_2 \left(1 + \frac{q_2}{n_3 - q_2}\right)\right) \frac{\Gamma^{-1} C^T r}{r^T r} \hat{x}^T \hat{x} + \frac{1}{2} c \frac{n_2}{n_3 q_2} \|L\|^4 \Gamma^{-1} C^T, & r \neq 0, \\ 0, & r = 0. \end{cases} \quad (18)$$

那么, 对任意的  $\varepsilon > 0$  有  $\limsup_{t \rightarrow \infty} \|e\| \leq \varepsilon$ .

**证明** 取 Lyapunov 函数为  $V = e^T \Gamma e$ , 其中  $\Gamma > 0$ ,

代入 (11) 式且令  $\tilde{A} = A - GC$ ,  $\tilde{\Phi} = \Phi(x) - \Phi(\hat{x})$  得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e^T (\tilde{A}^T \Gamma + \Gamma \tilde{A}) e + 2e^T \Gamma \tilde{\Phi} \\ & + 2e^T \Gamma D f - 2ce^T \Gamma D L C e - 2e^T \Gamma g_1 \\ & + 2e^T \Gamma \Delta A x - 2e^T \Gamma g_2 \\ & - 2ce^T \Gamma D L \Delta C x - 2e^T \Gamma G \Delta C x. \end{aligned}$$

由  $|f| \leq f_0$  和 (14) 式可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e^T (\tilde{A}^T \Gamma + \Gamma \tilde{A}) e + 2e^T \Gamma \tilde{\Phi} \\ & + 2\|f_0 D^T \Gamma e\| - 2c\|D^T \Gamma e\|^2 \\ & - 2e^T \Gamma g_1 + 2e^T \Gamma \Delta A x - 2e^T \Gamma g_2 \\ & - 2ce^T \Gamma D L \Delta C x - 2e^T \Gamma G \Delta C x. \end{aligned} \quad (19)$$

根据假设 1 和引理 1 有

$$2e^T \Gamma \tilde{\Phi} \leq 2l\|\Gamma e\|\|e\| \leq l^2 e^T \Gamma \Gamma e + e^T e. \quad (20)$$

再次利用引理 1 有

$$\begin{aligned} 2e^T \Gamma \Delta A x \leq & q_1 a^2 (1 + q'_1) \hat{x}^T \hat{x} + q_1 a^2 (1 + q'^{-1}_1) e^T e \\ & + q_1^{-1} e^T \Gamma \Gamma e. \end{aligned} \quad (21)$$

同理

$$2e^T \Gamma \Delta C x \leq q_2 b^2 (1 + q'_2) \hat{x}^T \hat{x}$$

$$D^T \Gamma = LC, \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} H = & A^T \Gamma - C^T H^T + \Gamma A \\ & - HC + I + a^2 n_1 I + b^2 n_2 I + b^2 n_3 I, \\ G = & \Gamma^{-1} H, \end{aligned} \quad (15)$$

且有

$$c \geq \frac{f_0}{\|D^T \Gamma\| \varepsilon}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & + q_2 b^2 (1 + q'^{-1}_2) e^T e \\ & + q_2^{-1} e^T \Gamma G G^T \Gamma e. \\ 2ce^T \Gamma D L \Delta C x \leq & q_3 b^2 (1 + q'_2) \hat{x}^T \hat{x} \\ & + q_3 b^2 (1 + q'^{-1}_2) e^T e \\ & + cq_3^{-1} e^T \Gamma D L L^T D^T \Gamma e, \end{aligned} \quad (22)$$

根据 (12) 和 (14) 式得

$$\begin{aligned} 2ce^T \Gamma D L \Delta C x \leq & q_3 b^2 (1 + q'_2) \hat{x}^T \hat{x} \\ & + q_3 b^2 (1 + q'^{-1}_2) e^T e + cq_3^{-1} \|L\|^4 r^T r. \end{aligned} \quad (23)$$

(20)—(23) 式代入 (19) 式得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & e^T \Pi e + 2\|f_0 D^T \Gamma e\| \\ & - 2c\|D^T \Gamma e\|^2 - 2e^T \Gamma g_1 \\ & - 2e^T \Gamma g_2 + q_1 a^2 (1 + q'_1) x^T x \\ & - q_2 b^2 (1 + q'_2) x^T x - q_3 b^2 (1 + q'_2) x^T x \\ & - cq_3^{-1} \|L\|^4 r^T r, \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} \Pi = & A^T \Gamma + \Gamma A - C^T G^T \Gamma - \Gamma G C \\ & + l^2 \Gamma \Gamma + q_1^{-1} \Gamma \Gamma + q_2^{-1} \Gamma G G^T \Gamma + I + a^2 n_1 I \\ & + b^2 n_2 I + b^2 n_3 I, \end{aligned}$$

$$n_1 = q_1 (1 + q'^{-1}_1),$$

$$n_2 = q_2 (1 + q'^{-1}_2),$$

$$n_3 = q_3 (1 + q'^{-1}_2).$$

于是有

$$\dot{V} \leq e^T \Pi e + 2\|f_0 D^T \Gamma e\| - 2c\|D^T \Gamma e\|. \quad (24)$$

根据 (16) 式可得

$$\dot{V} \leq e^T \Pi e.$$

若令  $G = \Gamma^{-1}H$ , 根据 (13) 式知  $\Pi < 0$ . 于是有  $\dot{V} < 0$ , 证毕.

(14) 式可近似转化为线性矩阵不等式最小值求解问题, 增加辅助变量  $\delta$ , 可表示成如下 LMI 形式:

$$\begin{aligned} & \min \delta \\ & \text{s.t.} \begin{bmatrix} \delta I & D^T \Gamma - LC \\ (D^T \Gamma - LC)^T & \delta I \end{bmatrix} \geq 0. \end{aligned} \quad (25)$$

#### 4 仿真研究

为了验证所设计故障观测器的有效性, 模型参数选择如下:

$$J = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}, \quad L = 0.051 \text{ H},$$

$$R = 4 \text{ } \Omega, \quad n_p = 16,$$

则系统矩阵为

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -5.46 & 0 & -5.46 \\ 0 & -1 & 0.408 \\ -25 & -0.408 & -1 \end{bmatrix}, \\ D &= [1 \ 0 \ 0]^T, \end{aligned}$$

$B$  和  $C$  见 (8) 式.

取如下两种故障形式:

周期性常值故障

$$f_1(t) = \begin{cases} 3, & 3(n-1)+1 < t < \frac{3(2n-1)}{2} + 1, \\ 0, & t < 1, \frac{3(2n-1)}{2} + 1 < t < 3n+1, \\ & n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

周期性时变故障

$$f_2(t) = \begin{cases} 0, & t < 1, \\ 3 + 1.5 \sin 0.17t, & t \geq 1. \end{cases}$$

在仿真的过程中, 根据假设 2, 系统的不确定性满足:  $\|\Delta A\| < a = 0.3$ ,  $\|\Delta C\| < b = 0.3$ .

利用 LMI 工具箱中的 feasp 和 mincx 函数求解 (13)—(18) 和 (25) 式, 可得

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 13.7016 & 0.1118 & 4.1091 \\ 0.1118 & 0.9955 & 0.2369 \\ 4.1091 & 0.2369 & 2.8445 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 25.5642 \\ 8.8400 \\ -65.3852 \end{bmatrix},$$

$$L = 13.7016, \quad q_1 = 375.3573,$$

$$q_2 = 809.7452, \quad n_1 = n_2 = n_3 = 0.2684.$$

注: 在 (17) 和 (18) 式中, 当  $r$  趋于零时,  $g_1, g_2$  将趋于无穷. 为了解决此问题, 定义当  $r \leq 0.01$  时  $g_1 = 0, g_2 = 0$ .

图 3 是系统发生周期性常值故障时, 故障观测器对故障的估计结果.

图 4 是系统发生周期性时变故障时, 故障观测器对故障的估计结果.

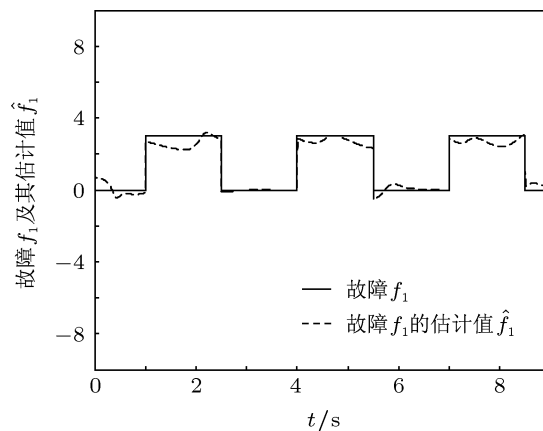


图 3 故障  $f_1$  和它的估计值  $\hat{f}_1$

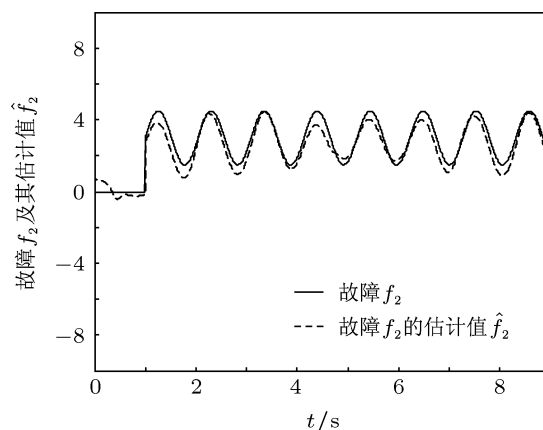


图 4 故障  $f_2$  和它的估计值  $\hat{f}_2$

由图 3 和图 4 可知, 当系统在 1s 发生故障时, 设计的故障观测器对周期性常值故障和时变故障均做出了快速准确的估计.

## 5 结论

本文在分析永磁同步风力发电机数学模型的

基础上, 针对 PMSG 的两相同步旋转模型建立了系统的混沌模型, 并验证了系统在某些参数和一定运行条件下会出现混沌现象. 随后考虑系统的不确定性设计了故障观测器, 在系统发生故障时, 能够对混沌状态下系统的故障进行快速准确的估计. 通过仿真验证了故障观测器的可行性和有效性.

- 
- [1] Calderaro V, Galdi V, Piccolo A, Siano P 2008 *Electric Power Systems Research* **78** 1109
- [2] Dincer F 2011 *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15** 5135
- [3] Sanchez J A, Veganzones C, Martinez S 2008 *Renewable Energy* **33** 1186
- [4] Dong L L, Wang Y 2011 *Renewable Energy Resource* **29** 7 (in Chinese) [董琳琅, 王永 2011 可再生能源 **29** 7]
- [5] Dang C L, Zhang L, Zhou M X 2011 *Energy Procedia* **2** 844
- [6] Kesraoui M, Korichi N, Belkadi A 2011 *Renewable Energy* **36** 2655
- [7] Meharrar A, Tioursi M, Hatti M, Boudghène A, Stambouli 2011 *Expert Systems with Applications* **38** 7659
- [8] 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]
- [9] Wei D Q 2011 *Ph. D. Dissertation* (Guangzhou: South China University of Technology) (in Chinese) [韦笃取 2011 博士学位论文 (广州: 华南理工大学)]
- [10] 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]
- [11] Wei D Q, Zhang B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1399
- [12] Li D, Zhang X H, Yang D, Wang S L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1432 (in Chinese) [李东, 张小洪, 杨丹, 王时龙 2009 物理学报 **58** 1432]
- [13] Li D, Wang S L, Zhang X H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2939 (in Chinese) [李东, 王时龙, 张小洪 2009 物理学报 **58** 2939]
- [14] Li D, Wang S L, Zhang X H, Yang D 2010 *Chin. Phys. B* **19** 1
- [15] Ren L N, Liu F C, Jiao X H, Li J Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 2939 (in Chinese) [任丽娜, 刘福才, 焦晓红, 李俊义 2012 物理学报 **61** 2939]
- [16] Yang G L, Li H G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7552 (in Chinese) [杨国良, 李慧光 2009 物理学报 **58** 7552]
- [17] Shen Y X, Zhu Y, Ji Z C 2009 *Control Theory & Application* **26** 1282 (in Chinese) [沈艳霞, 朱芸, 纪志成 2009 控制理论与应用 **26** 1282]
- [18] Zhang B, Li Z, Mao Z Y 2002 *Control Theory & Application* **19** 841 (in Chinese) [张波, 李忠, 毛宗源 2002 控制理论与应用 **19** 841]
- [19] Zhang B, Li Z, Mao Z Y, Pang M X 2001 *Proceedings of the CSEE* **21** 13 (in Chinese) [张波, 李忠, 毛宗源, 庞敏熙 2001 中国电机工程学报 **21** 13]
- [20] K Mohamed, M Chadli, M Chaabane 2012 *International Journal of Automation and Computing* **9** 331

# Fault diagnosis for permanent magnet synchronous generator under chaos conditions: LMI approach\*

Wu Zhong-Qiang<sup>†</sup> Yang Yang Xu Chun-Hua

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 10 January 2013; revised manuscript received 11 April 2013)

## Abstract

The permanent magnet synchronous wind power generator is investigated, and its mathematical model is established in two-phase synchronous rotating coordinates. By a time scaling transformation and a linear affine transformation, the chaos model is obtained, and the chaos phenomena occur when the model parameters are in a certain range and under running conditions. Then, an uncertain nonlinear model of permanent magnet synchronous wind power generator is established, and a fault observer is designed. When faults occur, the fault observer can estimate the fault quickly and accurately. Simulation results show that the fault observer based on linear matrix inequality approach can diagnosis the fault rapidly and accurately.

**Keywords:** permanent magnet synchronous generator, chaos control, uncertain nonlinear systems, fault diagnosis

**PACS:** 05.45.Gg, 05.45.Ac

**DOI:** 10.7498/aps.62.150507

---

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2012203088).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: mewzq@163.com