

DOI: 10.7667/PSPC151486

基于观测器的发电机功角和未知输入估计

杨凌霄¹, 杨松林²

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了提高电力系统运行稳定性, 针对同步发电机功角和未知输入的估计问题, 提出了基于观测器的估计方法。利用同步发电机的运动方程和电磁方程, 建立同步发电机四阶数学模型; 运用泰勒公式对模型进行线性化, 将产生的佩亚诺余项和参数变化引起的建模不准确归结为未知输入。对线性化后的数学模型进行状态变换, 将数学模型分解成含未知输入项和不含未知输入项两部分; 分别设计两部分的观测器, 根据极点配置方法和 Lyapunov 稳定性理论分别确定两个观测器的增益矩阵。通过 Matlab 仿真, 验证了基于观测器的同步发电机功角和未知输入估计方法的有效性。该方法具有响应时间短、估计精度高的特点, 可以快速准确地实现发电机功角和系统未知输入的估计。

关键词: 同步发电机; Lyapunov 稳定性; 极点配置; 功角估计; 未知输入估计; 未知输入观测器

Observer-based power angle and unknown input estimations for generator system

YANG Lingxiao¹, YANG Songlin²

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: To improve the stability of power system, this paper discusses the estimation issues of both power angle and unknown input for generator system, an observer-based estimated method is proposed to deal with the above problems. A fourth-order mathematical model of generator is derived from the motion and electromagnetic equations. The model is linearized by Taylor's formula, where the remainder produced by model linearization and model uncertainty caused by parameter variation is regarded as the unknown input of generator system. A state transformation is used to decompose the generator model, so that the model is decomposed into two parts, containing unknown input item and no unknown input item. The observer of these two parts are designed respectively, gain matrices of them are obtained by method of pole placement and Lyapunov stability theory. The method of observer-based power angle and unknown input estimations for generator system is verified by the Matlab simulation, and this method presents characteristics of short response time and high accuracy of estimation, so that fast and accurate estimation of power angle and unknown input is realized.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61403129).

Key words: synchronous generator; Lyapunov stability; pole assignment; angle estimation; unknown input estimation; unknown input observer

0 引言

目前, 电网规模越来越大, 大电网对电力系统的稳定运行要求也越来越高^[1-3]。同步发电机作为电力系统的重要组成部分, 它的安全稳定运行尤为重要。此外, 功角的变化可以作为同步发电机运行是否稳定的指标, 也可以作为同步发电机内部能量转化的参数^[4]。因此, 功角准确实时的监测, 对电

力系统暂、稳态运行以及电力系统励磁控制都具有非常重要的意义^[5]。

功角的测量方式主要有两种: 直接法和间接法^[2]。直接法借助非电气量传感器, 通过异地信号相位比较, 得出功角信息^[6-8]。GPS 的发展使异地信号相位比较实现几乎同步^[9], 但时间差不可能完全消除。同时直接法需要信号传输^[10-12], 因此测量精度对于通信的可靠性具有依赖性。信号的传输还需要信号发送、接收设备, 造成很大的不便。间接法一般是采集同步发电机的电压、电流以及交直流电抗等电

气量, 通过理论分析获得功角^[13]。该方法在系统运行状态稳定并且能够得到精确的同步发电机的各项参数时, 能得到准确的发电机功角, 而在系统暂态过程中, 由于参数变化、机组铁心饱和等影响, 计算结果会出现较大误差^[14]。

鉴于上述同步发电机功角估计的现状, 本文提出一种基于未知输入观测器的同步发电机功角估计方法。该方法使用四阶发电机模型, 充分考虑建模不确定性和电网暂态参数变化等, 并将这些量归结为同步发电机数学模型中的未知输入。基于该模型, 通过设计未知输入观测器, 提出了同时对发电机的功角和系统未知输入的估计方法。此外, 对系统未知输入的估计, 有望进一步应用于同步发电机系统的容错控制领域。本文使用 MATLAB 仿真, 结果表明, 该方法误差小, 在电力系统暂态过程中能够精确的跟随状态量和未知输入。

1 同步发电机的数学模型

本文考虑单机无穷大系统中同步发电机的数学模型^[15-16]。单机无穷大系统中, 同步发电机经主变压器和输电线路连接到无穷大的系统中, 如图 1 所示。

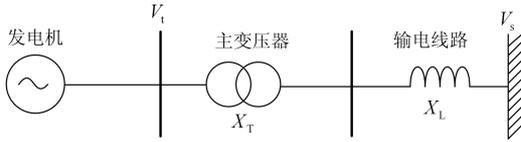


图 1 单机无穷大系统
Fig. 1 Single machine infinite bus system

1.1 同步发电机基本方程

在图 1 中, 当计及变压器电抗 X_T 和输电线路电抗 X_L 时, $X_{d\Sigma} = X_d + X_T + X_L$, $X_{q\Sigma} = X_q + X_T + X_L$, $X'_{d\Sigma} = X'_d + X_T + X_L$ 。根据同步发电机的转子运动方程和电磁方程^[17]可得到同步发电机的数学模型

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s \omega_r \\ \dot{\omega}_r = (P_m - D\omega_r - P_e) / M \\ \dot{E}'_q = (-bE'_q + c \cos \delta + v) / T'_{d0} \\ \dot{P}_e = -a_1 b E'_q \sin \delta / T'_{d0} + a_1 \omega_s E'_q \omega_r \cos \delta + \\ a_1 c \sin 2\delta / 2T'_{d0} + a_1 v \sin \delta / T'_{d0} - 2a_2 \omega_s \omega_r \cos 2\delta \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为发电机功角; E'_q 为 q 轴暂态电势; P_e 为发电机功率; ω_s 为同步角频率; $\omega_r = \omega - \omega_s / \omega_s$; $a_1 = V_s / X'_{d\Sigma}$; $a_2 = V_s^2 (X_q - X'_d) / 2X_{q\Sigma} X'_{d\Sigma}$; $b = X_{d\Sigma} / X'_{d\Sigma}$; $c = (X_q - X'_d) V_s / X'_{d\Sigma}$; $v = E_{ids} + u_f$ 。式(1)可以简写为

$$\begin{cases} \dot{x} = g(x) + Eu \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } x &= [\delta \quad \omega_r \quad E'_q \quad P_e]^T \quad (x \in \mathbf{R}^n); \quad g(x) = \\ & [g_1(x) \quad g_2(x) \quad g_3(x) \quad g_4(x)]^T; \quad y = [\omega_r \quad E'_q \quad P_e]^T \\ (y \in \mathbf{R}^p); \quad u &= [P_m \quad v]^T; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad E = \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1/M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/T'_{d0} & 0 \end{bmatrix}^T.$$

1.2 模型的转换

从式(2)可以看出, 同步发电机数学模型是一个非线性系统, 因此需要对模型线性化处理, 以便于观测器的设计。

用 $x_s = [\delta_s \quad \omega_{rs} \quad E'_{qs} \quad P_{es}]^T$ 表示系统状态变量的平衡点。根据平衡点的定义 x_s 应满足:

$$\begin{cases} \omega_{rs} = 0 \\ P_m - P_{es} = 0 \\ v - bE'_{qs} + c \cos \delta_s = 0 \\ -bE'_{qs} \sin \delta_s + c \sin 2\delta_s / 2 + v \sin \delta_s = 0 \end{cases}$$

将 $g(x)$ 在平衡点处用泰勒公式 $g(x) = g(x_s) + g'(x_s)(x - x_s) + o(x - x_s)$ 展开。其中 $g'(x_s)$ 是 $g(x)$ 对 x_s 的偏导

$$g'(x_s) = \begin{pmatrix} \frac{\partial g(x)}{\partial \delta} & \frac{\partial g(x)}{\partial \omega_r} & \frac{\partial g(x)}{\partial E'_q} & \frac{\partial g(x)}{\partial P_e} \\ \frac{\partial g_1(x)}{\partial \delta} & \frac{\partial g_1(x)}{\partial \omega_r} & \frac{\partial g_1(x)}{\partial E'_q} & \frac{\partial g_1(x)}{\partial P_e} \\ \frac{\partial g_2(x)}{\partial \delta} & \frac{\partial g_2(x)}{\partial \omega_r} & \frac{\partial g_2(x)}{\partial E'_q} & \frac{\partial g_2(x)}{\partial P_e} \\ \frac{\partial g_3(x)}{\partial \delta} & \frac{\partial g_3(x)}{\partial \omega_r} & \frac{\partial g_3(x)}{\partial E'_q} & \frac{\partial g_3(x)}{\partial P_e} \\ \frac{\partial g_4(x)}{\partial \delta} & \frac{\partial g_4(x)}{\partial \omega_r} & \frac{\partial g_4(x)}{\partial E'_q} & \frac{\partial g_4(x)}{\partial P_e} \end{pmatrix}$$

令 $A = g'(x_s)$, 式(2)在平衡点处的线性化模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bf(t, x) + Eu - Ax_s \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & -D/M & 0 & -1/M \\ -c/T'_{d0} \sin \delta_s & 0 & -b/T'_{d0} & 0 \\ A_{41} & A_{42} & -a_1 b/T'_{d0} \sin \delta_s & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

式中： $A_{42} = a_1 \omega_s E'_{qs} \cos \delta_s - 2a_2 \omega_s \cos 2\delta_s$ ； $A_{41} = -a_1 b E'_{qs} \cos \delta_s / T'_{d0} + a_1 c \cos 2\delta_s / T'_{d0} + a_1 v \cos \delta_s / T'_{d0}$ 。

$Eu - Ax_s$ 简写为 $E_1 u_1$ 。 $f(f \in \mathbf{R}^m)$ 为未知输入，表示暂态过程中模型参数的变化和泰勒公式展开中产生的佩亚诺余项的总和。

未知输入观测器的设计目标就是同时估计同步发电机功角和同步发电机模型中的未知输入。

2 功角和未知输入估计

容易验证，式(3)满足下面秩条件：

$$\text{rank}(CB) = \text{rank}(B) = m \quad (4)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A - \zeta I & B \\ C & \theta \end{bmatrix} = n + \text{rank} B \quad (5)$$

式(5)中， ζ 是任意具有非负实部的复数。若式(4)和式(5)同时成立，存在满足下式的非奇异矩阵 T 和 S [18]

$$T^{-1}AT = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad T^{-1}B = \begin{bmatrix} B_1 \\ \theta \end{bmatrix},$$

$$S^{-1}CT = \begin{bmatrix} C_{11} & \theta \\ \theta & C_{22} \end{bmatrix}, \quad T^{-1}E_1 = \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{12} \end{bmatrix}$$

分别对状态量 x 和输出 y 作如下变换

$$\begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 \end{bmatrix}^T = T^{-1}x, \quad \begin{bmatrix} \eta_1 & \eta_2 \end{bmatrix}^T = S^{-1}y \quad (6)$$

则式(3)可以变换成

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = A_{11}\xi_1 + A_{12}\xi_2 + B_1 F(t, \xi) + E_{11}u_1 \\ \eta_1 = C_{11}\xi_1 \end{cases} \quad (7a)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_2 = A_{21}\xi_1 + A_{22}\xi_2 + E_{12}u_1 \\ \eta_2 = C_{22}\xi_2 \end{cases} \quad (7b)$$

式(7a)中： $F(t, \xi) \Leftrightarrow f(t, T\xi) \Leftrightarrow f(t, x)$ ，即 F 和 f 在数值上具有等价关系； B_1 和 C_{11} 有相同的行数 r_1 ，并且可逆。

2.1 同步发电机功角估计

由于功角是系统状态的一个分量，因此对状态估计的同时，也就实现了对功角的估计。由式(6)可得 η_1 ，且 C_{11} 可逆，故根据式(7a)可得

$$\xi_1 = C_{11}^{-1} \eta_1 \quad (8)$$

由于式(7b)是一个不含未知量的线性系统，则式(7b)的观测器为 [19]

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}}_2 = A_{21}\hat{\xi}_1 + A_{22}\hat{\xi}_2 + L_1(\eta_2 - C_{22}\hat{\xi}_2) + E_{12}u_1 \\ \eta_2 = C_{22}\hat{\xi}_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中： L_1 是该观测器增益矩阵，且 $A_{22} - L_1 C_{22}$ 是一个稳定矩阵，可利用极点配置法 [17] 确定 L_1 。

由式(9)得到 ξ_2 的估计值 $\hat{\xi}_2$ 和式(8)得到的 ξ_1 可得状态变量 x 的估计值：

$$\hat{x} = T \begin{bmatrix} \xi_1 & \hat{\xi}_2 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

令 ξ_2 的估计误差 $\tilde{\xi}_2 = \hat{\xi}_2 - \xi_2$ ，将式(7b)和式(9)作差，化简可得

$$\dot{\tilde{\xi}}_2 = (A_{22} - L_1 C_{22}) \tilde{\xi}_2 \quad (11)$$

由于 $A_{22} - L_1 C_{22}$ 是一个稳定矩阵，故误差动态方程(11)的解 $\tilde{\xi}_2$ 渐近趋近于零，即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{\xi}_2\| = 0$$

进而，状态量 x 的估计误差 $\|\tilde{x}\| = \|\hat{x} - x\| \leq \|T\| \|\tilde{\xi}_2\|$ ，可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{x}\| = 0 \quad (12)$$

由式(12)可得出以下结论：式(9)可以实现状态的渐近估计，进而得到发电机功角的渐近估计。

2.2 未知输入估计

由于式(7a)含有未知输入部分，则式(7a)的观测器为 [20]

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}}_1 = A_{11}\hat{\xi}_1 + A_{12}\hat{\xi}_2 + B_1 \hat{F} + L(C_{11}\hat{\xi}_1 - \eta_1) + E_{11}u_1 \\ \hat{F} = F_0(t, \hat{\xi}) - \gamma G(C_{11}\hat{\xi}_1 - \eta_1) \end{cases} \quad (13)$$

式中： γ 是一个足够大的正数； L 和 G 是该观测器增益矩阵。若式(4)和式(5)同时成立，存在一个 $r_1 \times r_1$ 的对称正定矩阵 P ，使得矩阵方程

$$\begin{cases} P(A_{11} + LC_{11}) + (A_{11} + LC_{11})^T P = -Q \\ B_1^T P = GC_{11} \end{cases} \quad (14)$$

成立。式中 Q 是一个正定矩阵。

求解如下 LMI 矩阵不等式

$$\begin{cases} P > I \\ PA_{11} + KC_{11} + (PA_{11} + KC_{11})^T < 0 \\ \begin{bmatrix} \delta_1 I & B_1^T P - GC_{11} \\ (B_1^T P - GC_{11})^T & \delta_1 I \end{bmatrix} \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

得到 P 、 G 、 K 和 δ_1 。当最优解的极小值 $\delta_1 = 0$ 时，得到 P 和 $L = P^{-1}K$ 满足式(14)。

式(13)中, \hat{F} 就是 F 的估计, $F_0(t, \hat{\xi})$ 是对 \hat{F} 的初始估计函数。 $F_0(t, \hat{\xi})$ 必须满足

$$\begin{cases} \left\| F(t, \xi) - F_0(t, \hat{\xi}) \right\| \leq \beta_1 + k_1 \left\| \xi - \hat{\xi} \right\| \\ \left\| \frac{dF}{dt}(t, \xi) - \frac{\partial F_0}{\partial t}(t, \hat{\xi}) - \frac{\partial F_0}{\partial \xi}(t, \hat{\xi}) \dot{\xi} \right\| \leq \\ \left\| \beta_2 + k_{21} \left\| \xi - \hat{\xi} \right\| + k_{22} \left\| \dot{\xi} - \dot{\hat{\xi}} \right\| \right\| \end{cases} \quad (16)$$

式中, β_1 、 k_1 、 β_2 、 k_{11} 和 k_{22} 是非负常数。

2.2.1 状态估计误差分析

令 $\tilde{\xi}_1 = \hat{\xi}_1 - \xi_1$ 、 $\tilde{\xi} = \hat{\xi} - \xi$, 可得式(13)和式(7a)之间的误差动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\xi}}_1 &= (A_{11} + LC_{11} - \gamma B_1 B_1^T P) \tilde{\xi}_1 + A_{12} \tilde{\xi}_2 + \\ & B_1 [F_0(t, \xi + \tilde{\xi}) - F(t, \xi)] \end{aligned} \quad (17)$$

选取式(17)的李雅普诺夫函数 $V(\xi_1) = \tilde{\xi}_1^T P \tilde{\xi}_1$, 对这个函数求导可得

$$\frac{dV(\tilde{\xi}_1)}{dt} = l(t, \tilde{\xi}_1) \quad (18)$$

由式(12)得, 存在一个正数 ε_1 使得

$$\left\| \tilde{\xi}_2 \right\| \leq \varepsilon_1 \quad (19)$$

结合式(14), 运用缩放的方法将式(16)和式(19)代入式(18)中, 则式(18)可化为

$$\begin{aligned} l(t, \tilde{\xi}_1) &= 2\tilde{\xi}_1^T P(A_{11} + LC_{11})\tilde{\xi}_1 - 2\gamma\tilde{\xi}_1^T P B_1 B_1^T P \tilde{\xi}_1 + \\ & 2\tilde{\xi}_2^T A_{12}^T P \tilde{\xi}_1 + 2\tilde{\xi}_1^T P B_1 [F_0(t, \xi + \tilde{\xi}) - F(t, \xi)] \leq \\ & 2\left\| B_1^T P \tilde{\xi}_1 \right\| \left[k_1 \left\| \tilde{\xi}_1 \right\| + \alpha_1 \right] - \tilde{\xi}_1^T Q \tilde{\xi}_1 - 2\gamma \left\| B_1^T P \tilde{\xi}_1 \right\|^2 \end{aligned} \quad (20)$$

式中, α_1 是一个正数。存在任意两个正数 μ_1 和 μ_2 使得

$$\begin{cases} 2k_1 \left\| B_1^T P \tilde{\xi}_1 \right\| \left\| \tilde{\xi}_1 \right\| \leq \mu_1^{-1} k_1^2 \left\| B_1^T P \tilde{\xi}_1 \right\|^2 + \mu_1 \left\| \tilde{\xi}_1 \right\|^2 \\ 2\alpha_1 \left\| B_1^T P \tilde{\xi}_1 \right\| \leq \mu_2^{-1} \alpha_1^2 \left\| B_1^T P \tilde{\xi}_1 \right\|^2 + \mu_2 \end{cases} \quad (21)$$

成立。将式(21)代入式(20), 可得

$$\begin{aligned} l(t, \tilde{\xi}_1) &\leq -\tilde{\xi}_1^T (Q - \mu_1 I) \tilde{\xi}_1 + \mu_2 - \\ & \left[2\gamma - \mu_1^{-1} k_1^2 - \mu_2^{-1} \alpha_1^2 \right] \left\| B_1^T P \tilde{\xi}_1 \right\|^2 \end{aligned} \quad (22)$$

选取合适的 μ_1 和 γ , 使得 $\mu_1 < \lambda_{\min}(Q)$, 即 $Q - \mu_1 I > 0$, 进而有 $\alpha = \lambda_{\min}[P^{-1}(Q - \mu_1 I)]/2 > 0$; $2\gamma > \mu_1^{-1} k_1^2 + \mu_2^{-1} \alpha_1^2$ 。运用缩放的方法可得

$$l(t, \tilde{\xi}_1) \leq -2\alpha V(\tilde{\xi}_1) + \mu_2 \quad (23)$$

取 $c = (\lambda_{\max}(P) / \lambda_{\min}(P))^{1/2}$, $r = c(\mu_2 / 2\alpha)^{1/2}$,

当 $t > 0$ 时, 由式(23)可得

$$\left\| \tilde{\xi}_1(t) \right\| \leq r + c \left\| \tilde{\xi}_1(0) \right\| e^{-\alpha t}$$

如果选择足够小的 μ_2 , 使得对于所有的 $t > 0$, 存在正数 ε_2 , 满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left\| \tilde{\xi}_1 \right\| \leq \varepsilon_2 \quad (24)$$

根据式(6)、式(12)、式(19)和式(24), 存在正数 ε_3

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left\| \tilde{x} \right\| \leq \varepsilon_2 \left\| T \right\| + \varepsilon_1 \left\| T \right\| = \varepsilon_3$$

2.2.2 未知输入估计误差分析

由于 B_1 可逆, 式(17)可化为

$$\hat{F} - F = B_1^{-1} \dot{\tilde{\xi}} - B_1^{-1} (A_{11} + LC_{11}) \tilde{\xi}$$

进而可以得到

$$\left\| \hat{F} - F \right\| = \left\| B_1^{-1} \right\| \left\| \dot{\tilde{\xi}} \right\| + \left\| B_1^{-1} (A_{11} + LC_{11}) \right\| \left\| \tilde{\xi} \right\| \quad (25)$$

存在一个正数 ε_4 使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left\| \hat{F} - F \right\| \leq \varepsilon_4$$

由于 F 和 f 在数值上的等价关系, 故

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left\| \hat{f} - f \right\| \leq \varepsilon_4 \quad (26)$$

由式(26)可得出下面结论: 式(13)可以实现同步发电机系统中未知输入渐近估计的目的。

3 仿真分析

为验证未知输入观测器对同步发电机功角的估计效果, 运用 Matlab 编写程序, 进行仿真验证。本文考虑单机无穷大系统下同步发电机功角参数的估计, 单机无穷大系统参数如表 1 所示^[17]。

表 1 单机无穷大系统物理参数

Table 1 Parameters of single machine infinite bus system

参数	数值	参数	数值
ω_s	1 p.u.	X_T	0.15 p.u.
D	0.1 p.u.	X_q	1.76 p.u.
M	7 s	X_d	1.8 p.u.
T'_{d0}	8 s	X'_d	0.3 p.u.
V_s	0.995 p.u.	X_L	0.325 p.u.
P_{m0}	0.9 p.u.		

根据表 1 可以确定式(3)中的各个参数:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0143 & 0 & -0.1429 \\ -0.2243 & 0 & -0.3685 & 0 \\ -0.1923 & 1.0802 & -0.4408 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.1429 & 0 \\ 0 & 0.125 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x_s = [1.1999 \ 0 \ 0.9879 \ 0.9]^T$$

经验证, 式(3)满足式(4)和式(5)。对式(3)进行状态变换, 使之变换成式(7)的形式。利用极点配置算法, 选择极点为 $[-40 \ -60]$, 得出发电机模型观测器的增益矩阵 L_1 , 进而得到式(7b)的观测器, 从而得到状态的估计。

假定 100 s 时如图 1 所示的系统输电线路处发生三相短路故障, 0.1 s 后系统恢复正常。根据式(10)对状态重构, 功角的实际值、估计值和功角估计的误差如图 2 所示。

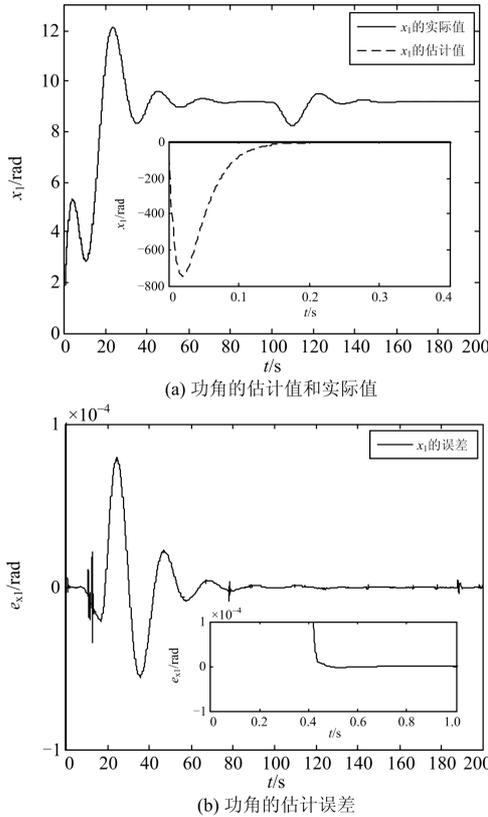


图 2 功角的估计及估计误差

Fig. 2 Estimation and estimation error of power angle

该结果表明, 观测器(9)可以在 0.5 s 以内快速的跟踪实际功角, 误差在 0.0001 rad 以内。

通过 LMI 工具箱求解式(15), 得出 G 、 P 、 K 和 δ_1 , 当 $\delta_1=0$ 时, 得到 P 和 $L=P^{-1}K$, 选择 $\gamma=10000$, 进而得到式(7a)的观测器。根据式(13)中的第二式对未知信息 $f(f=[f_1 \ f_2]^T)$ 重构, 未知信息的实际值、估计值和误差如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 观测器(14)可以在很短时间内跟随未知信息的变化。系统在 0.5 s 内可以很快的跟随未知信息, 误差在 0.001 p.u. 以内。第 100 s 和 100.1 s 时误差比较大, 但能在 0.01 s 内把误差减小

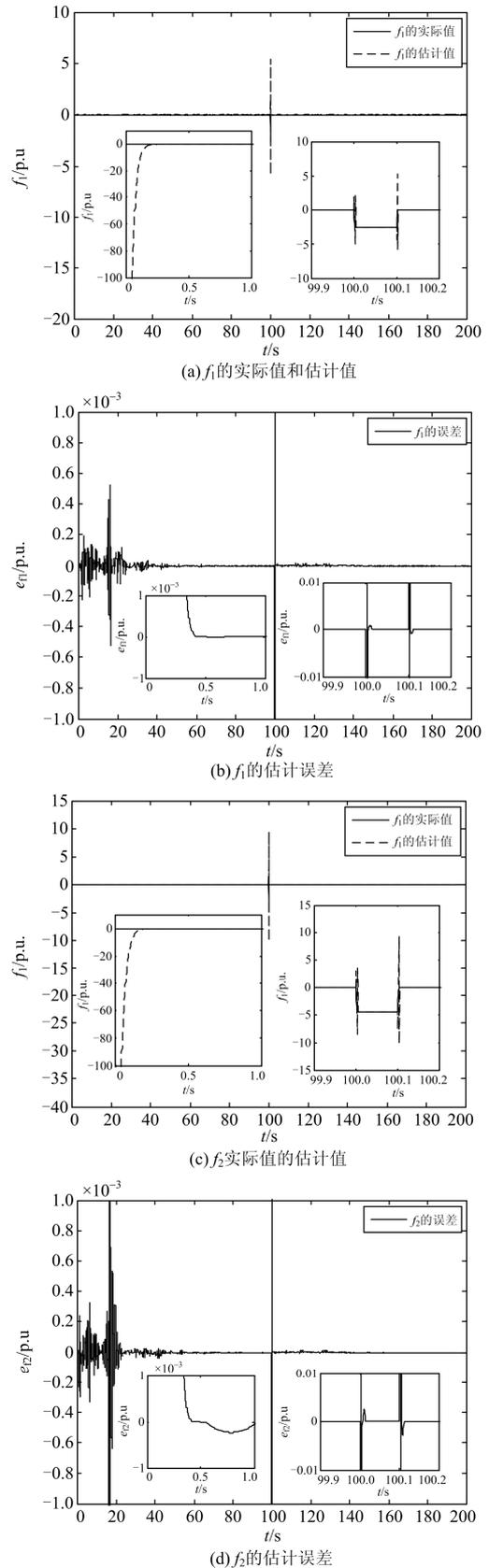


图 3 未知输入的估计和估计误差

Fig. 3 Estimation and estimation error of unknown inputs

到 0.01 p.u. 以内。这个较大误差产生的原因是在这两个时间点, 系统发生阶跃跳变, 使未知信号发生跳变, 而未知输入观测器不能跟随跳变瞬间。但之后在很短的时间里, 观测器又跟随上了信号的变化, 因此不影响对未知输入的估计。

4 结论

本文将发电机模型线性化过程产生的余项和系统运行参数的变化归结到未知输入中, 设计未知输入观测器, 估计发电机功角和系统中的未知输入。仿真结果证明, 未知输入观测器可以很好的跟踪发电机功角的变化, 具有误差小、响应速度快、对系统参数依赖性低。功角快速准确的估计, 对发电机运行状态判断、电力系统稳定运行、励磁控制等都具有重要的意义。同时, 可以很好的估计出系统中的未知输入部分。未知输入部分的准确估计, 预示着测量精度对模型参数变化的依赖性低, 对发电机容错控制具有重要意义。

但由于观测器对阶跃瞬间的估计效果差, 在发电机运行状态在短时间内发生频繁跳变时, 估计结果不够理想, 这也是接下来要解决的问题。

参考文献

- [1] 徐泰山, 鲍颜红, 杨莹, 等. $N-2$ 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 122-126.
XU Taishan, BAO Yanhong, YANG Ying, et al. Online fast transient angle stability assessment of $N-2$ contingency set[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 122-126.
- [2] 魏伟, 许胜辉, 魏岚婕. 一种并联有源电力滤波器变结构控制策略[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 298-300.
WEI Wei, XU Shenghui, WEI Lanjie. A variable structure control strategy for shunt active power filter[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 298-300.
- [3] 范高锋, 赵海翔, 戴慧珠. 大规模风电对电力系统的影响和应对策略[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(7): 44-48.
FAN Gaofeng, ZHAO Haixiang, DAI Huizhu. The impact and countermeasure of large scale wind power on power system[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(7): 44-48.
- [4] 梁振光. 发电机功角的实时计算方法[J]. 继电器, 2004, 32(1): 12-15.
LIANG Zhenguang. Real-time calculation method of generator power angle[J]. Relay, 2004, 32(1): 12-15.
- [5] 邵雅宁, 唐飞, 刘涤尘, 等. 一种适用于 WAMS 量测数据的系统暂态功角稳定评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 33-39.
SHAO Yaning, TANG Fei, LIU Dichen, et al. An approach of transient angle stability assessment in power system for WAMS measured data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 33-39.
- [6] 丁孝华, 孙国城, 顾锦汶. 一种同步发电机功角测量的同步电抗折算法[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 188-190.
DNIG Xiaohua, SUN Guocheng, GU Jinwen. A new synchronous reactance conversion approach to power angle measurement of synchronous generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 188-190.
- [7] 杨永标, 侯明国, 周捷. 一种水轮发电机功角精确测量方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 96-99.
YANG Yongbiao, HOU Mingguo, ZHOU Jie. An accurate power angle measurement method for hydropower generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 96-99.
- [8] 王少荣, 孙海顺, 苗世洪, 等. 同步发电机功角高精度测量方法及其实现[J]. 中国机械工程, 1999, 10(6): 667-670.
WANG Shaorong, SUN Haishun, MIAO Shihong, et al. High precision measurement for the rotor angle of the synchronous generators and its implementation[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(6): 667-670.
- [9] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [10] 耿池勇, 高厚磊, 刘炳旭. 基于同步相量测量技术的功角监测系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(3): 17-19.
GENG Chiyong, GAO Houlei, LIU Bingxu. PMU based real-time monitoring system for power angle[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 15(3): 17-19.
- [11] 龙厚军, 胡志坚, 陈允平. 基于 GPS 的功角测量及同步相量在电力系统中的应用研究[J]. 继电器, 2004, 32(3):

- 39-44.
LONG Houjun, HU Zhijian, CHEN Yunping. A study of power angle measurement based on GPS and application of synchronized phasor in power system[J]. Relay, 2004, 32(3): 39-44.
- [12] 李刚, 王少荣, 夏涛, 等. 电力系统广域动态监测中的功角直接测量技术[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 45-50.
LI Gang, WANG Shaorong, XIA Tao, et al. Direct measurement of power angles in wide-area power system dynamic supervisory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 45-50.
- [13] 周捷, 张道农, 于跃海, 等. 发电机内电势相角与功角的测量方法及应用[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 49-53.
ZHOU Jie, ZHANG Daonong, YU Yuehai, et al. Measurement and engineering application for internal voltage angle and power angle of generators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(2): 49-53.
- [14] 谢小荣, 肖晋宇, 李建, 等. 一种估计同步发电机功角的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 106-110.
XIE Xiaorong, XIAO Jinyu, LI Jian, et al. A new approach to estimating power angle of synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 106-110.
- [15] 林纪凌, 江和, 史坤涛, 等. 磁耦合无线供电在中压电气设备在线监测中的应用研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(20): 10-15.
LIN Jiling, JIANG He, SHI Kuntao, et al. Wireless Power supply for medium-voltage electrical equipment online monitoring sensor based on magnetically coupled resonance[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(20): 10-15.
- [16] 姚钢, 陈少霞, 王伟峰, 等. 分布式电源接入直流微电网的研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2015(4): 1-6.
YAO Gang, CHEN Shaoxia, WANG Weifeng, et al. Overview of research on DC micro-grid for distributed power access[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(4): 1-6.
- [17] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [18] HUI S, ZAK S H. Observer design for systems with unknown inputs[J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2005, 15(4): 431-446.
- [19] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [20] CORLESS M, TU J. State and input estimation for a class of uncertain systems[J]. Automatica, 1998, 34(6): 757-764.

收稿日期: 2015-08-21; 修回日期: 2015-11-05

作者简介:

杨凌霄(1964-), 女, 硕士, 教授, 研究方向为信息处理与智能控制; E-mail: yanglx@hpu.edu.cn

杨松林(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统励磁控制。E-mail: 15993793258@163.com

(编辑 张爱琴)