

电力系统实时相角测量中的参考相角预测

卢志刚 郝玉山 康庆平 郝育黔 杨以涵

(华北电力大学电力系 071003 保定)

摘 要 电力系统实时相角测量系统对于电力系统的稳定监控具有重要意义,而参考相角的预测是实时相角测量系统的核心之一。文中在建立了发电机功角数学模型的基础上,推导了 α - β - γ 滤波器的一种求解表达式,并应用 α - β - γ 滤波器对电力系统实时相角测量中的参考相角进行预测,以便能就地产生一个超前的参考相角用于就地监控。仿真结果表明, α - β - γ 滤波器能够很好地预测发电机的功角变化。

关键词 相角测量 参考相角 预测

0 引言

随着通信技术、计算机技术的发展,尤其是全球卫星定位系统(GPS)的出现,使得对电力系统具有重要作用的相角测量得以实现。目前,国内外都相继研制了基于 GPS 技术的相角测量装置^[1~3],并开展了基于相角测量的电力系统的监视、保护和稳定控制的理论及应用研究工作^[4~6]。文献[1]从相角的实时监视和将其应用于控制系统出发,提出了一种新的电力系统实时相角监控系统,它既有集中监控的功能,亦能完成分散的就地监控;并能提供一个系统参考点的相角用于就地监控,以解决系统的暂态稳定问题。由于通信条件的限制,选定的参考点(也称参考站)的参考相角要间隔一定的时间,才能到达各个测量点,即存在时延。为了克服时延,本文用 α - β - γ 滤波器对参考相角进行预测,以便进行就地监控。仿真研究表明,预测结果良好。

1 发电机的数学模型

电力系统实时相角监控系统^[1]包括:参考站、相角测量装置和中心处理机。参考站应设置在系统的主力发电厂或中枢变电站;中心处理机设置于调度中心;相角测量装置设置于发电厂或变电站(也称相角测量子站);电力通信网把中心处理机和分散于各地的相角测量装置相连接。参考站送出的参考相角,通过通信网送到各个相角测量子站,各子站根据自己的相角和参考相角便可得到子站相对于参考点的角度,这个信号可用于当地控制,如:发电机的调速、SVC、切机等。

由于受到通信速率的限制,参考相角需要间隔

一定的时间才能到达各相角测量装置,因此需要在相角测量装置中建立参考相角的数学模型,以便对其进行预测。参考点一般选主力发电厂或几个发电机的加权平均,可用发电机的模型来进行描述。

发电机的运动方程为:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \ddot{\delta} + D \dot{\delta} = P_m - P_e \quad (1)$$

一般 D 比较小,所以

$$T_J \ddot{\delta} = \omega_0 \Delta P \quad (2)$$

当 ΔP 变化不大时,可以认为是常力作用下的二阶系统,其方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega(t) \quad (3)$$

其中 x 就是相角 δ ; ω 是白噪声。

其离散化方程为:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \dot{x}(k+1) \\ \ddot{x}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ \ddot{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{6}T^3, \frac{1}{2}T^2, T \end{bmatrix}^T W(k) \quad (4)$$

其中 $W(k)$ 是白噪声,其均值为零,方差为 σ_w^2 ; $x(k)$ 表示实时测量的相角; $\dot{x}(k)$ 表示速度差; $\ddot{x}(k)$ 表示加速度。

测量方程为:

$$Y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ \ddot{x}(k) \end{bmatrix} + V(k) \quad (5)$$

其中 $V(k)$ 是测量白噪声,均值为零,方差为 σ_v^2 。

2 α - β - γ 滤波器

由于在实时测量中加入状态预测,考虑到算法的实时性、算法的预测精度和电力系统参考点的角加速度相对较小,本文选用 α - β - γ 滤波器。 α - β - γ 滤波器算法简单,便于实际应用;当系统动态变化不大时,跟踪精度较高,被广泛应用于机动目标的跟踪^[7]。

将(4)式、(5)式重写为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{X}(k) + \mathbf{B} \mathbf{W}(k) \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{C} \mathbf{X}(k) + \mathbf{D} \mathbf{V}(k) \quad (7)$$

则卡尔曼滤波方程为:

$$\mathbf{X}((k+1)/k) = \mathbf{A} \mathbf{X}(k/k) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}((k+1)/k) = \mathbf{A} \mathbf{P}(k/k) \mathbf{A}^T + \mathbf{B} \sigma_w^2 \mathbf{B}^T \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{X}((k+1)/(k+1)) = \\ & \mathbf{X}((k+1)/k) + \mathbf{K}(k+1) \cdot \\ & [\mathbf{Y}(k+1) - \mathbf{C} \mathbf{X}((k+1)/k)] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}(k+1) = [1 - \mathbf{K}(k+1) \mathbf{C}] \mathbf{P}((k+1)/k) \quad (11)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1) \mathbf{C}^T (\mathbf{D} \mathbf{R} \mathbf{D}^T)^{-1} \quad (12)$$

稳态条件时:

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{K}$$

$$\mathbf{P}((k+1)/k) = \mathbf{P}(k+1) = \mathbf{P}(k) = \mathbf{P}$$

令: $\mathbf{K} = [\alpha, \beta/T, \gamma/T^2]^T$, 跟踪指数为 $\Gamma = T^3(\sigma_w/\sigma_v)^{[8,9]}$, 由稳态条件得到一种求解的简洁表达式:

$$\begin{aligned} & t^8 + \Gamma t^7 + \left(\frac{5}{18} \Gamma^2 - 4 \right) t^6 + \left(5\Gamma + \frac{1}{36} \Gamma^3 \right) t^5 + \\ & \left(6 - \frac{2}{9} \Gamma^2 + \frac{1}{1296} \Gamma^4 \right) t^4 + \\ & \left(-5\Gamma - \frac{1}{36} \Gamma^3 \right) t^3 + \left(-4 + \frac{5}{18} \Gamma^2 \right) t^2 - \\ & \Gamma t + 1 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $t = \sqrt{1-\alpha}$ 。

式(13)可用牛顿迭代法求解出 t, α, β, γ 与 t 的关系如下:

$$\alpha = 1 - t^2 \quad (14)$$

$$\gamma = t \Gamma \quad (15)$$

$$\beta = \sqrt{2\alpha\gamma - \frac{\gamma^2}{12}} \quad (16)$$

这样状态滤波方程如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k/(k-1)) = \mathbf{A} \mathbf{X}((k-1)/(k-1)) \\ \mathbf{X}(k/k) = \mathbf{X}(k/(k-1)) + \\ \mathbf{K}[\mathbf{Y}(k) - \mathbf{C} \mathbf{X}(k/(k-1))] \end{cases} \quad (17)$$

当给定 σ_w^2, σ_v^2 和离散时间 T 后, $\mathbf{K}$ 可离线求出。

3 参数选取及预测算法

由发电机的运动方程得:

$$\begin{aligned} \{\ddot{\delta}\}_{(s)/s^2} &= \frac{\{\omega_0\}_{(s)/s}}{\{T_J\}_s} \Delta P = \frac{18\,000}{6 \sim 8} \Delta P = \\ & (3\,000 \sim 2\,250) \Delta P \end{aligned} \quad (18)$$

则由上式可得:

$$\{\ddot{\delta}\}_{(s)/s^3} = (3\,000 \sim 2\,250) \Delta \dot{P} \quad (19)$$

$\ddot{\delta}$ 在系统动态变化时,是一个含有正弦函数的变量,因此 $\ddot{\delta}$ 也是一个含有正弦函数的变量。当周期近似为 1 s, $\Delta \dot{P}$ 近似为 1 时, σ_w 取为 500, 根据相角测量装置的硬件分析,其测量噪声 σ_v 取为 0.05。

考虑到我国目前电力系统的通信现状,通信速率是 2400 bit/s 或 4800 bit/s, 离散周期取为 0.1 s, 即从参考站每隔 0.1 s 向各测量站送一个参考相角。这样可离线求得 α - β - γ 滤波器的参数。参考相角的预测算法如下。

(1) α - β - γ 滤波器

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k/k) &= \mathbf{A} \mathbf{X}((k-1)/(k-1)) + \\ & \mathbf{K}[\mathbf{Y}(k) - \mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{X}((k-1)/(k-1))] \end{aligned} \quad (20)$$

(2) 预测 N 步

$$\mathbf{X}((k+N)/k) = \mathbf{A}^N(T) \mathbf{X}(k/k) \quad (21)$$

其中 $\mathbf{A}$ 阵中的 T 替换为 0.02, 即每周期预测一次, 这样便于就地监控; N 最大为 5。

4 仿真研究

以电力科学研究院电力系统暂稳态仿真程序(1988年版)中的 8 机 31 节点系统为例。当系统动态变化,即相角发生变化时,取 $\sigma_w = 500, \sigma_v = 0.05, T = 0.1$ s, 求得 α - β - γ 滤波器的参数为: $\alpha = 0.985, \beta = 1.56, \gamma = 1.29$; 当系统稳态时,取 $\sigma_w = 50, \sigma_v = 0.05$, 求得 α - β - γ 滤波器的参数为: $\alpha = 0.769, \beta = 0.54, \gamma = 0.192$ 。参数确定后对该例题进行了多种故障下的仿真研究,无论系统受到小扰动、大扰动或在失步时,采用超前 0.1 s 预测,均能很好地预测发电机功角的变化。表 1 列出了系统受到大扰动时,预测的发电机功角和实际的发电机功角的偏差。从预测结果看 α - β - γ 滤波器能够很好地预测发电机功角的变化;从表中还可以看出,选 1 号机或 3 号机作为系统的参考相角比较合适。图 1 和图 2 分别给出 24-23 线 0 s 开始三相短路, 0.22 s 三相断开, 0 s ~ 5 s 内 1 号、2 号、3 号和 7 号发电机的功角变化及预测偏差。

表 1 发电机功角超前 0.1 s 预测时的最大偏差
Table 1 The maximum errors of the power angles of generators when predicting ahead 0.1 s (°)

故障类型	1 号机	2 号机	3 号机	4 号机	5 号机	7 号机	8 号机
24—23 线 0 s 开始三相短路， 0.22 s 三相断开	3.19	2.67	1.83	2.18	1.68	1.3	1.48
22—9 线 0 s 开始三相短路， 0.22 s 三相断开	1.81	9.37	4.1	5.9	4.0	2.95	2.79
22—21 线 0 s 开始三相短路， 0.22 s 三相断开	1.43	7.87	3.5	6.3	3.7	2.37	2.95
21—19 线 0 s 开始三相短路， 0.22 s 三相断开	1.49	6.5	1.63	6.5	2.99	2.28	2.5
30—19 线 0 s 开始三相短路， 0.22 s 三相断开	1.14	1.58	1.3	2.6	5.1	9.0	8.4
2—9 线 0 s 开始三相短路， 0.22 s 三相断开	2.56	17	1.1	2.88	1.56	1.72	1.65
24—23 线 0 s 开始三相短路， 0.15 s~5 s, 7 号机切除 50% 出力	3.18	3.15	5.49	4.18	5.66	12	10.7
	3.18	3.15	5.49	3.1	3.9	8	10.7

注：每个故障的第一行数据表示故障发生 10 s 后跟踪的最大偏差；第二行数据表示故障发生 0.5 s 后跟踪的最大偏差。

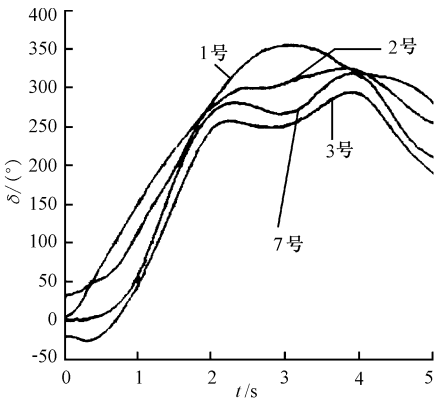


图 1 发电机功角变化
Fig. 1 The power angle curves of generators

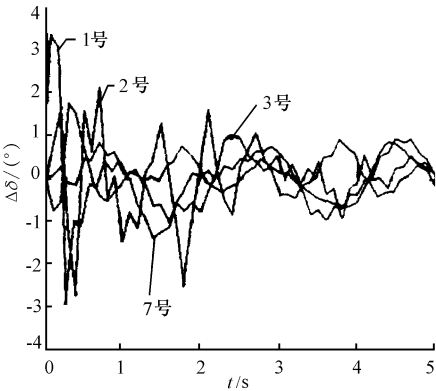


图 2 预测偏差
Fig. 2 The error curves of prediction

和稳定控制的理论及应用研究,而参考相角的预测是实时相角测量系统^[1]的核心之一。本文在建立发电机功角数学模型的基础上,应用 $\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$ 滤波器对电力系统实时相角测量中的参考相角进行预测,以便就地产生一个超前的参考相角用于就地监控,克服由于通信时延造成的参考点相角的滞后。仿真结果表明,预测效果良好。

参考文献

1 卢志刚,郝玉山,康庆平,等. 电力系统实时相角监控系统研究. 电力系统自动化,1997,21(9):17~19

2 Centeno V, De Le Ree J, Phadke A G *et al.* Adaptive Out-Of-Step Relaying Using Phasor Measurement Techniques. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(4):12~17

3 Denys P, Counan C, Hossenlopp L *et al.* Measurement of Voltage Phase for the French Future Defense Plan Against Losses of Synchronism. IEEE Trans on PWRD, 1992,7(1):442~449

4 Burnett R O, Butts M M, Cease T W *et al.* Synchronized Phasor Measurement of a Power System Event. IEEE Trans on PWRD, 1994,9(3):1643~1649

5 Stanton E S, Slivinsky C, Martin K *et al.* Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis in Stabilizing Large Disturbances. IEEE Trans on PWRD, 1995,10(1):297~302

6 郭强,刘晓鹏,吕世荣,等. GPS 同步时钟用于电力系统暂态稳定性预测和控制. 电力系统自动化,1998,22(6):11~13

7 周宏仁,敬忠良,王培德,等. 机动目标跟踪. 国防工业出版社,1991

8 Kalata P R. The Tracking Index: A Generalized

5 结语

电力系统实时相角测量系统能加强电力系统的监视、保护和稳定控制,促进电力系统的监视、保护

Parameter for α - β and α - β - γ Target Trackers. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1984. 3: 174~182

- 9 Sudano J J. The α - β - γ Tracking Filter with Noisy Jerk as the Maneuver Model. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1993. 4:578~580

卢志刚,男,1963年生,博士研究生,主要研究电力系统相角测量及其应用等。

郝玉山,男,1960年生,博士,教授,主要从事电力系统稳定与控制等方面的研究。

康庆平,男,1945年生,硕士,副教授,主要从事配电系统自动化等方面的研究。

PREDICTION OF REFERENCE PHASE ANGLE IN REAL-TIME PHASE ANGLE MEASUREMENT OF ELECTRIC POWER SYSTEM

Lu Zhigang, Hao Yushan, Kang Qingping, Hao Yuqian, Yang Yihan

(North China Electric Power University, 071003. Baoding, China)

Abstract The real-time phase angle measurement is very important to the monitoring and control of power system. and the prediction of the reference phase angle is one of the cores of the real-time phase angle measurement system. Based on setting up the mathematical model of the power angle of the generator. a solving expression of α - β - γ filter is concluded. The paper applies the α - β - γ filter to predict the reference phase angle in order to provide a leading reference phase angle for monitoring and control on the spot. The simulating results show that α - β - γ filter can predict the change of the power angle of the generator efficiently.

Keywords phase angle measurement reference phase angle prediction