

UNA EVALUACION DEL FILTRO KALMAN EN LA IDENTIFICACION DE LOS
PARAMETROS DE LA MAQUINA SINCRONA

ANTONIO BORRERO VEGA
Universidad de Cuenca
E.E.R.C.S. C.A

RESUMEN

Un algoritmo, basado en el Filtro Kalman, ha sido desarrollado para estimar las trayectorias de las variables de estado de un sistema dinámico, a la vez que identificar los parámetros desconocidos del mismo. Se asume un modelo matemático conocido, que describa al sistema en estudio de la manera más exacta. El algoritmo implementado a un programa digital, es capaz de ir mejorando o "Filtrando", las trayectorias estimadas para las variables de estado del sistema, e "Identificar" los valores de los parámetros desconocidos, al recibir información de las trayectorias de las variables observables.

Una aplicación de este método ha sido realizada para identificar los parámetros de un Generador Síncrono usados en estudios de estabilidad; parámetros que generalmente no se disponen y deben ser estimados. Para tal objeto, se ha incorporado al algoritmo de identificación basado en el Filtro Kalman, un modelo matemático usado para la máquina síncrona. Suministrándole al algoritmo las trayectorias medidas del voltaje de campo, de los voltajes en terminales y corrientes del generador, cuando ocurre un transitorio, el programa desarrollado ha sido capaz de identificar hasta cuatro parámetros subtransitorios.

En este trabajo se presenta una explicación del algoritmo y de su uso; así como una evaluación del método, presentándose las ventajas y desventajas del mismo.

INTRODUCCION

La utilización de un algoritmo de identificación basado en el Filtro Kalman y empleado en la determinación de parámetros para elementos de un sistema de potencia es por primera vez presentado en la referencia 1. En la misma se llega a la conclusión que el método es capaz de identificar exitosamente los parámetros de una máquina síncrona modelada matemáticamente como un sistema dinámico de únicamente tres estados y despreciando el efecto de la saturación. En este trabajo se presenta una evaluación del algoritmo de identificación cuando se utiliza un modelo matemático mucho más detallado del generador síncrono, el mismo que considera seis estados e incluye la corrección debida al efecto de saturación de la máquina. Las ecuaciones del modelo utilizado para la máquina se describen a lo largo del texto de este trabajo. En lo referente al algoritmo de identificación, el mismo que es una versión mejorada del empleado en la referencia 1, se presenta en el Apéndice A. Para poder evaluar el algoritmo, las trayectorias de la velocidad rotórica, voltaje de campo, valores instantáneos de voltajes y corrientes en los terminales, para las tres fases, se asume que pueden conocerse por medición. Estas trayectorias se simulan, para un sistema que contiene una máquina conectada a una barra infinita mediante dos líneas en paralelo; obteniéndolas para el momento en que una de las dos líneas se desconecta. En el programa de simulación se emplean las mismas ecuaciones que representan la máquina, incorporadas al programa de identificación. Se presenta un método que calcula las trayectorias en componentes d-q de los voltajes y corrientes del estator, a partir de las trayectorias obtenidas en componentes de fases (a-b-c). Usando las trayectorias en componentes d-q, el algoritmo de identificación es evaluado para la determinación

de varios grupos de parámetros de la máquina síncrona.

ECUACIONES UTILIZADAS PARA MODELAR LA MAQUINA SINCRONA.

Para evaluar el método, se ha utilizado un modelo matemático no lineal de la máquina síncrona, que es uno de los más detallados. Este es el que se encuentra implementado en el "PSS/E software", un paquete de programas para la simulación de sistemas de potencia, desarrollado por Power Technologies, Inc., y muy utilizado por empresas eléctricas y universidades de los Estados Unidos.

Para obtener las ecuaciones que a continuación se presenta, los términos de velocidad de voltaje en los devanados ficticios d y q del estator, se han asumido despreciables; esto es $\dot{\psi}_d = \dot{\psi}_q = 0$. Adicionalmente, la velocidad de sincronismo, ω_0 , se utiliza en las ecuaciones de voltaje, en lugar de la velocidad instantánea del rotor,

Ecuaciones de estado y de salida:

$$y_1 = K_3 x_3 - K_4 x_4 - P_2 I_q - P_{14} I_d \quad (1)$$

$$y_2 = K_1 x_1 + K_2 x_2 + P_1 I_d - P_{14} I_q \quad (2)$$

$$\dot{x}_1 = P_7 [E_{fd} - (1 + K_5)x_1 + K_5 x_2 + K_7 I_d - S_d] \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = P_3 [x_1 - x_2 + (P_5 - P_{13})I_d] \quad (4)$$

$$\dot{x}_3 = -P_8 [(1 + K_6)x_3 + K_6 x_4 + K_8 I_q - S_q] \quad (5)$$

$$\dot{x}_4 = -P_4 [x_3 + x_4 - (P_6 - P_{13})I_q] \quad (6)$$

$$\dot{x}_5 = P_{15} [T_m - d I_q + q I_d] \quad (7)$$

$$\dot{x}_6 = x_5 - \omega \quad (8)$$

Donde:

$$y = [v_d \ v_q]^t \quad (9)$$

$$x = [E'_q \ \psi_{kd} \ E'_d \ \psi_{kq} \ \omega \ \delta]^t \quad (10)$$

$$P_1 \text{ a } P_8 =$$

$$\begin{bmatrix} x_d'' & x_q'' & 1/T_{do}'' & 1/T_{qo}'' & x_d' & x_q' & 1/T_{do}' & 1/T_{qo}' \end{bmatrix}^t \quad (11)$$

$$P_{11} = x_d', \ P_{12} = x_q', \ P_{13} = x_1, \ P_{14} = r; \ y,$$

$$P_{15} = 1/T_j$$

$$K_1 = \frac{P_1 - P_{13}}{P_5 - P_{13}} \quad (12)$$

$$K_2 = \frac{P_5 - P_1}{P_5 - P_{13}} \quad (13)$$

$$K_3 = \frac{P_2 - P_{13}}{P_6 - P_{13}} \quad (14)$$

$$K_4 = \frac{P_6 - P_2}{P_6 - P_{13}} \quad (15)$$

$$K_5 = \frac{(P_{11} - P_5)(P_5 - P_1)}{(P_5 - P_{13})^2} \quad (16)$$

$$K_7 = \frac{(P_{11} - P_5)(P_1 - P_{13})}{P_5 - P_{13}} \quad (17)$$

$$K_6 = \frac{(P_{12} - P_6)(P_6 - P_2)}{(P_6 - P_{13})^2} \quad (18)$$

$$K_8 = \frac{(P_{12} - P_6)(P_2 - P_{13})}{P_6 - P_{13}} \quad (19)$$

$$\psi_d = K_1 x_1 + K_2 x_2 + P_1 I_d \quad (20)$$

$$\psi_q = -K_3 x_3 + K_4 x_4 + P_2 I_q \quad (21)$$

$$\psi_{ad} = K_1 x_1 + K_2 x_2 + (P_1 - P_{13}) I_d \quad (22)$$

$$\psi_{aq} = -K_3 x_3 + K_4 x_4 + (P_2 - P_{13}) I_q \quad (23)$$

$$\psi_a = (\psi_{ad}^2 + \psi_{aq}^2)^{1/2} \quad (24)$$

$$f(\psi_a) = P_9 (\psi_a - P_{10})^2 \quad \text{para } \psi_a > P_{10}$$

$$= 0 \quad \text{para } \psi_a \leq P_{10} \quad (25)$$

$$S_d = \frac{\psi_{ad}}{\psi_a} f(\psi_a) \quad (26)$$

$$S_q = \frac{(P_{12} - P_{13}) \psi_{aq}}{(P_{11} - P_{13}) |\psi_a|} f(\psi_a) \quad (27)$$

Los detalles de la deducción de las ecuaciones anteriores se presenta en las referencias 2 y 3. El modelo matemático indicado por las ecuaciones (1) a la (27), es básicamente el mismo modelo recomendado por de Melb y otros, como se indica en la referencia 4; la única diferencia consiste en la representación de la función de saturación que para este trabajo se la hace depender de ψ_a en vez de ψ_{as} como se sugiere en la referencia 5. En los estudios que se presentan en este trabajo, así como en otra investigación con igual finalidad [6], que acompaña a ésta en las VI JIEE; se han utilizado también las funciones de saturación de la referencia 4. Los resultados en la identificación de los parámetros en ambos casos, han demostrado no depender en absoluto de la función escogida.

SISTEMA ESTUDIADO

El propósito de este trabajo, es el de evaluar al algoritmo de identificación basada en el Filtro Kalman, en la determinación de varios conjuntos de constantes de un generador para estudios de estabilidad, cuando un grupo de trayectorias de las variables medibles de una máquina, se han obtenido durante un comportamiento transitorio. La característica del transitorio debe ser de tal forma que las variables

de salida estén afectadas por todos los estados de la máquina y por ende depender de todos los parámetros d-q de ésta. Una prueba típica que satisface dicha condición, es la desconexión de una línea cuando el flujo resultante está entre los ejes d y q.

El alcance de este trabajo se ha limitado a la evaluación del método de identificación mencionado, únicamente cuando se han usado las trayectorias simuladas de las variables de salida. Para obtener dichas trayectorias, se ha tomado al sistema compuesto por un generador conectado a una barra infinita, como se ilustra en la Figura 1. Cuando el generador está operando con una carga determinada, uno de los circuitos de la línea de transmisión es abierta y bajo esa condición se obtienen las trayectorias requeridas. Los parámetros del generador y de la línea de transmisión en las bases del generador se indican en la Tabla 1.

Para calcular p_9 y p_{10} , las constantes que se necesitan para la ecuación (25), la función de saturación $f(\psi_a)$, se asume que toma los valores de 0.2 y -0.96 para los voltajes en vacío iguales a 1.0 y 1.2, respectivamente.

Descripción de los parámetros	Valor en p.u.
x_d Reactancia síncrona no saturada de eje d.	1.70
x_q Reactancia síncrona no saturada de eje q.	1.64
x_1 Reactancia estatórica de dispersión.	0.15
x_d' Reactancia transitoria no saturada de eje d.	0.245
x_q' Reactancia transitoria no saturada de eje q.	0.38
x_d'' Reactancia subtransitoria no saturada de eje d.	0.185
x_q'' Reactancia subtransitoria no saturada de eje q.	0.185
T_{d0}' Constante de tiempo transitorio en circuito abierto de eje d.	2224.5
T_{d0}'' Constante de tiempo transitorio en circuito abierto de eje q.	240.0
T_{d0}''' Constante de tiempo subtransitorio en circuito de eje d.	11.48
T_{q0}''' Constante de tiempo subtransitorio en circuito de eje q.	28.27
r Resistencia Estatórica	0.0
T_j Constante de tiempo de la Inercia.	1786.94
x_{tr} Reactancia de dispersión de cada transformador.	0.2
r_{tr} Resistencia del transformador.	0.0
$x_{línea}$ Reactancia por fase de cada línea.	0.6
$r_{línea}$ Resistencia por fase de cada línea.	0.04

Tabla I.- Datos del generador y del sistema de transmisión en p.u. El tiempo base es - 1/120^o segundos.

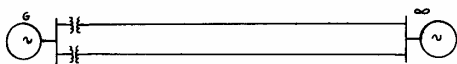


Figura 1.- Sistema estudiado.

Trayectorias de entrada al algoritmo de Identificación.

Un resumen de la deducción del algoritmo de identificación basado en el Filtro Kalman, que se presenta en detalle en las referencias 2 y 3, se lo incluye en este trabajo, como Apéndice A. Los resultados de la evaluación del algoritmo que se verán en la siguiente sección, han sido encontrados cuando las trayectorias E_{fd} , I_d , I_q , V_d y V_q se obtuvieron al ocurrir un transitorio en el generador. En el proceso de identificación, las primeras tres variables conforman el vector de control \underline{u} y los dos siguientes corresponden al vector de salida \underline{y} . Mediante esta selección de las ecuaciones (3) a (6) se hacen independientes de las ecuaciones (7) y (8), y por lo tanto son consideradas como el conjunto completo de las ecuaciones de estado, correspondientes a la ecuación (A.3) del Apéndice A. Luego, las ecuaciones (1) y (2) consisten en las ecuaciones de salida, dadas en la forma de la ecuación (A.4).

Las trayectorias de I_d , I_q , V_d y V_q , las cuales se asumen disponibles para poder utilizar el método, no son cantidades medibles; sin embargo pueden calcularse en base a la posición inicial del ángulo del rotor y las trayectorias medidas de la velocidad del rotor; así como de los valores instantáneos de corrientes y voltajes estatóricos de las tres fases. A partir de la referencia 7, se conoce que la posición angular del rotor cumple con las siguientes ecuaciones:

$$d\theta = \omega dt \quad (28)$$

$$\theta_0 = \pi/2 + \int_0^t \omega dt \quad (29)$$

Donde:

θ y θ_0 son la posición angular del rotor para los tiempos t y t_0 , respectivamente.

Aplicando la regla trapecoidal para la integración numérica de la ecuación (28), se tiene:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \frac{k + k-1}{2} \Delta t \quad (30)$$

Donde:

Δt es el intervalo de la muestra
 θ_j y ω_j son los valores que toman dichas variables en un tiempo $t = t_0 + j \Delta t$.

Comenzando desde θ_0 , según ecuación (29), y usando sucesivamente la ecuación (30), al disponerse de los valores medidos de ω , se obtiene la trayectoria de θ . Para obtener las trayectorias de I_d , I_q , V_d y V_q , se usan las siguientes ecuaciones dadas en la referencia 7 a partir de la transformada de Park.

$$I_d = \frac{\sqrt{2}}{3} [i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})] \quad (31)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{2}}{3} [i_a \sen\theta + i_b \sen(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c \sen(\theta + \frac{2\pi}{3})] \quad (32)$$

$$V_d = \frac{\sqrt{2}}{3} [v_a \cos\theta + v_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + v_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})] \quad (33)$$

$$V_q = \frac{\sqrt{2}}{3} [v_a \sen\theta + v_b \sen(\theta - \frac{2\pi}{3}) + v_c \sen(\theta + \frac{2\pi}{3})] \quad (34)$$

En las Figuras 2 y 3 se puede observar las trayectorias de voltajes y corrientes trifásicas que se obtuvieron tras la desconexión de uno de los circuitos del sistema en estudio, cuando el generador se encontraba operando con $P = 0.8$ (p.u.), $f.p. = 0.8(-)$ y $V_t = 1.0$ (p.u.), para un intervalo de muestreo $\Delta t = 1$ ms. En las figuras 4 y 5 se observan las trayectorias calculadas de la variación de velocidad del rotor con respecto a la sincrónica y los valores que toma el ángulo de potencia bajo las mismas condiciones antes indicadas. La curva 1 corresponde al tratamiento de la saturación de las referencias 2, 3 y 5, mientras que la curva 2 se consigue usando la función de saturación de la referencia 4.

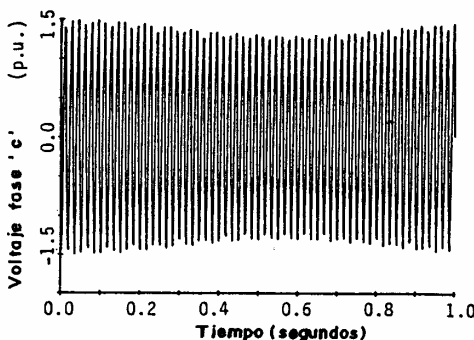
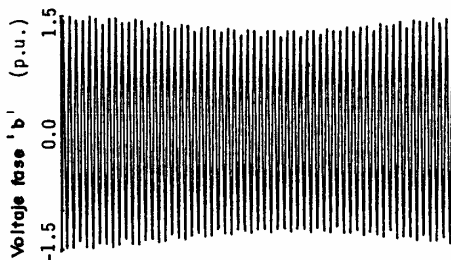
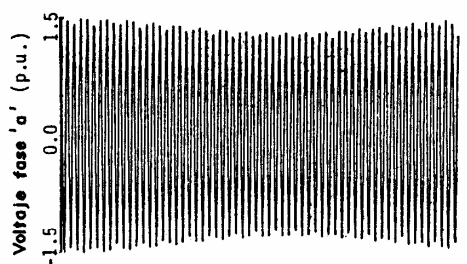


Fig. 2.- Trayectorias del voltaje en los terminales del generador en las tres fases simuladas por el programa SA.

RESULTADOS DE LA EVALUACION

Para producir los resultados que se describen en esta sección, tres programas digitales han sido utilizados, los mismos que a continuación se describen:

- Programa de Simulación:

Este programa emplea las ecuaciones (3) a la (8) como el modelo de la máquina síncrona en la forma de espacio de estado, y simula al sistema en estudio, mostrado en la Figura 1 cuyos valores se indican en la Tabla I; cuando uno de los circuitos de las dos líneas en paralelo es abierto. Las magnitudes de salida de la versión A de este programa (programa-SA) son δ , y Efd y las trayectorias de v_a , v_b , v_c , i_a , i_b e i_c . Mientras que la versión B (programa-SB) proporciona δ , Efd y las trayectorias de V_d , V_q , I_d e I_q .

- Programa de Transformación (programa-IDQ):

Este programa recibe la salida del programa-SA y mediante las ecuaciones (29) a la (34) calcula valores similares a aquellos que entrega el programa-SB. El uso de los programas SA e IDQ, representa de una manera más real el proceso que llevaría desde la adquisición de datos de un generador real, hasta su preparación adecuada para ser usadas por el programa de identificación que a continuación se lo indica.

- Programa de Identificación basado en el Filtro Kalman (programa MIKC).

El algoritmo de identificación presentado en el Apéndice A, se ha incorporado a este programa cuando, las ecuaciones (3) a la (6) se usan como la ecuación (A.1) del Apéndice A y las ecuaciones (1) y (2) se emplean como la (A.2); de esta manera se identifica un grupo de parámetros desconocidos así como las condiciones iniciales de los estados, a partir de la información suministrada por el programa SA a través del programa de transformación IDQ, o directamente del programa SB.

- Identificación de las condiciones iniciales de los Estados, y de los Parámetros Transitorios y Subtransitorios.

Para algunas condiciones diferentes en los terminales del generador, las salidas del programa SB, se entregan al programa MIKC. Si los valores iniciales estimados para $\underline{x}(t_0)$ y \underline{p} son muy cercanos a los usados en el programa SB, para las condiciones iniciales de los cuatro estados y para los cuatro parámetros

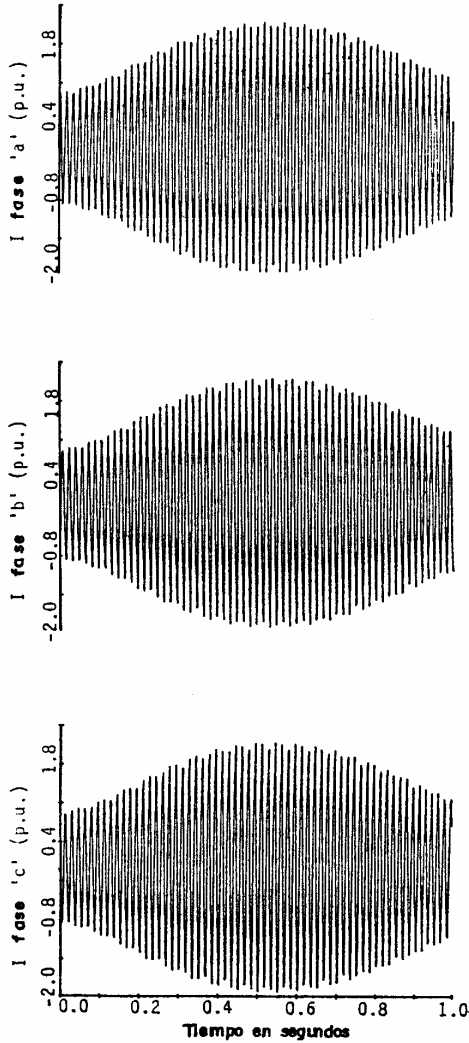


Fig. 3.- Trayectorias de la corriente en los terminales del generador en las tres fases simuladas por el programa SA.

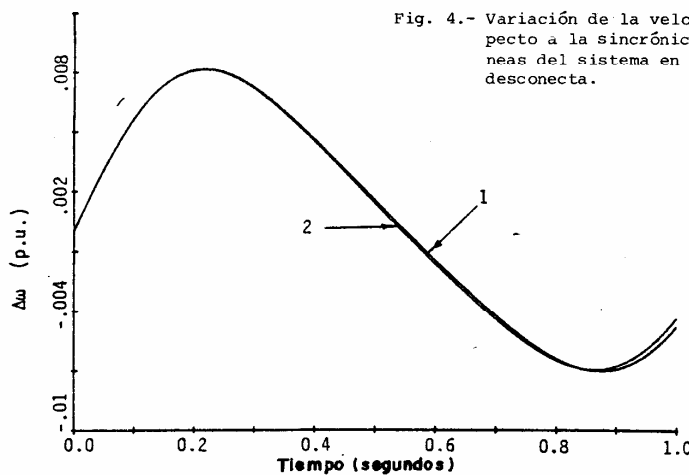


Fig. 4.- Variación de la velocidad rotórica con respecto a la síncrona cuando una de las líneas del sistema en estudio (Figura 1) se desconecta.

CASO DE ESTUDIO No.	VER NOTA 1			VER NOTA 2		VER NOTA 3	PARAMETROS				No. DE ITERACIONES
	P p.u.	P _f	V _t p.u.	T sec.	Δt ms	[P] ¹	P ₁ = x _d ^u INICIAL (ε _{p1} %)	IDENTIFICADO (ε _{p1} %)	P ₂ = x _q ^u INICIAL (ε _{p2} %)	IDENTIFICADO (ε _{p2} %)	
1	0.8	0.8	1	1	2	[P] ²	0.2313 (25%)	0.1897 (2.51%)	0.1388 (-25%)	0.1749 (-5.48%)	19
2	0.8	0.8	1	0.5	2	[P] ²	0.2313 (25%)	0.1878 (1.15%)	0.1388 (-25%)	0.1807 (-1.12%)	19
3	0.8	0.8	1	0.5	2	[P] ³	0.2313 (25%)	0.1869 (1.01%)	0.1388 (-25%)	0.1838 (-0.67%)	15
4	0.8	0.8	1	0.5	1	[P] ³	0.2130 (25%)	0.1867 (0.92%)	0.1388 (-25%)	0.1839 (-0.57%)	12
5	0.8	0.8	1	0.5	1	[P] ¹	0.2590 (40%)	0.1866 (0.87%)	0.1110 (-40%)	0.1838 (-0.64%)	11
6	0.75	0.95	1	0.5	2	[P] ³	0.2313 (25%)	0.1870 (1.1%)	0.1388 (-25%)	0.1832 (-1.00%)	14
7	0.4	0.8	1	0.5	2	[P] ³	0.2313 (25%)	0.1887 (2.02%)	0.1388 (-25%)	0.1869 (1.04%)	19

Tabla II.- Algunos casos de estudios implementados para ilustrar la capacidad del algoritmo de identificación basado en el Filtro Kalman, en la determinación de reactividades subtransitorias.

con ruido a las trayectorias de salida del programa SA y luego ingresados al programa IDQ, de transformación a componentes d-q.

Cuando los parámetros p3 a p13 se hacen ligeramente diferentes a los utilizados en el programa SA, las trayectorias "ruidosas" de Id, Iq, Vd y Vq que se obtienen del programa IDQ son usadas por el programa MIKC 2 para determinar p1 y p2. La figura 6 muestra un resultado típico de esos estudios que se referirán como Caso de Estudio # 8.

En este caso, el programa SA que tiene como condiciones iniciales de operación P = 0.8 p.u., P_f = 0.8⁻¹ y V_t = 1.0 pu, da los valores de las variables que se requieren con intervalos de 1 ms. para un período de 0.5 segundos. Estas variables se mezclan con una función de ruido de la siguiente forma:

$$\text{Valor de } z \text{ con ruido} = \left[1 + 0.03 \frac{R_n}{6} + 0.01 e^{-2t} + 0.01 \sin(120\pi t + \pi/6) \right] z \quad (35)$$

Donde:

Z es el valor instantáneo de corriente o voltaje.

R_n es un número generado en forma aleatoria para cada tiempo t = t₀ + jΔt, limitado entre -6 y 6, con una media de cero y una desviación estándar de uno.

t es el tiempo en segundos.

Las componentes d-q de éstas corrientes y voltajes calculadas por el programa IDQ y perturbadas con ruido, se alimentan al programa MIKC 2, para identificar p1 y p2; cuando los parámetros p3 a p13, han sido fijados en valores ligeramente diferentes de los utilizados en el programa SA, que simula al generador síncrono, éstos valores son:

$$\begin{aligned} p_3 &= 1/T_{d0}^u = 0.08884 \quad (\epsilon_{p3}=2\%), \quad p_4 = 1/T_{q0}^u = 0.034692 \\ (\epsilon_{p4}=-2\%), \quad p_5 &= x_d' = 0.2499 \quad (\epsilon_{p5}=2\%), \quad p_6 = x_q' = 0.3724 \\ (\epsilon_{p6}=-2\%), \quad p_7 &= 1/T_{d0}' = 0.4428 \times 10^{-3} \quad (\epsilon_{p7}=-1.5\%), \\ p_8 &= 1/T_{q0}' = 0.4229 \times 10^{-2} \quad (\epsilon_{p8}=1.5\%), \quad p_9 = A = 7.2329 \\ (\epsilon_{p9}=2\%), \quad p_{10} &= B = 0.8487 \quad (\epsilon_{p10}=2\%), \quad p_{11} = x_d = \\ &1.6660 \quad (\epsilon_{p11}=-2\%), \quad p_{12} = x_q = 1.6728 \quad (\epsilon_{p12}=2\%), \\ p_{13} &= x_t = 0.153 \quad (\epsilon_{p13}=2\%). \end{aligned}$$

Para este estudio las matrices [P], [V], [W] son las mismas utilizadas en el Caso de Estudio # 5 de la Tabla II. Iniciando con p1 = 0.259 (ε_{p1} = 40%) y p2 = 0.111 (ε_{p2} = 40%) como los valores asumidos, el programa MIKC 2 converge a p1 = 0.188 (ε_{p1} = 1.45%) y p2 = 0.198 (ε_{p2} = 7.02%). Los números en paréntesis indican el porcentaje de error relativo a tales valores con respecto a los de la Tabla I. La cercanía de la curva "1" y la "4" de la Figura 6 indica que el algoritmo exitosamente identifica x^u_d y x^u_q aún en la presencia de trayectorias de entrada "ruidosas" y con imprecisión en el resto de parámetros.

- Identificación de todos los parámetros Subtransitorios.

Habiéndose demostrado que el algoritmo es capaz de identificar p1 y p2, el objetivo es ahora evaluarlo

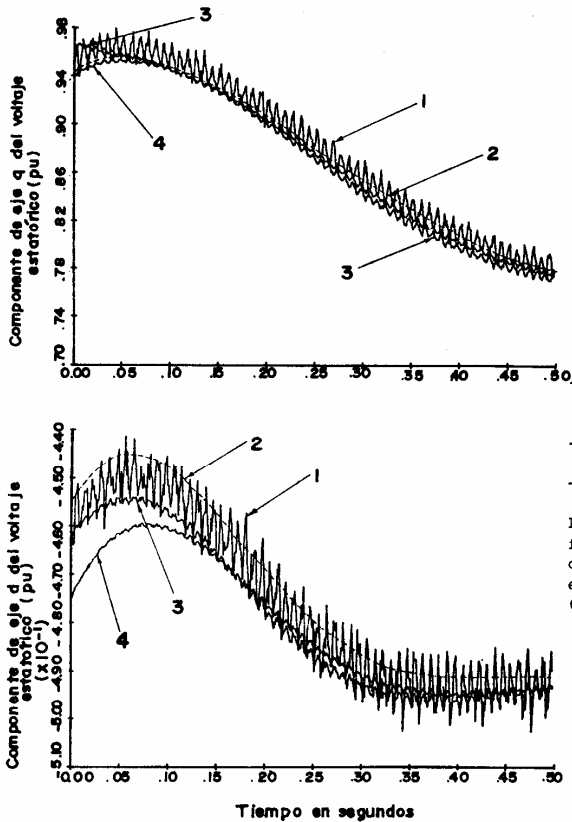


Fig. 6.- Componentes de voltaje estático en los ejes d y q, para el Caso de Estudio # 8.

Las curvas marcadas con "1" son las trayectorias de salida del programa IDQ, cuando la salida del programa SA se ha mezclado con ruido y luego se ha alimentado a éste. Las curvas señaladas con "2" son las que se obtienen en ausencia de ruido. Las señaladas con un "3" son las obtenidas de resolver las ecuaciones (1) a la (6) cuando:

- Trayectorias con ruido de Id e Iq se calculan mediante el programa IDQ y se usan como las variables de entrada o de control.
- p3 a p13 se dan un tanto desviadas como se indicó anteriormente.
- p1 = 0.259 y p2 = 0.111.

Las curvas indicadas por un "4" se obtienen de igual forma que las señaladas por "3" excepto que éstas se obtienen a partir de los valores identificados por el algoritmo para p1 y p2, siendo éstos 0.188 y -0.198, respectivamente.

para la identificación de cuatro parámetros subtransitorios como son: x''_d , x''_q , T''_{do} y T''_{qo} . Con este propósito, las trayectorias exactas del programa SB se alimentan al programa de identificación MIKC 2. Usando diferentes conjuntos de valores para [P], [W] [V] y p1 a p4, se evalúa el alcance del algoritmo de identificación. La Tabla III resume algunos resultados típicos obtenidos en este análisis.

Para todos los casos de estudio que se indican, las condiciones iniciales de operación simuladas por el programa SB han sido cuando P = 0.8 p.u., fp = 0.8 (-) Vt = 1.0 p.u. con un intervalo de tiempo de 2 ms., durante un período de 1 segundo. A partir de esta información el algoritmo identifica los valores indicados en las columnas p1 a p4. Adicionalmente la Tabla III muestra la matriz estimada [P] en cada caso de estudio. En todos los casos se tienen las siguientes condiciones comunes:

- [V] y [W] son las mismas usadas en los casos de estudio 1 al 8.
- Los valores usados para los parámetros que se suponen conocidos han sido los mismos de la Tabla I.
- Los valores asumidos para aquellos parámetros desconocidos son:

$$p_1 = x''_d = 0.222 (\epsilon_{p_1}=20\%), \quad p_2 = x''_q = 0.1573$$

$$(\epsilon_{p_2}=-15\%), \quad p_3 = 1/T''_{do} = 0.09582 (\epsilon_{p_3}=10\%),$$

$$p_4 = 1/T''_{qo} = 0.0283 (\epsilon_{p_4}=-20\%).$$

De los resultados presentados en la Tabla III, se puede ver fácilmente que los valores identificados de los parámetros dependen sustancialmente del valor inicialmente estimado para la matriz [P]. Por ejemplo, para el valor estimado en el caso # 9, el error en los parámetros identificados es en general grande, siendo el mayor en el caso de $p_4 = 1/T''_{qo}$ con un error de -19.86%. Por el contrario, cambiando el valor estimado como por ejemplo el usado en el caso # 13, los errores se reducen en todos los parámetros identificados, siendo el mayor error en este caso de 5.72%. Se llega a la conclusión de las pruebas realizadas que el algoritmo es capaz de identificar un grupo de parámetros adecuadamente, como en el caso # 13, sin embargo, es necesario una buena "adivinanza" de [P], la cual implica un gran trabajo de búsqueda con un enorme tiempo involucrado.

No obstante a la dificultad observada, se evalúa más allá al algoritmo. Con el propósito de analizar su comportamiento ante circunstancias más reales se consideran trayectorias mezcladas con ruido y se desvían los valores de los parámetros p5 a p13, como se realiza en el caso # 8. Para esta evaluación, las trayectorias de salida del programa SA se mezclan con diversos niveles de ruido, repitiéndose para varias condiciones iniciales de operación, siendo éstas alimentadas al programa de transformación IDQ; para cada caso de estudio se toman las salidas de este último para utilizarlos en el programa de identificación MIKC 2. Un caso típico dentro de esta serie de pruebas, al cual se lo designa como caso de estudio-

CASO DE ESTUD. No.	[P]	PARAMETROS IDENTIFICADOS POR EL PROGRAMA MIKCP 2				No. DE ITERACIONES
		P1 ($\epsilon_{p1}\%$)	P2 ($\epsilon_{p2}\%$)	P3 ($\epsilon_{p3}\%$)	P4 ($\epsilon_{p4}\%$)	
9	$\begin{bmatrix} 10^{-3} & & & \\ & 10^{-3} & & \\ & & 10^{-3} & \\ & & & 0 \\ & & & & 0.0037 \\ & & & & & 0.0073 \\ & & & & & & 0.0002 \\ & & & & & & & 0.0007 \end{bmatrix}$	0.2085 (12.72%)	0.1911 (3.29%)	0.0951 (9.26%)	0.02835 (-19.86%)	19
10	$\begin{bmatrix} 10^{-4} & & & \\ & 10^{-4} & & \\ & & 10^{-4} & \\ & & & 0.21 \\ & & & & 0.16 \\ & & & & & 5.30 \\ & & & & & & 1.05 \end{bmatrix}$	0.1844 (-0.31%)	0.18518 (0.10%)	0.09834 (13.01%)	0.03393 (-4.08%)	4
11	$\begin{bmatrix} 10^{-4} & & & \\ & 10^{-4} & & \\ & & 10^{-4} & \\ & & & 0.21 \cdot 10^{-4} \\ & & & & 0.18 \cdot 10^{-4} \\ & & & & & 1.10 \\ & & & & & & 1.05 \end{bmatrix}$	0.2217 (19.83%)	0.1573 (-4.86%)	0.0868 (-2.26%)	0.03542 (0.13%)	19
12	$\begin{bmatrix} 10^{-4} & & & \\ & 10^{-4} & & \\ & & 10^{-4} & \\ & & & 0.21 \\ & & & & 0.16 \\ & & & & & 1.30 \\ & & & & & & 1.05 \end{bmatrix}$	0.1829 (-1.15%)	0.1873 (1.26%)	0.0979 (12.54%)	0.03359 (5.03%)	8
13	$\begin{bmatrix} 10^{-3} & & & \\ & 10^{-3} & & \\ & & 10^{-3} & \\ & & & 0.021 \\ & & & & 0.016 \\ & & & & & 1.10 \\ & & & & & & 1.05 \end{bmatrix}$	0.1876 (1.39%)	0.1769 (-4.36%)	0.0920 (5.72%)	0.03524 (-0.37%)	19

Tabla III.- Una evaluación del algoritmo de identificación basado en el Filtro Kalman en la determinación de los cuatro parámetros subtransitorios.

14, se presenta a continuación con el fin de dejar entrever los resultados obtenidos.

El caso # 14 se lo evalúa cuando las salidas de programa SA se obtienen para las condiciones iniciales antes de abrirse una línea, $P = 0.8$ p.u., $f_p = 0.8$ (-) $V_t = 1.0$ p.u.; y luego se mezclan con la función de ruido expresado como ecuación (35), para que posteriormente mediante el programa IDQ, se encuentren las trayectorias de las corrientes y voltajes estáticas en los ejes d y q. Las curvas señaladas con un "1", en la Figura 7, son los componentes en los ejes d-q del voltaje estático obtenidos como se ha explicado para este caso; mientras que los señalados por un "2" son las mismas curvas exentas de ruido. Las trayectorias "ruidosas" de salida del programa IDQ, se ingresan al programa MIK 2 para identificar los cuatro parámetros subtransitorios. En esta identificación los parámetros transitorios y de estado estable, p_5 a p_{13} , se han desviado ligeramente de los valores de la Tabla I; éstos valores son los mismos usados en el caso # 8 indicado en la sección anterior. En lo referente a las matrices [W] y [V], éstas son las mismas que en todos los casos anteriores.

Los valores iniciales asumidos para los parámetros subtransitorios a ser identificados son:

$$p_1 = x_d^u = 0.259 \quad (\epsilon_{p1}=40\%), \quad p_2 = x_q^u = 0.111$$

$$(\epsilon_{p2}=-40\%), \quad p_3 = 1/T_{do}^u = 0.1218 \quad (\epsilon_{p3}=40\%),$$

$$p_4 = 1/T_{qo}^u = 0.0212 \quad (\epsilon_{p4}=-40\%).$$

En tanto que la matriz [P] ha sido fijada inicialmente como:

$$[P] = \begin{bmatrix} 10^{-3} & & & & & \\ & 10^{-3} & & & & \\ & & 10^{-3} & & & \\ & & & 10^{-3} & & \\ & & & & 0.041 & \\ & & & & & 0.041 \\ & & & & & & 0.041 \\ & & & & & & & 0.041 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Con esta información, el programa MIK 2 luego de 19 iteraciones llegó a determinar los siguientes valores:

$$p_1 = x_d^u = 0.1384 \quad (\epsilon_{p1}=25.22\%), \quad p_2 = x_q^u = 0.1347$$

$$(\epsilon_{p2}=27.18\%), \quad p_3 = 1/T_{do}^u = 0.12297 \quad (\epsilon_{p3}=41.32\%),$$

$$p_4 = 1/T_{qo}^u = 0.03478 \quad (\epsilon_{p4}=1.65\%).$$

Los valores identificados son básicamente erráticos con respecto a los dados en la Tabla I y usados en el programa SA, que simula a un generador real. Sin embargo, partiendo de errores en general grandes para los valores iniciales, éstos han sido parcialmente reducidos. Pero si se observan las curvas "4" y "5", con respecto a la curva "2" se ve las limitaciones del algoritmo y su poca efectividad en la determinación de un grupo de parámetros, que reproduzcan exitosamente las trayectorias de salida de la máquina.

Las curvas indicadas por un "3" son la solución de las ecuaciones (1) a la (6) cuando:

- Trayectorias mezcladas con ruido de I_d e I_q son calculadas por el programa IDQ y se utilizan como las variables de entrada.
- p_5 a p_{13} son los valores ligeramente desviados que se indican en el caso # 8.
- p_1 a p_4 son los valores iniciales asumidos.

Las curvas señaladas por un "4" se obtienen de igual forma pero cuando se usan los valores identificados para p_1 a p_4 . Puede verse en la Figura 7 que al utilizar los valores identificados de p_1 a p_4 en el modelo matemático adoptado para el generador, se mejora la respuesta del modelo en cuanto a V_d ; la curva "4" se aproxima más a la real "2", mejorando ésta a partir de la "3"; sin embargo no llega a reproducir la curva "1" y peor la "2", que sería lo deseado.

La curva "5" se obtiene cuando la matriz [P] asumida para iniciar el proceso se toma como:

$$[P] = \begin{bmatrix} 10^{-4} & & & & & \\ & 10^{-4} & & & & \\ & & 10^{-4} & & & \\ & & & 10^{-4} & & \\ & & & & 0.41 & \\ & & & & & 0.41 \\ & & & & & & 0.41 \\ & & & & & & & 0.41 \end{bmatrix} \quad (37)$$

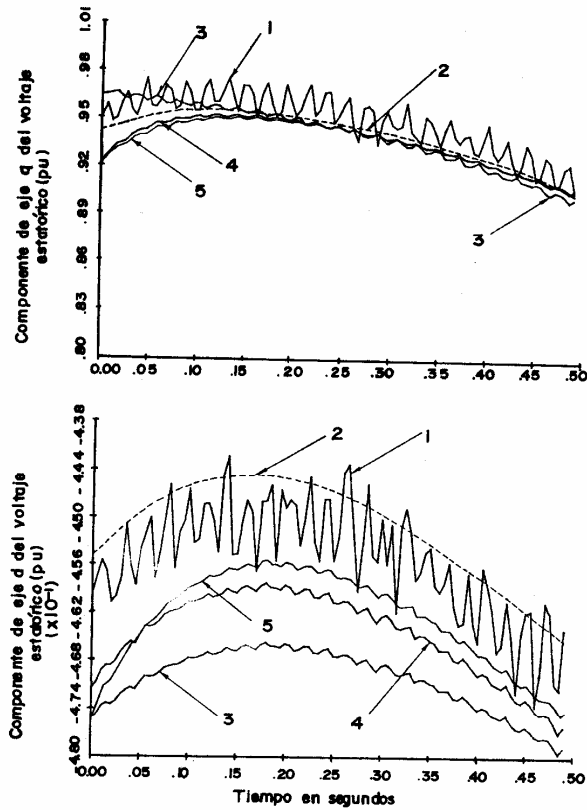


Fig. 7.- Trayectorias de V_d y V_q obtenidas en el caso de estudio # 14.

Y, se obtuvieron los siguientes valores como resultado del proceso de identificación:

$$p_1 = x_d'' = 0.1366 \quad (\epsilon_{p_1} = 26.15\%), \quad p_2 = x_q'' = 0.10503$$

$$(\epsilon_{p_2} = 43.23\%), \quad p_3 = 1/T_{d0}'' = 0.1019 \quad (\epsilon_{p_3} = 17.08\%),$$

$$p_4 = 1/T_{q0}'' = 0.04757 \quad (\epsilon_{p_4} = 34.48\%).$$

Estos parámetros se usaron en el modelo matemático para obtener la respuesta indicada como curva "5". Esta nueva curva se encuentra más cerca a las curvas o trayectorias deseadas entre las que se obtienen para diferentes estimaciones de $[P]$. De todas formas los valores identificados tienen errores mayores que los obtenidos al usar la matriz $[P]$ de la ecuación (36).

Por la determinación de todos los cuatro parámetros subtransitorios del caso de estudio # 14, el cual a producido resultados típicos de entre muchos casos similares estudiados, sugiere que el algoritmo -- prácticamente es inútil si existen niveles elevados de ruido y perturbaciones en las mediciones de las trayectorias requeridas.

Estudios adicionales para evaluar al algoritmo en la identificación de x_d'' y x_q'' además de los parámetros subtransitorios, han llevado a la demostración de que conseguir una matriz estimada de $[P]$ que sea adecuada, es un trabajo casi imposible.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación y en resumen presentados en este trabajo, han sido exitosos para la identificación de x_d'' y x_q'' , lo cual ratifica el trabajo de M. Namba y otros, referencia 1. Sin embargo cuando el algoritmo es usado en la identificación de cuatro parámetros subtransitorios, el trabajo de encontrar un grupo adecuado de valores estimados para las matrices de covarianza $[P]$, $[V]$ y $[W]$ llega a ser muy laboriosa. A diferencia de las conclusiones obtenidas para un modelo simplificado de una máquina síncrona, referencia 1, éste algoritmo es totalmente incapaz de identificar un adecuado conjunto de valores para las condiciones iniciales de los estados, parámetros transitorios y subtransitorios cuando se utiliza un modelo matemático más razonable. Otra deficiencia de éste algoritmo, al ser comparado con el que se presenta en otro trabajo, referencia 6, es su excesivo tiempo de computación. En razón de las conclusiones que se obtienen en el trabajo, referencia 6, y la bondad que ese otro método presenta, el algoritmo de identificación basado en el Filtro Kalman, que ha sido evaluado en este trabajo, no se lo recomienda para identificar más de dos parámetros de una máquina síncrona, cuando el modelo matemático usado es tan detallado como el considerado en este trabajo.

APENDICE A

Asumir que las siguientes ecuaciones representan matemáticamente a un sistema físico.

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}, t) + \underline{w}(t) \quad (A.1)$$

$$\underline{y} = \underline{h}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}, t) + \underline{v}(t) \quad (A.2)$$

Donde:

- \underline{x} es un vector de estado, de dimensión $N \times 1$.
- \underline{f} es un vector de funciones conocidas, de dimensión $N \times 1$.
- \underline{u} es un vector de entrada.
- \underline{p} es un vector de parámetros desconocidos invariantes en el tiempo, de dimensión $M \times 1$.
- t es la variable independiente, tiempo.
- \underline{y} es un vector de variables de salida, de dimensión $L \times 1$.
- \underline{h} es un vector de funciones conocidas, de dimensión $L \times 1$.
- $\underline{w}(t)$ y $\underline{v}(t)$ son vectores de ruido aleatorio inherente a todo proceso, el uno correspondiente al sistema y el otro a la observación, cuyas dimensiones son $N \times 1$ y $L \times 1$ respectivamente.

Suponer que se dispone de un conjunto de trayectorias correspondiente a \underline{u} y a \underline{y} , durante un comportamiento transitorio del sistema físico, con intervalos de t empezando en t_0 y terminando en t_f ; para efectuar una estimación de \underline{p} y $\underline{x}(t_0)$ que se desconocen, deben seguirse los siguientes pasos.

Paso 1.- Hacer $s = 0$ y dar un valor inicial estimado para $\underline{x}^s(t_0)$ y \underline{p}^s

Paso 2.- Usar \underline{u} dado, $\underline{x}^s(t_0)$ y \underline{p}^s para integrar numéricamente la ecuación A.3 desde t_0 hasta t_f con intervalos Δt .

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}, t) \quad (A.3)$$

Paso 3.- Hacer una estimación para $[P(0)]$, la matriz covarianza de error de $\underline{z}^s(t_0) = \begin{bmatrix} \underline{x}^s(t_0) \\ \underline{p}^s \end{bmatrix}$

Donde: $\underline{z}^s(t_0)$ es el vector aumentado de los valores iniciales estimados para $\underline{x}^s(t_0)$ y \underline{p}^s

Paso 4.- Usar $\underline{x}_n(k)$, el resultado de la integración del Paso 2 cuando $t = t_0 + k \Delta t$, y los valores usados en el Paso 3, para calcular $\underline{y}_n(k)$ para todo k que pertenezca al período de t_0 a t_f a partir de la ecuación:

$$\underline{y} = \underline{h}(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}, t) \quad (A.4)$$

Paso 5.- Hacer $k = 0$ y $\sigma_{z_p}^s(0) = \begin{bmatrix} \sigma_{x^s}^s(t_0) \\ \sigma_{p^s}^s \end{bmatrix} = \underline{0}$

Paso 6.- Usar \underline{u} , \underline{p}^s y $\underline{x}_n(k)$ para calcular:

$$H(k) = [H_x(k) \quad H_p(k)] \quad (A.5)$$

Donde:

$$H_x(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_i}{\partial x_j} \end{bmatrix} \quad (A.6)$$

$$H_p(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_i}{\partial p_x} \end{bmatrix} \quad (A.7)$$

Paso 7.- Hacer una estimación para la matriz de covarianza del ruido ligado a la observación $[V(k)]$, y calcular la matriz de ganancia de Kalman:

$$K(k) = P(k) H^t(k) [H(k) P(k) H^t(k) + V(k)]^{-1} \quad (A.8)$$

Paso 8.- Encontrar $\delta \underline{y}(k)$ restando $\underline{y}_n(k)$ del correspondiente vector medido y calcular:

$$\delta z_b(k) = \delta z_p(k) + K(k) [\delta y(k) - H(k) \delta z_p(k)] \quad (A.9)$$

Paso 9.- Incrementar $k = k+1$. Si $k > (t_f - t_0) / \Delta t$, ir al paso 14; de lo contrario continúa.

Paso 10.- Calcular la matriz covarianza de error de $\delta z_b(k-1)$.

$$G(k-1) = P(k-1) - K(k-1) H(k-1) P(k-1) \quad (A.10)$$

Paso 11.- Usar \underline{u} , $\underline{x}_n(k-1)$ y \underline{p}^s para calcular:

$$A(k-1) = \begin{bmatrix} A_x(k-1) & A_p(k-1) \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (A.11)$$

Donde:

$$A_x(k-1) = e^{[F_x(k-1)] \Delta t} \quad (A.12)$$

$$A_p(k-1) = F_x(k-1)^{-1} [A_x(k-1) - I] F_p(k-1) \quad (A.13)$$

$$F_x(k-1) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \end{bmatrix} \quad \text{para } t = t_0 + (k-1) \Delta t. \quad (A.14)$$

$$F_p(k-1) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial p_k} \end{bmatrix} \quad \text{para } t = t_0 + (k-1) \Delta t. \quad (A.15)$$

Paso 12.- Calcular la primera estimación de $\delta \underline{z}$ para: $t = t_0 + k \Delta t$ y su correspondiente matriz de covarianza:

$$\delta z_p(k) = A(k-1) \delta z_b(k-1) \quad (A.16)$$

$$P(k) = A(k-1) G(k-1) A^t(k-1) + W(k-1) \quad (A.17)$$

Donde W es la matriz de covarianza del ruido vinculado al proceso, para el vector aumentado $\delta \underline{z}$ que debe ser suministrado por el usuario del programa.

Paso 13.- Ir al paso 6.

$$\begin{aligned} \text{Paso 14.- Hacer } \begin{bmatrix} \underline{x}^{s \text{ end}} \\ \underline{p}^s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \underline{x}_n(k) \\ \underline{p}^{s-1} \end{bmatrix} - \delta z_b(k) \\ &= \begin{bmatrix} \underline{x}_n(k) \\ \underline{p}^{s-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{x}_b(k) \\ \underline{p}(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (A.18)$$

Paso 15.- Usar \underline{u} , $\underline{x}^{s \text{ end}}$ y \underline{p}^s para integrar numéricamente la ecuación (A.3) desde t_f a t_0 con un intervalo de tiempo de $-\Delta t$. Esto da un nuevo grupo de valores de $\underline{x}_n(k)$ para todo k incluyendo $\underline{x}_n^{s+1}(t_0)$.

Paso 16.- Si $\underline{x}_n^{s+1}(t_0) - \underline{x}^s(t_0)$ y $\delta \underline{p}(k)$ son despreciables, $\underline{x}_n^{s+1}(t_0)$ y \underline{p}^s se toman como los vectores identificados de las condiciones iniciales de los estados y de los parámetros desconocidos, por lo que el proceso iterativo se para. De lo contrario, hacer $s = s+1$ e ir al paso 3.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al Dr. Nasses Jaleeli, profesor de Ohio University, mi guía y asesor en ésta investigación.

Al CIELA, a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. y a la Universidad de Cuenca por su apoyo brindado para la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS

- Ref. 1.- Namba, M., et al., "Identification of Parameters for Power System Stability Analysis Using Kalman Filter", IEEE Trans. on PAS, July 1981, pp. 3304-3311.
- Ref. 2.- Borrero, Antonio, "Assessing Kalman Filter in the Identification of Synchronous Machine Stability Parameters", MSEE Thesis, Ohio University, Athens, Ohio, USA, March 1984.
- Ref. 3.- Jaleeli, Nasser, "Assessing Quasilinearization and Kalman Filtering in the Determination of Stability Study Constants for Utilities Operating Generators", EPRI -- RP1999-5 Final Report, January 1984.
- Ref. 4.- de Mello, F.P., and Hannett, L.H., "Validation of Synchronous Machine Models and Derivation of Model Parameters from Tests", IEEE Trans. on PAS, Feb. 1981, pp. 662-672
- Ref. 5.- Jaleeli, N., "Discussion of Determination of Synchronous Machine Electrical Characteristics by Test", IEEE Trans. on PAS, Dec. 1983, pp.3814-3815.
- Ref. 6.- Borrero, A., "Identificación de Parámetros de un Generador Síncrono mediante un Algoritmo basado en Cuasilinealización y Mínimos Cuadrados", presentado para ser publicado en la VI JIEE, Mayo de 1985.
- Ref. 7.- Anderson, P.M., and Fouad, A.A., "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, 1977.



BORRERO VEGA ANTONIO. Nació en Cuenca el 24 de Junio de 1956. Obtuvo su título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad de Cuenca, en 1981 y el de "Master of Science in Electrical Engineering" en Ohio University, Athens EE.UU., en 1984. Ha trabajado como profesor a tiempo parcial en la Universidad de Cuenca, desde 1978; actualmente desempeña la cátedra de Sistema de Potencia y Teoría Control Moderno. Estuvo vinculado con la Industria privada y desde Marzo de 1984 en la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A., realizando estudios de planificación en el área de Ingeniería y Construcciones. Es miembro del CIELA y del IEEE.