

## IDENTIFICACIÓN EN LÍNEA DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA

### RESUMEN

Se presenta el uso del algoritmo de proyección como método de identificación para obtener los parámetros de un modelo para un generador sincrónico a partir de datos de entrada – salida aplicados. Se prueba la efectividad del método aplicado mediante el uso de varias formas de onda a la entrada del sistema.

**PALABRAS CLAVES:** Identificación en línea, algoritmo de proyección, máquina síncrona

### ABSTRACT

*An on-line identification method, projection algorithm, is presented to obtain the value of the parameters for a synchronous machine model applying input- output data. The effectiveness of the proposed method is demonstrated using different types of waveforms at the input.*

**KEYWORDS:** *on-line identification, projection algorithm, synchronous machine*

## 1. INTRODUCCIÓN

Para realizar estudios de estabilidad en un sistema de potencia, es necesario contar con buenos modelos matemáticos de los diversos elementos que lo componen.

En el área del control de la excitación de la máquina síncrona, generalmente se parte de modelos matemáticos del generador linealizados en algún punto de operación. Es lo que se hace cuando se aplica control clásico.

En cambio cuando las condiciones de operación varían, el modelo encontrado por estas técnicas ya no será el adecuado y necesariamente la ley de control establecida para ciertas condiciones ya no operara satisfactoriamente. Aunque el control clásico se ha utilizado ampliamente, cuando aparecen nuevas técnicas que abarcan la identificación en línea de los parámetros de la función de transferencia, (los cuales varían de alguna manera cuando las condiciones de operación cambian) es interesante realizar implementaciones utilizando estas metodologías.

Entre los sistemas de control con los que debe contar la máquina síncrona se encuentran el regulador de velocidad y el de tensión [1]. Este último se conoce como regulador automático de tensión (AVR, por sus siglas en ingles). Este regulador generalmente se implementa como un controlador clásico del tipo PI o PID.

En el programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica, ya se han realizado algunos desarrollos de controladores clásicos [2,3], además de otro utilizando lógica difusa [4]. Siguiendo la tendencia de la utilización de nuevas técnicas, se implementó el AVR como un controlador adaptivo que consta de un identificador en línea, el cual continuamente determina los parámetros de la función de transferencia.

**SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO**

saperez@utp.edu.co

**ALFONSO ALZATE GOMEZ**

alalzate@utp.edu.co

Profesores

Ingeniería Eléctrica

Universidad Tecnológica de Pereira

Grupo de investigación en electrónica de potencia

Como una fase inicial en la presentación de resultados del trabajo realizado, se ha considerado exponer a través de este artículo la implementación del identificador, como parte esencial del sistema.

## 2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

La figura 1, muestra el diagrama de la configuración implementada en el laboratorio.

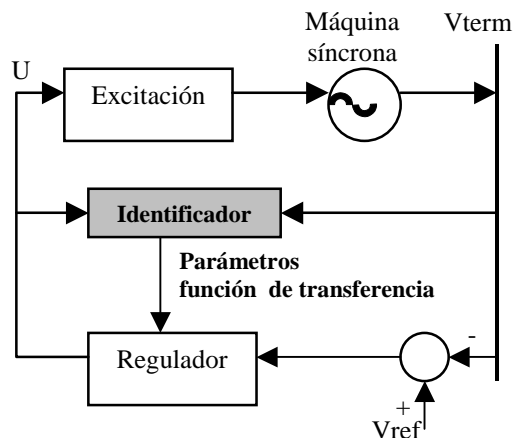


Figura 1. Configuración del sistema

El sistema total consta de un primomotor con velocidad constante el cual acciona un generador sincrónico. La alimentación del circuito de campo se realiza a través de un excitador de estado sólido. En este caso un puente rectificador semicontrolado quien realiza la variación de la corriente mediante la variación del ángulo de encendido de los tiristores ( $\alpha$ ). Así, cuando el sistema de excitación sensa un bajo voltaje terminal del generador  $V_{term}$ , se incrementa la corriente en el campo

disminuyendo el ángulo  $\alpha$ . Por otro lado si se sensa un voltaje terminal alto, la corriente del campo se decrementa aumentando el ángulo  $\alpha$ .

Los valores nominales de las máquinas utilizadas fueron:

Primomotor: Motor sincrónico, 400 VA, 208 V.

Máquina síncrona: Generador síncrono trifásico, 208 V, 400 VA.

### 3. IMPLEMENTACIÓN DEL IDENTIFICADOR

El AVR fue desarrollado utilizando un método de control adaptivo, que parte de un comportamiento ideal del sistema, definido mediante un modelo de referencia. La diferencia instantánea entre el comportamiento real del sistema y el modelo deseado se utiliza para calcular los parámetros del controlador utilizado. En este tipo de esquema es utilizada la identificación en línea de la planta.

La función esencial del identificador es la de proveerle continuamente al controlador las variables necesarias, para que este determine la señal de control que le enviara a la planta. Por tal razón es indispensable realizar una adecuada identificación del sistema en todo instante. Si se presenta una variación constante en los parámetros de la función de transferencia cuando la máquina trabaja en condiciones estables, es un indicio de que el identificador no ha sido adecuadamente programado.

#### 3.1 Identificación de la planta

La identificación puede realizarse en dos formas:

- Identificación fuera de línea (Off-line identification): Los parámetros del modelo son estimados basados en un registro de datos de entrada / salida obtenidos anteriormente.

- Identificación en línea (On-line identification): Los parámetros estimados en cada iteración son utilizados para corregir y actualizar los próximos parámetros. Este tipo de identificación requiere mayores esfuerzos computacionales.

La identificación del sistema fue implementada en línea y se representa en la figura 2.

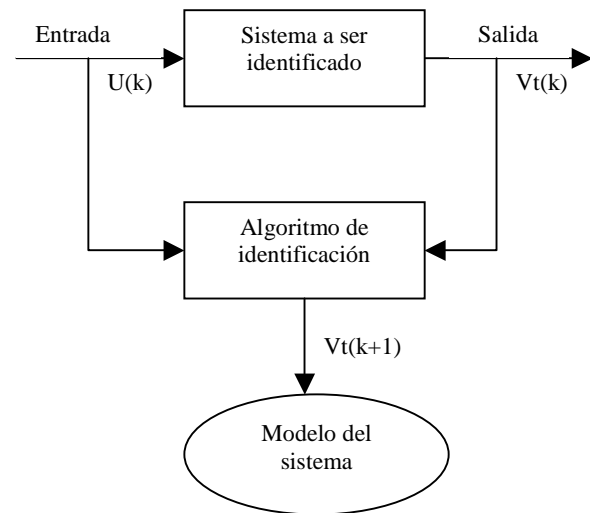


Figura 2. Esquema general del sistema de identificación

Las entradas al algoritmo de identificación son las señales de la entrada y la salida al sistema a ser identificado, medidas en instantes discretos de tiempo. Para efectos de estudios de estabilidad, se ha considerado que es suficiente considerar el modelo del sistema de orden tres [5]. Por tal razón, se utilizan como entradas los valores actuales y los dos obtenidos anteriormente, como lo muestra la ecuación de salida del identificador (1) dada por [6]:

$$\hat{y}(k+1) = f \begin{bmatrix} y(k), y(k-1), y(k-2) \\ u(k), u(k-1), u(k-2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para este caso en particular, las entradas son el voltaje en terminales  $V_t(k)$  y la señal de control  $u(k)$  proveniente del controlador. La salida estimada por el identificador es  $V_t(k+1)$ .

#### 3.1.1 Algoritmo de identificación

La estructura del modelo utilizada en este trabajo es la del error que está definido como la diferencia entre la salida del sistema y la estimada en respuesta a la misma entrada.

$$e(k) = V_t(k) - \hat{V}_t \quad (2)$$

El siguiente es un modelo que se basa en esta estructura:

Sea  $H(Z)$  la planta real que se desea identificar. En este caso se considera la planta de orden tres por lo expuesto anteriormente.

La función de transferencia de la planta en términos de  $Z$ , está dada por la relación entre la salida  $V_t(z)$  y la entrada  $U(z)$ , así:

$$G(z) = \frac{V_t(z)}{U(z)} = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0} \quad (3)$$

donde  $b_2, b_1, b_0, a_2, a_1$  y  $a_0$  son los parámetros que se desean obtener.

En forma general, para un sistema lineal invariante en el tiempo la relación entre la entrada y la salida esta dada por una ecuación lineal de diferencia.

Utilizando el modelo DARMA (Deterministic Auto Regressive Moving Average) se puede escribir una ecuación de diferencia en términos de entradas y salidas pasadas así:

$$V_t(k) = b_2 u(k-1) + b_1 u(k-2) + b_0 u(k-3) - a_2 V_t(k-1) - a_1 V_t(k-2) - a_0 V_t(k-3) \quad (4)$$

Se define:

$$V_t(k) = \phi(k-1)^T \theta_0, \quad (5)$$

donde

$$\phi(k-1)^T = [u(k-1) \quad u(k-2) \quad u(k-3) \quad V_t(k-1) \quad V_t(k-2) \quad V_t(k-3)] \quad (6)$$

es el vector que contiene las muestras de las señales de entrada/salida, y

$$\theta_0^T = [b_2 \quad b_1 \quad b_0 \quad -a_2 \quad -a_1 \quad -a_0] \quad (7)$$

es el vector que contiene los parámetros de la función de transferencia.

Sea  $\hat{\theta}(k-1)$  los parámetros estimados de la planta, luego

la salida estimada  $\hat{V}_t(k)$  está dada por:

$$\hat{V}_t(k) = \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1) \quad (8)$$

Por tanto el error, se define como:

$$e(k) = V_t(k) - \hat{V}_t(k); \quad (9)$$

y reemplazando (8) en (9) se tiene:

$$e(k) = V_t(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1) \quad (10)$$

### 3.1.2 Método de proyección [7]

El algoritmo viene dado por:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\phi(k-1)}{\phi(k-1)^T \phi(k-1)} [y(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)] \quad (11)$$

donde  $\hat{\theta}(0)$  es la estimación inicial que se supone conocida.

El problema de un denominador igual a cero en (11) puede ser solucionado adicionándole una pequeña cantidad constante, lo que genera la siguiente expresión:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{a\phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} [y(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)] \quad (12)$$

donde  $0 < a < 2$  y  $c > 0$ .

### 3.2 Implementación del algoritmo

Inicialmente se procede a obtener las señales de tensión de entrada y salida de la planta. El tiempo de muestreo utilizado fue de 40ms.

El voltaje terminal del generador debe ser acondicionado en el rango de entrada de los canales análogos de la tarjeta de adquisición de datos PCI6024E de National Instruments, en este caso  $\pm 10V$ . Para tal fin se utilizo el transductor CCT08 de Omega, con rango de entrada 0 a 650Vac, el cual entrega una señal de 0 a 10 Vdc, de acuerdo al voltaje medido entre líneas. Posteriormente se realiza el promedio de los tres medidores.

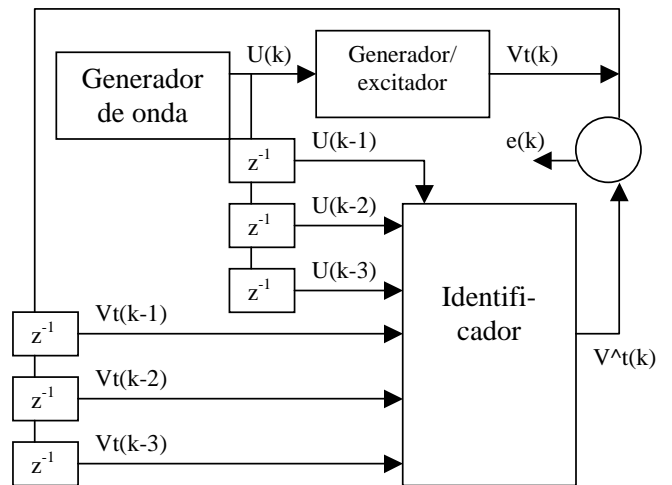


Figura 4. Esquema del identificador

La señal de entrada a la planta proviene del computador. Cuando se realice el lazo cerrado, esta señal provendrá del controlador, quien de acuerdo a la desviación de la salida de la planta con respecto a su referencia, calculara la señal de control U necesaria. En este caso el lazo esta abierto, y como entrada se utiliza una señal variable en amplitud y frecuencia generada por computador, para determinar la efectividad del identificador.

El sistema de identificación con mayor detalle se muestra en la figura 4.

La señal  $U(k)$  representa un nivel de tensión en el circuito de campo. Para el esquema implementado en el laboratorio es necesario encontrar la relación entre esta tensión y el ángulo de disparo de los tiristores, para lo cual se realizó la debida caracterización del puente.

**4. Resultados del sistema de identificación**

Para evaluar el desempeño del estimador, fueron generados varios tipos de onda, que varían en el rango de salida del generador 0 a 200 Vac. Para cada caso se presenta el vector Theta(k), el cual contiene los elementos de la función de transferencia de la siguiente manera:

$$\text{Theta}(k) = [b_2 \ b_1 \ b_0 \ -a_2 \ -a_1 \ -a_0]$$

Los parámetros ajustados para el algoritmo de proyección fueron:  $a=0.1$  y  $c=3$ .

**a. Onda cuadrada**

La figura 5, presenta los resultados del estimador para este tipo de onda. La línea punteada corresponde a la salida estimada (Yest), la línea continua a la salida medida del generador. Puede observarse que realiza una buena estimación a partir de 2 segundos.

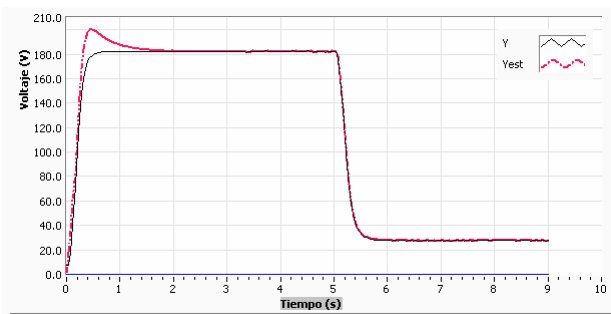


Figura 5. Respuesta del identificador ante onda cuadrada

Los parámetros determinados con esta señal fueron:

| PARÁMETROS ENCONTRADOS |      |        |       |        |         |
|------------------------|------|--------|-------|--------|---------|
| Tetha(k)               |      |        |       |        |         |
| 0.036                  | 0.12 | 0.1313 | 0.832 | 0.2017 | -0.2423 |

**b. Onda senoidal**

Para este tipo de onda, la estimación se realiza adecuadamente a partir de 1 segundo.

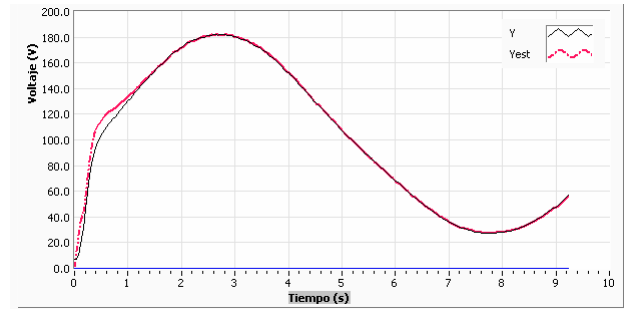


Figura 6. Respuesta del identificador ante onda senoidal

| PARÁMETROS ENCONTRADOS |        |        |        |        |         |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Tetha(k)               |        |        |        |        |         |
| 0.0238                 | 0.1093 | 0.1244 | 0.8427 | 0.2139 | -0.2286 |

**c. Onda aleatoria**

Para este caso, el estimador presenta una buena estimación a partir de un segundo y medio.

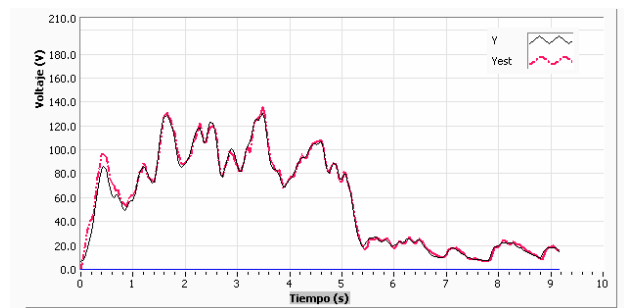


Figura 7. Respuesta del identificador ante onda aleatoria

| PARÁMETROS ENCONTRADOS |       |        |        |        |        |
|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Tetha(k)               |       |        |        |        |        |
| 0.061                  | 0.118 | 0.1005 | 0.8524 | 0.2132 | -0.234 |

Como es de esperarse los parámetros de la función de transferencia cambian de acuerdo a la variación que presenta la señal de entrada. Generalmente la tendencia de la señal de control en la implementación del AVR será la del caso a, para la cual se obtuvo una respuesta satisfactoria.

**3. CONCLUSIONES**

Se han presentado los resultados obtenidos en la implementación de un identificador para la máquina síncrona, como parte de un sistema de control adaptivo. Existen muchas otras técnicas de identificación tales como proyección ortogonal, mínimos cuadrados con sus diferentes variantes, entre otras. Para el sistema de control implementado, se considera adecuada y suficiente la identificación realizada.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

[1] de Mello, F. P., and T.F. Laskowski, "Concepts of power system dynamic stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, 1979, pp. 827-833.

[2] Grisales D, Marin W., "Regulador automático de voltaje", Tesis Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 1997.

[3] Suárez G, Vanegas H., "Parámetros del generador sincrónico y hardware para un regulador automático de voltaje", Tesis Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 1997.

[4] Hurtado L, Rozo Y., "Regulador automático de voltaje difuso", Tesis Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2000.

[5] Liu, W., G. Venayagamoorthy, D. Wunsch, "Adaptive neural network based power system stabilizer design", IEEE Trans. On EC, 2003, pp 2970 – 2975.

[6] Narendra K., K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamical systems using neural networks", IEEE trans on neural networks, vol 1, no 1, 1990, pp 4 – 27.

[7] Goodwin G., Sang K, Adaptive filtering prediction and control, Prentice – Hall, New Jersey, 1984.