

CONTROL DE FRECUENCIA Y VOLTAJE EN TIEMPO REAL DE UN GENERADOR SÍNCRONO

RESUMEN

Este artículo aborda la identificación y control de un sistema físico que consta de un generador síncrono acoplado a un primomotor de inducción, siendo éste el que impulse la máquina síncrona.

Para controlar las dos variables físicas se usa la técnica de reubicación de polos con lazos independientes, obteniéndose resultados de buena calidad.

PALABRAS CLAVES: Tiempo real, identificación adaptativa, MIMO, reubicación de polos.

ABSTRACT

This paper shows identification and control of a system formed by a synchronous generator coupled with an induction motor. Pole placement technique is used to control two independent loops, obtaining good quality results.

KEYWORDS: real time, adaptive identification, MIMO, pole placement.

DIDIER GIRALDO BUITRAGO

Ingeniero Electricista, MEE
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
dgiraldo@utp.edu.co

RICARDO ANDRÉS BOLAÑOS

Ingeniero Electricista
Profesor Catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
rbolanos@utp.edu.co

CARLOS ADRIÁN CORREA F.

Ingeniero Electricista
Profesor Catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
adrian@ohm.utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El campo de la ingeniería de control presenta gran aplicación en la industria moderna y en diferentes campos de la Ingeniería Eléctrica. Además, dependiendo del tipo de sistema se pueden tener múltiples variables a ser controladas e igualmente múltiples variables de control, ese es el caso de los sistemas multivariable o MIMO.

El caso de estudio tratado en este artículo es el de un sistema MIMO conformado por un generador síncrono acoplado con un motor de inducción que actúa como primomotor, las salidas a controlar son el nivel de tensión en terminales del generador y la velocidad en el eje (frecuencia de operación) del mismo. Las señales de entrada o de control son la corriente de campo en el rotor del generador y el voltaje aplicado a la armadura del motor de inducción conectado a su eje, respectivamente.

El sistema en su conjunto presenta una alta dificultad al momento de ser modelado matemáticamente y por ello se implementa un algoritmo de identificación adaptativa que requiere solamente de las señales de entrada y salida del sistema, la identificación devuelve los parámetros del sistema completo; adicionalmente capta las variaciones de las que puedan ser objeto los parámetros de las máquinas, hecho que ofrece robustez al esquema.

El sistema propuesto para el control representa en pequeña escala un sistema de generación de energía eléctrica. En éste último la frecuencia depende de la cantidad de caudal que choca contra los álabes de la turbina, en el esquema propuesto es el motor de inducción el que se encarga de impulsar el rotor del

generador síncrono y mantener la frecuencia en los niveles deseados.

2. IDENTIFICACIÓN ADAPTATIVA

En general, con los algoritmos de identificación se pretende minimizar una función objetivo cumpliendo con las restricciones asociadas según sea el caso de estudio como se muestra en [1,2].

Por ejemplo para el algoritmo de los mínimos cuadrados, se pretende minimizar el error cuadrático medio de estimación de la salida del sistema de control, dado por:

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

Donde:

y , salida del sistema

\hat{y} , salida estimada

θ , un vector de parámetros

ϕ , Vector de valores pasados de las entradas y salidas de la planta.

El vector de parámetros está dado por:

$$\theta(k) = \theta(k-1) +$$

$$\frac{aP(k-2)\phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T P(k-2)\phi(k-1)} [y(k) - \phi(k-1)^T \theta(k-1)] \quad (2)$$

con

$$P(k-1) = P(k-2) - \frac{P(k-2)\phi(k-1)\phi(k-1)^T \phi(k-1)P(k-2)}{c + \phi(k-1)^T P(k-2)\phi(k-1)} \quad (3)$$

P, Matriz que impide la división por cero y ayuda al ajuste del algoritmo.

Los diferentes algoritmos se obtienen así:

- Algoritmos de proyección; $a=1, c=0, P=I,$
- Algoritmos de proyección ortogonal; $a=1, c=0,$
- Algoritmos de mínimos cuadrados; $a=c=1$

Para el caso MIMO, en forma matricial, se tiene:

$$\hat{y}_i(k) = \phi_i(k-1)^T \theta_0 ; i = 1, 2, \dots m \quad (4)$$

Donde:

$$y(k) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, \quad \theta_0 = \begin{bmatrix} \theta_0^{(1)} \\ \theta_0^{(2)} \\ \vdots \\ \theta_0^{(p)} \end{bmatrix} \quad y$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi^{(1)}(k-1)^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \phi^{(2)}(k-1)^T & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \phi^{(p)}(k-1)^T \end{bmatrix}$$

3. CONTROL MULTIVARIABLE

3.1 Sistemas multivariable

Un sistema multivariable es modelado matemáticamente mediante una matriz de transferencia, que contiene a su vez funciones de transferencia.

Para una planta de 2 entradas y 2 salidas la relación existente entre ellas está dada por:

$$\begin{aligned} y_1 &= H_{11} u_1 + H_{12} u_2 \\ y_2 &= H_{21} u_1 + H_{22} u_2 \end{aligned} \quad (5)$$

El caso de estudio es un generador síncrono para el cual y_1 será la velocidad en el eje de la máquina o más específicamente su frecuencia de operación, mientras que y_2 , será la magnitud del voltaje generado en terminales de la misma. Equivalentemente, las dos entradas o señales de control, u_1 y u_2 , son el voltaje del motor de inducción

acoplado al eje del generador y la corriente de campo en el rotor del mismo respectivamente.

Para la planta a controlar se tiene una fuerte incidencia de la entrada de velocidad sobre la salida de frecuencia y de forma menos incidente sobre el voltaje generado, mientras que la corriente de campo incide fuertemente sobre el voltaje generado y de forma muy leve sobre la frecuencia de operación del sistema en su conjunto, es por ello que se considera el sistema como un sistema MIMO desacoplado [3] en el que cada entrada incide directamente sobre cada salida. La forma de medir el grado de interacción se analiza a continuación.

3.2 Control multilazo o multiloop

Los sistemas MIMO en general presentan interacción entre cada una de las salidas y sus diferentes entradas. Existen sin embargo algunos sistemas que pueden ser modelados como sistemas de lazos múltiples independientes siempre y cuando exista dependencia fuerte entre cada salida y una única entrada, similar a lo que ocurre con el caso de estudio aquí tratado. Cabe anotar que este no es el caso general de los sistemas MIMO, sin embargo, como se menciona y desarrolla en [3] existe un método para determinar el grado de interacción entre salidas y entradas que se muestra a continuación.

3.2.1 Grado de interacción

La figura 1 muestra de forma detallada cómo es el esquema de control para el caso general de interacción entre todas las salidas y todas sus entradas, en este caso de un sistema dos entradas y dos salidas.

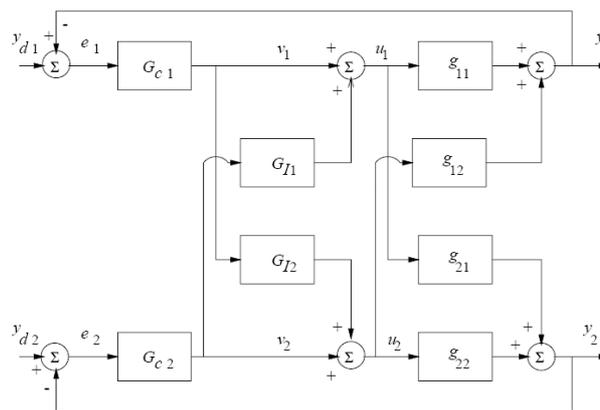


Figura 1. Esquema de Control para un Sistema MIMO de 2 Entradas y 2 Salidas

En principio si se diseñan los lazos de control de manera independiente (suponiendo los apareamientos $u_1 \rightarrow y_1, u_2 \rightarrow y_2$) se obtiene el esquema de la figura 2.

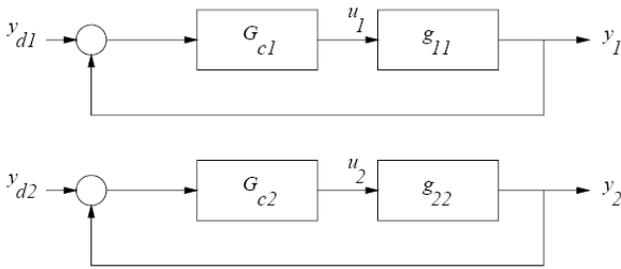


Figura 2. Diseño de Control MIMO por Lazos Independientes

Cuando el sistema multivariable presenta interacción puede no ser tan claro qué apareamiento seleccionar. Para entender este problema supóngase que se lleva a cabo el siguiente proceso:

1. Con todos los lazos de control abiertos, se realiza un cambio al escalón para la entrada uno, u_1 , después del cual se alcanza una respuesta final en y_1 denotada por Δy_{1u} y cuya magnitud está dada por la ecuación 6:

$$\Delta y_{1u} = k_{11} \quad (6)$$

2. Con sólo el lazo 2 (es decir, asociando el lazo $u_2 \rightarrow y_2$) cerrado, se realiza la misma prueba sugerida en paso anterior. El controlador G_{c2} tiene entonces la función de corregir cualquier desviación en y_2 (manipulando u_2) como resultado del cambio escalón efectuado en u_1 . Nótese claramente que u_1 tiene tanto un efecto directo como indirecto sobre y_1 (a través de la acción de control u_2).

Por lo tanto, los cambios sobre y_1 son de dos clases:

1. El efecto directo de u_1 sobre y_1 que se denota Δy_{1u} .
2. El efecto indirecto que surge cuando el controlador 2 trata de eliminar la "perturbación" u_1 afectando con esto a y_1 que se denota Δy_{1r} .

Después de que se halla alcanzado el estado estacionario del proceso la respuesta en y_1 , denotada por y_1^* , es dada por:

$$\Delta y_1^* = \Delta y_{1u} + \Delta y_{1r} \quad (7)$$

una medida adecuada del grado de interacción del proceso, suponiendo que u_1 controla a y_1 está dada por el siguiente cociente:

$$\lambda_{11} = \frac{\Delta y_{1u}}{\Delta y_1^*} \quad (8)$$

o bien,

$$\lambda_{11} = \frac{\Delta y_{1u}}{\Delta y_{1u} + \Delta y_{1r}} \quad (9)$$

Así, λ_{11} es una cantidad que proporciona una medida del grado de interacción que ocurre cuando u_1 controla a y_1 y cuando u_2 controla a y_2 .

3.2.2 Apareamiento de los lazos de control

Usando los valores del índice λ_{11} resulta más o menos claro cómo analizar el efecto de un cierto apareamiento sobre la interacción y desempeño del lazo cerrado. No obstante, es de especial interés elegir el apareamiento con mayor grado de interacción. Los casos de interés son:

Si $\lambda_{11} = 1$, ello implica que $\Delta y_{1r} = 0$ y por lo tanto la interacción en el sistema multivariable es nula. En consecuencia al seleccionar el acoplamiento $u_1 - y_1$ y $u_2 - y_2$ el sistema no presenta interacción alguna.

Si $\lambda_{11} = 0$, significa que $\Delta y_{1u} = 0$; o sea que u_1 no tiene ningún efecto sobre y_1 . Por lo tanto el lazo $u_1 - y_1$ no sirve para el propósito de controlar y_1 . Es posible que en este caso el lazo $u_1 \rightarrow y_2$ sea más apropiado ya que no existe interacción con y_1 .

Si $\lambda_{11} > 1$, Δy_{1r} tiene signo contrario del que tiene Δy_{1u} , sin embargo, es menor en su valor absoluto. Para los casos en que λ_{11} es muy grande y positiva el efecto de la interacción prácticamente cancela el efecto de u_1 sobre y_1 . Razón por la cual pueden requerirse valores grandes de la acción de control para este propósito. En general el apareamiento $u_1 \rightarrow y_1$ no será bueno.

Si $\lambda_{11} < 0$, Δy_{1r} tiene signo contrario del que presenta Δy_{1u} (además Δy_{1r} es mayor en valor absoluto a Δy_{1u}). El apareamiento $u_1 \rightarrow y_1$ no es recomendable ya que la dirección del efecto de u_1 sobre y_1 a lazo abierto es la respuesta a la correspondiente dirección con el lazo cerrado. No se recomienda usar apareamientos de este tipo.

Si $0 < \lambda_{11} < 1$, Δy_{1r} y Δy_{1u} responden en el mismo sentido. Para $\lambda_{11} > 0.5$, nótese que $\Delta y_{1u} > \Delta y_{1r}$ y el efecto directo es mayor que el efecto de interacción. Ahora bien, si $\lambda_{11} < 0.5$ entonces $\Delta y_{1r} > \Delta y_{1u}$ y la interacción domina sobre el efecto directo. Cuando $\lambda_{11} = 0.5$ entonces $\Delta y_{1r} = \Delta y_{1u}$ y ambos efectos son igualmente importantes.

3.2.3 Algunos elementos para el diseño de controladores múltiples

El procedimiento para diseñar sistemas de control de lazos múltiples involucra los siguientes pasos:

1. Selección del esquema de apareamiento.

2. Sintonización de los controladores de los lazos individuales.

En el caso en el que la interacción entre los lazos sea alta se recomienda hacer lo siguiente.

Sintonizar cada lazo de control de manera independiente manteniendo en modo manual el resto de lazos.

Poner todos los lazos a modo automático, reajustando los parámetros de los controladores hasta obtener un buen desempeño de los lazos de control.

3.3 Diseño de los lazos de control

Para la presente aplicación se hace uso de la técnica de reubicación de polos en un esquema adaptativo para controlar cada uno de los lazos. Esta técnica se desarrolla con amplitud en [5,6] y se muestra en la figura 3.

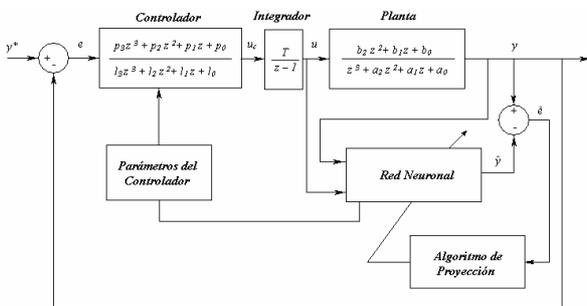


Figura 3. Sistema de Control por Reubicación de Polos

Para el caso de un sistema de tercer orden como el considerado en este trabajo los polinomios estarán dados por las ecuaciones 10 y 11.

$$\begin{aligned} Nc(z) &= p_3z^3 + p_2z^2 + p_1z + p_0 \\ Dc(z) &= l_3z^3 + l_2z^2 + l_1z + l_0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Np(z) &= b'_2z^2 + b'_1z + b'_0 \\ Dp(z) &= z^4 + a'_3z^3 + a'_2z^2 + a'_1z + a'_0 \end{aligned} \quad (11)$$

Con:

$$\begin{aligned} a'_3 &= a_2 - l_1; a'_2 = a_1 - l_1; a'_1 = a_0 - l_1; a'_0 = -a_0 \\ b'_2 &= T b_2; b'_1 = T b_1; b'_0 = T b_0 \end{aligned}$$

Siendo T el tiempo de muestreo. Los polinomios Nc y Dc corresponden al numerador y denominador para el controlador y Np y Dc corresponden al numerador y denominador para la planta, respectivamente.

De la función de transferencia en lazo cerrado y el polinomio característico deseado se obtiene el sistema matricial de la ecuación 12.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a'_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a'_2 & a'_3 & 1 & 0 & b'_2 & 0 & 0 & 0 \\ a'_1 & a'_2 & a'_3 & 1 & b'_1 & b'_2 & 0 & 0 \\ a'_0 & a'_1 & a'_2 & a'_3 & b'_0 & b'_1 & b'_2 & 0 \\ 0 & a'_0 & a'_1 & a'_2 & 0 & b'_0 & b'_1 & b'_2 \\ 0 & 0 & a'_0 & a'_1 & 0 & 0 & b'_0 & b'_1 \\ 0 & 0 & 0 & a'_0 & 0 & 0 & 0 & b'_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_3 \\ l_2 \\ l_1 \\ l_0 \\ p_3 \\ p_2 \\ p_1 \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_7 \\ d_6 \\ d_5 \\ d_4 \\ d_3 \\ d_2 \\ d_1 \\ d_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Al resolver el sistema matricial, se obtienen los coeficientes de la función de transferencia tanto del numerador como del denominador, y el sistema tendrá el comportamiento del sistema que responde al polinomio característico deseado, dado por los coeficientes d_i . Con los valores encontrados, la señal de control se puede expresar así:

$$u_c(k) = -l_2 u_c(k-1) - l_1 u_c(k-2) - l_0 u_c(k-3) + p_3 e(k) + p_2 e(k-1) + p_1 e(k-2) + p_0 e(k-3)$$

En el esquema de control considerado en este artículo se recurre al esquema básico de la figura 2, con el esquema general para cada uno de los lazos mostrados en la figura 3 del control por reubicación de polos adaptativo.

4. APLICACIÓN

4.1. Modelos de referencia sistema físico a controlar

En la figura 4 se presenta el diagrama esquemático del sistema de control implementado. Nótese que es el computador digital por medio del lenguaje de programación C++ Builder el encargado de la identificación y control de los dos lazos del sistema físico.

A continuación se presentan los modelos de referencia e inicialización de parámetros para cada lazo en el dominio de Z.

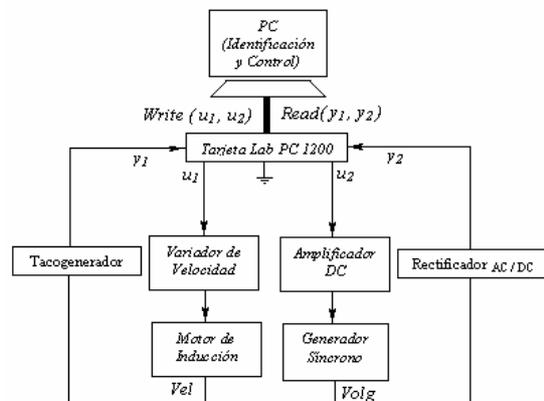


Figura 4. Diagrama Esquemático del Sistema de Control Implementado

4.1.1 Lazo de Velocidad:

Tiempo de muestreo: $T = 66 \text{ ms}$

Modelo de Referencia:

$$P(z) = z^7 - 0.2z^6 - 0.3z^5 + 0.15z^4 - 0.05z^3$$

Parámetros iniciales:

$$a_2 = -0.2362, a_1 = 0.054, a_0 = -0.0033$$

$$b_2 = 0.9197, b_1 = 1.2858, b_0 = 0.5494$$

4.1.2 Lazo de Voltaje Generado:

Tiempo de muestreo: $T = 182 \text{ ms}$

Modelo de Referencia:

$$P(z) = z^7 - 0.8z^6 + 0.17z^5 - 0.01z^4$$

Parámetros iniciales:

$$a_2 = -0.4365, a_1 = 0.7399, a_0 = -0.4355$$

$$b_2 = 0.9267, b_1 = -0.0380, b_0 = 0.4254$$

Los resultados obtenidos muestran la robustez del control por reubicación de polos y las bondades de la identificación en tiempo real de sistemas físicos.

4.2 Pruebas y resultados obtenidos

A continuación se presenta un resumen de las pruebas efectuadas al sistema de control así como los resultados obtenidos para el mismo.

4.2.1 Sintonización del Lazo de Velocidad

En la figura 5 se muestra la sintonización del lazo de velocidad del primomotor (Motor de Inducción) desde su arranque hasta llegar a una velocidad de 1420 RPM . En ésta se pueden apreciar variaciones de velocidad de $1000 - 1200 - 1100 - 1300 - 1400 - 1300 - 1320 \text{ y } 1420 \text{ RPM}$

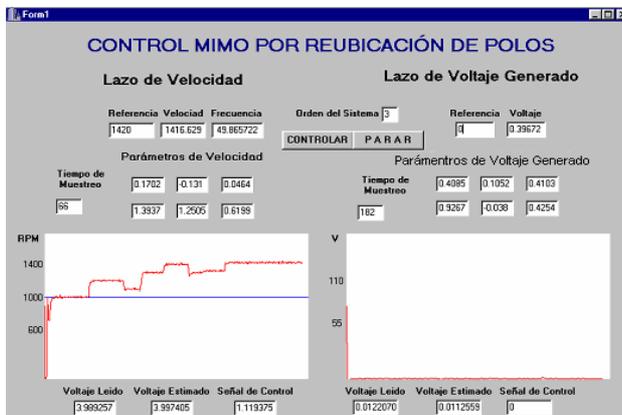


Figura 5. Sintonización del Lazo de Velocidad

4.2.2 Sintonización del Lazo de Voltaje Generado

En la figura 6 se observa la sincronización del lazo de voltaje generado al mantener la velocidad en el primomotor constante en 1420 RPM , unos 50 Hz .

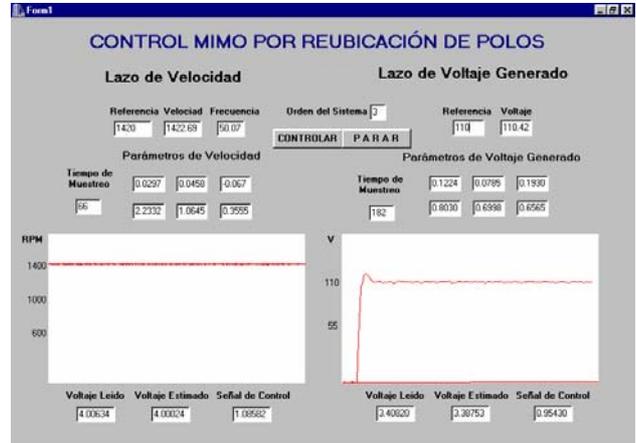


Figura 6. Sintonización del Lazo de Voltaje Generado para Operación en Vacío

4.2.3 Variaciones de la Velocidad Manteniendo la Magnitud del Voltaje Generado Constante

La figura 7 presenta variaciones efectuadas a la velocidad de operación del primomotor al mantener el voltaje generado constante. Los diferentes valores de operación son: $1550 - 1500 - 1400 - 1300 - 1320 - 1420 \text{ RPM}$.

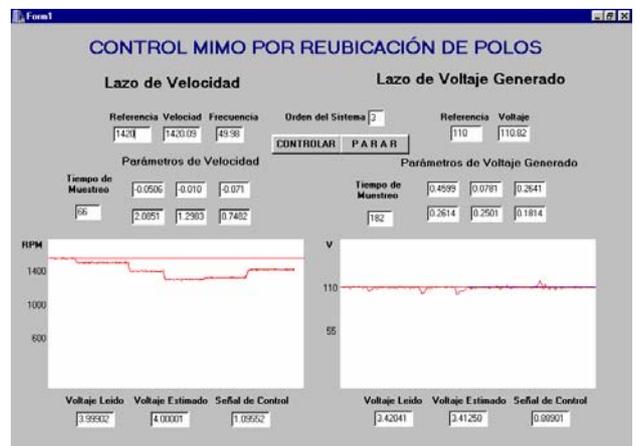


Figura 7. Variaciones de Velocidad para Operación a Voltaje Generado Constante

4.2.4 Variaciones de la Magnitud del Voltaje Generado Manteniendo la Velocidad Constante

En la figura 8 se aprecian pequeñas variaciones en el nivel de tensión en terminales del generador operando, mientras se mantiene la velocidad del primomotor constante. El punto de operación de la velocidad se mantiene en 1420 RPM , que equivalen a unos 50 Hz .

frecuencia. Las variaciones de la magnitud del voltaje generado son: 110 – 100 – 105 – 115 – 110 V.

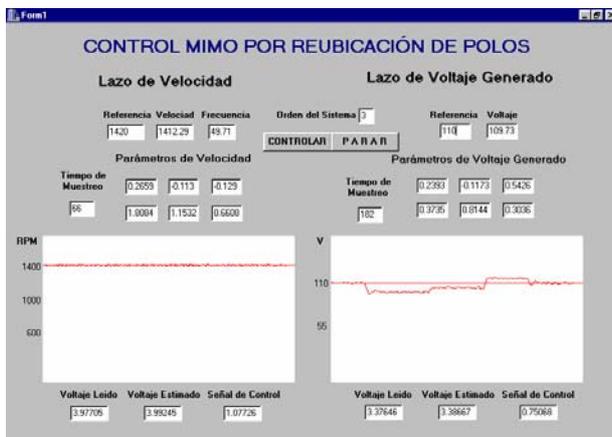


Figura 8. Variaciones del Voltaje Generado Manteniendo la Velocidad Constante

4.2.5 Variaciones de Carga a Velocidad y Voltaje Generado Constantes

Las figuras 9 y 10 muestran conexión y desconexión de carga a velocidad y voltaje generado constantes.

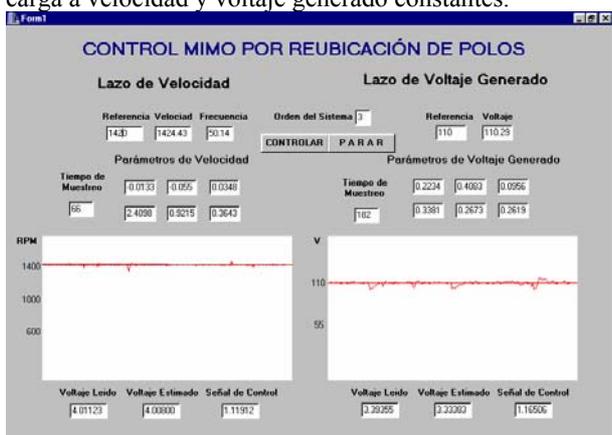


Figura 9. Conexión de Carga a Velocidad y Voltaje Generado Constantes desde Vacío

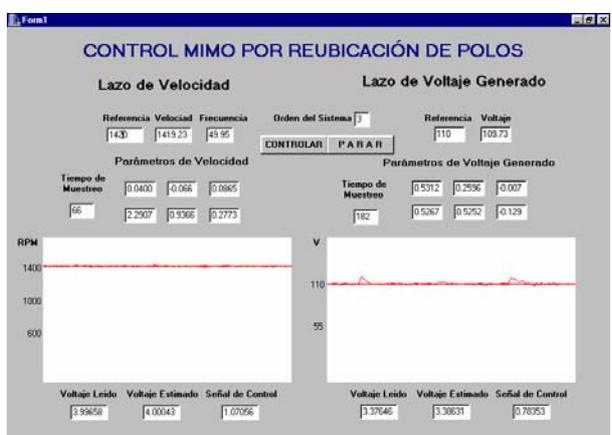


Figura 10. Desconexión de Carga a Velocidad y Voltaje Generado Constantes

5. CONCLUSIONES

Para el sistema físico controlado, generador síncrono, la magnitud de la velocidad se mantiene casi invariante a pesar de las fluctuaciones en el nivel de tensión del otro lazo de control debido a la leve incidencia de este último sobre el lazo de velocidad. Sin embargo, las variaciones de la velocidad sí afectan la magnitud del voltaje generado pero son atenuadas rápidamente por el controlador demostrando la robustez del esquema de control aún teniendo lazos independientes.

Se mostró con los resultados obtenidos que el control adaptativo es bastante eficiente en el momento de controlar sistemas físicos dado que no sólo se supervisan las variables asociadas a la planta sino que además el esquema permite mantener las respuestas o salidas del sistema en valores deseados actualizados de forma permanente. Esto es posible siempre y cuando se logre sintonizar adecuadamente el controlador, para ello debe fijarse previamente un tiempo de muestreo tal que los resultados y respuestas de las salidas de la planta sean los esperados. La obtención del tiempo de muestreo surge de la práctica mediante la variación y búsqueda exhaustiva del mismo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GOODWIN, G. C., Sang S. K. Adaptive Filtering, Prediction and Control. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- [2] GIRALDO, Didier. Tabarez G. I. Algunos Algoritmos de Identificación en Línea de Sistemas. Scientia et Technica, Año I, No1, Marzo de 1995.
- [3] LOPÉZ, Rubio J. Control de Sistemas Multivariable, Universidad Iberoamericana (C. de México).
- [4] GIRALDO, Didier. Tabárez, Iván. Real Time Pole Placement Adaptive Control of a DC Motor Speed. Proceedings of the 16th International Conference on CARS and FOF 2000, Volume 2.
- [5] ESCOBAR, Mauricio A. Bedoya E. J., Control en Tiempo Real de la Velocidad de un Motor de Inducción Utilizando Técnicas Inteligentes. Universidad Tecnológica de Pereira, 2002.
- [6] KOSOW, Irving L. Máquinas Eléctricas y Transformadores. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.