



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Título: “Control robusto, Super-Twisting de alto orden, aplicado a un generador síncrono.”

Autores: Ing. Susana Ramírez Yocupicio, Dr. Adolfo Soto Cota y Dr. Miguel Ángel Bernal Reza

Grado académico: Ingeniera en electrónica, Doctorados en ciencias eléctricas respectivamente.

Nombre de la institución: Instituto Tecnológico de Sonora.

“Control robusto, Super-Twisting de alto orden, aplicado a un generador síncrono”

Resumen. En este documento, se aplicó el Algoritmo Super-Twisting de Alto Orden (HOSTA por sus siglas en inglés) al modelo de alto orden de la máquina síncrona. Para diseñar HOSTA primero se transformó el modelo de la máquina en su forma normal para obtener una forma más adecuada. El diseño obtenido se aplicó al modelo original para regular la velocidad síncrona y el ángulo de potencia. La simulación fue realizada en MATLAB y se evaluó el comportamiento del control bajo severas perturbaciones mecánicas.

Abstract. In this paper, a High Order Super-Twisting Algorithm (HOSTA) is applied to a high order model of the synchronous machine. To design HOSTA we first transform the synchronous machine model in its normal form to get a more suitable form. The obtained design is used in the original model to regulate synchronous speed and the power angle. The simulation was made in MATLAB and we evaluate the performance of the control under severe mechanical perturbation.

Palabras clave- Control robusto, Super-Twisting, generador síncrono.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

AGRADECIMIENTOS: Los autores desean agradecer el apoyo del programa PROFAPI_00468.

I. INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de la generación eléctrica se realiza por medio de máquinas síncronas. Estas máquinas son muy complejas con dinámicas altamente no lineales y varios parámetros de difícil medición. Es de esperarse que esta complejidad aumente al interconectarse varios generadores. De esta forma, para mantener una red eléctrica se debe tener un delicado equilibrio entre la generación y la demanda. En síntesis, se requieren de adecuados márgenes de operación, principalmente frecuencia y voltaje entre todos los componentes de generación y consumo.

Tradicionalmente el control de generación de una red eléctrica utiliza esquemas de control lineales o con ayuda de linealizaciones muy sencillas. Esto se realiza para facilitar el proceso de toma de decisiones en el control jerárquico de una red eléctrica. Es importante tomar en cuenta que al utilizar esquemas de control sencillos se dejan de considerar características dinámicas importantes. Lo que obliga a reducir los márgenes de operación del generador. Es decir, al no tener certeza de la robustez del control ante perturbaciones o aumentos críticos en la demanda, se opta por deshabilitar la operación del generador, antes de poner en riesgo la integridad de la máquina, la de red y la de los centros consumo. Por lo que finalmente se podría reducir considerablemente la robustez y la capacidad la red.

Por razones anteriormente mencionadas, resulta atractiva la investigación y el desarrollo de controladores robustos aplicados a los sistemas eléctricos de



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

potencia. Se han realizado avances en el desarrollo de nuevas técnicas de control para el mejor funcionamiento del generador síncrono. Ejemplos de ellas son: control basado en el método directo de Lyapunov, técnicas lineales por realimentación, pasividad, análisis de funciones de energía [1] y control adaptivo [2]. Sumado a los métodos anteriores, se encuentra el control por modos deslizantes, que además de garantizar el voltaje y la frecuencia adecuados, le brinda al sistema robustez ante perturbaciones y cambios paramétricos [3,4].

II. METODOLOGÍA

En esta sección se lleva a cabo el procedimiento para controlar una máquina síncrona por medio de modos deslizantes utilizando Super-Twisting. Se parte del modelo matemático completo de ocho estados. Primero se obtiene la forma normal tomando en cuenta la salida deseada (velocidad angular). Después se utiliza una primera estructura de control con un término a ser diseñado a conveniencia. Finalmente se utiliza un algoritmo general para control de alto orden super-twisting.

Obtención de la forma normal

La forma normal se obtiene tomando en cuenta la salida deseada, con lo anterior se obtiene el grado relativo del sistema para iniciar con el procedimiento. Para llegar a esta forma es necesario utilizar una transformación. Esto, nos permite diseñar un controlador para la forma normal que también funciona para la forma regular de la que se parte al principio.

El modelo completo de la máquina síncrona, es no lineal y consta de ocho estados: ángulo de carga $x_1 = \delta$, velocidad angular $x_2 = \omega$, enlace de flujo del devanado de campo $x_3 = \varphi_f$, enlace de flujo de los devanados de amortiguamiento



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

$x_4 = \varphi_g$, $x_5 = \varphi_{kd}$ y $x_6 = \varphi_{kq}$, por último $x_7 = i_d$ e $x_8 = i_q$ que representan las corrientes del estator en eje directo y cuadratura respectivamente. El modelo matemático se muestra a continuación.

$$\dot{x}_1 = x_2 - w_b$$

$$\dot{x}_2 = \frac{w_b}{2H} (T_m - T_e)$$

$$\dot{x}_3 = b_1 x_7 + b_2 x_5 + b_3 x_3 + w_b V_f$$

$$\dot{x}_4 = c_1 x_8 + c_2 x_6 + c_3 x_4$$

$$\dot{x}_5 = d_1 x_7 + d_2 x_3 + d_3 x_5$$

$$\dot{x}_6 = e_1 x_8 + e_2 x_4 + e_3 x_6$$

$$\dot{x}_7 = h_1 V_d + h_2 V_f + h_3 x_7 + h_4 x_3 + h_5 x_5 + h_6 x_2 x_4 + h_7 x_2 x_6 + h_8 x_2 x_8$$

$$\dot{x}_8 = k_1 V_q + k_2 x_8 + k_3 x_4 + k_4 x_6 + k_5 x_2 x_3 + k_6 x_2 x_5 + k_7 x_2 x_7$$

donde w_b es la velocidad angular deseada, T_m es el par mecánico y el par

eléctrico está dado por $T_e = a_1 x_3 x_8 + a_2 x_5 x_8 + a_3 x_4 x_7 + a_4 x_6 x_7 + a_5 x_7 x_8$, $V_d = V \sin(x_1)$,

$V_q = V \cos(x_1)$ y V representa el bus al que se encuentra conectado el generador.

El grado relativo es $r=3$ y como $x \in \mathbb{R}^n$ con $n=8$, el sistema se divide en dos subsistemas $\xi \in \mathbb{R}^3$ y $\eta \in \mathbb{R}^5$. El primer subsistema depende del control, el segundo no. Tomando en cuenta que la salida en forma normal será la derivada de la salida en el modelo original, se propone una salida tal que $\dot{y} = x_2 - w_b$. Lo anterior, con el propósito de hacer $x_2 = w_b$. La estructura en z es la siguiente:



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

$$\xi = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} ; \quad \eta = \begin{bmatrix} \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \\ \dot{z}_6 \\ \dot{z}_7 \end{bmatrix} ; \quad \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ \dot{z}_3 &= b(z) + a(z)u \\ \dot{z}_4 &= q_4(z) \\ \dot{z}_5 &= q_5(z) \\ \dot{z}_6 &= q_6(z) \\ \dot{z}_7 &= q_7(z) \\ \dot{z}_8 &= q_8(z) \end{aligned}$$

donde

$$q_4(z) = h_2(b_1x_{77} + b_2z_6 + b_3x_{33}) - w_b(h_1V_d + h_3x_{77} + h_4x_{33} + h_5z_6 + h_6x_{22}z_5 + h_7x_{22}z_7 + h_8x_{22}z_8)$$

$$q_5(z) = c_1z_8 + c_2z_7 + c_3z_5$$

$$q_6(z) = d_1x_{77} + d_2x_{33} + d_3z_6$$

$$q_7(z) = e_1z_8 + e_2z_5 + e_3z_7$$

$$q_8(z) = k_1V_q + k_2z_8 + k_3z_5 + k_4z_7 + k_5x_{22}x_{33} + k_6x_{22}z_6 + k_7x_{22}x_{77}$$

$$b(z) = a_1z_8(b_1x_{77} + b_2z_6 + b_3x_{33}) + a_3x_{77}q_5(z) + a_2z_8q_6(z) + a_4x_{77}q_7(z)$$

$$+ (a_3z_5 + a_4z_7 + a_5z_8)(h_1V_d + h_3x_{77} + h_4x_{33} + h_5z_6 + h_6x_{22}z_5 + h_7x_{22}z_7 + h_8x_{22}z_8) + (a_2z_6 + a_5x_{77})q_8(z)$$

$$a(z) = a_1w_bz_8 + (a_3z_5 + a_4z_7 + a_5z_8)h_2$$



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

$$\begin{aligned}
 z_1 &= x_1 \\
 z_2 &= x_2 - w_b \\
 z_3 &= \frac{w_b}{2H} (Tm - Te) \\
 z_4 &= h_2 x_3 - w_b x_7 \\
 z_5 &= x_4 \\
 z_6 &= x_5 \\
 z_7 &= x_6 \\
 z_8 &= x_8
 \end{aligned}
 \quad ; \quad
 \begin{aligned}
 x_{77} &= \frac{Tm - \frac{2H}{w_b} z_3 - a_1 \frac{1}{h_2} z_4 z_8 - a_2 z_6 z_8}{\left(a_5 + a_1 \frac{1}{h_2} w_b \right) z_8 + a_3 z_5 + a_4 z_7} \\
 x_{33} &= \frac{1}{h_2} [z_4 + w_b x_{77}] \\
 x_{22} &= z_2 - w_b
 \end{aligned}$$

Primera estructura de control

Como se puede observar, la acción de control no afecta η , por lo tanto se tomará en cuenta solo ξ

$$\xi \begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = b(z) + a(z)u \end{cases}$$

Se propone el siguiente control $u = -\frac{1}{a(z)}(b(z) - v)$ donde v está por definirse

sustituyendo u en ξ

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_1 &= z_2 \\
 \dot{z}_2 &= z_3 \\
 \dot{z}_3 &= v
 \end{aligned}$$

Note que se trata de un triple integrador, el diseño de v se verá a continuación



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Control por Super-Twisting

Utilizando el algoritmo de Super-Twisting de alto orden tenemos la siguiente estructura:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 & K_1 &= 8 \\ \dot{z}_2 &= z_3 & K_2 &= 2 \\ \dot{z}_3 &= -K_1 |\sigma_2|^{1/2} \text{sign}(\sigma_2) + z_9 & K_3 &= 4 \\ \dot{z}_9 &= -K_4 \text{sign}(\sigma_2) & K_4 &= 4 \end{aligned} ;$$

donde $\sigma_2 = z_3 + K_3 \left(|z_1|^3 + |z_2|^4 \right)^{1/6} \text{sign} \left(z_2 + K_2 |z_1|^{3/4} \text{sign}(z_1) \right)$. Por lo tanto

$$v = -K_1 |\sigma_2|^{1/2} \text{sign}(\sigma_2) + z_9.$$

III. RESULTADOS

Todas las pruebas se llevaron a cabo mediante simulación utilizando el software MATLAB. Para comprobar la robustez del control, se sometió al generador a perturbaciones en el par mecánico. La perturbación se llevo a cabo a partir de una condición en estado estable con $T_m = 0.4610$ p.u. y en $t = 3$ segundos experimenta un escalón de 0.2 p.u. con una duración de 0.5 segundos. Los resultados se muestran de la figura 1 a la 5.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

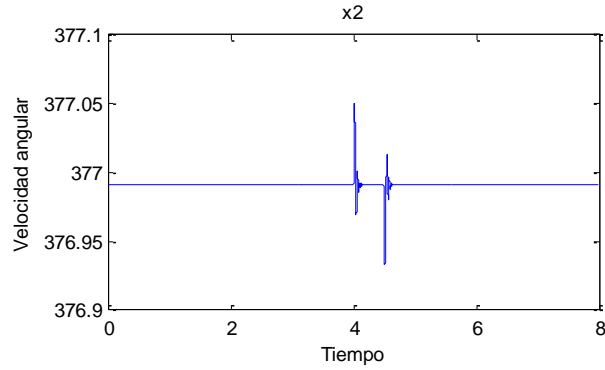


Figura 1. Velocidad angular con perturbaciones en el par mecánico.

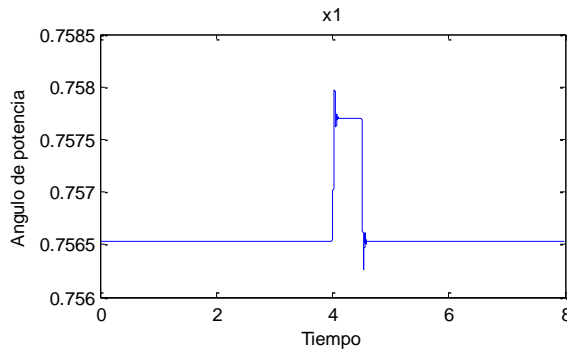


Figura 2. Ángulo de potencia con perturbaciones en el par mecánico.

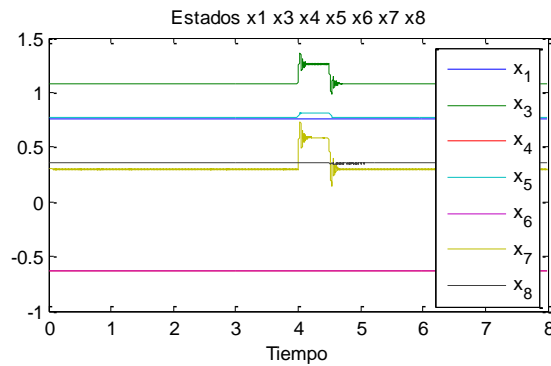


Figura 3. Todos los estados (excepto velocidad angular) con perturbaciones en el par mecánico.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

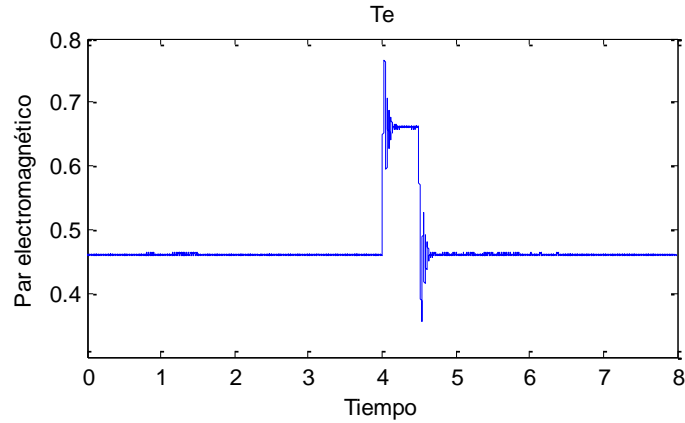


Figura 4. Par electromagnético ante perturbaciones en el par mecánico.

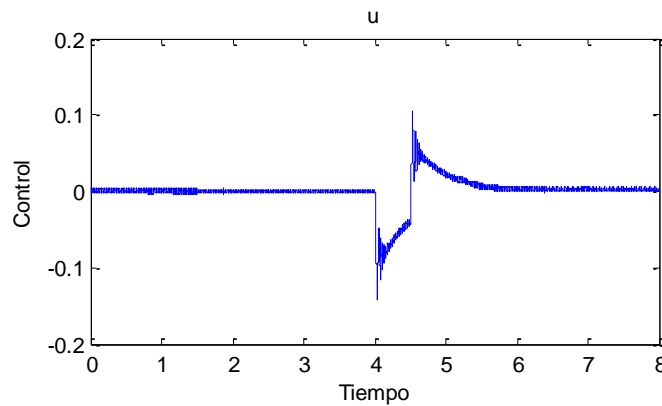


Figura 5. Señal de control ante perturbaciones en el par mecánico.

Se puede apreciar que el comportamiento de la velocidad angular es capaz de estabilizarse a pesar de las perturbaciones que se le presentan al par mecánico. El ángulo de potencia sufre variaciones poco significativas durante la perturbación y se regresa a su condición inicial una vez que la perturbación termina. El par electromagnético (con algunas variaciones en los transitorios) sigue al par mecánico. La señal de control no es continua.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

IV. CONCLUSIONES

Se presentó una forma normal del generador síncrono con grado relativo tres. Se aplicó un algoritmo de Super-Twisting de cuarto orden al modelo completo de generador. No se realizaron pruebas en corto circuito. La señal de control no es continua, al contrario de lo que se esperaba. Se debe tomar en cuenta que no solo una estrategia de control es utilizada en este trabajo, los cálculos matemáticos son muy complejos y en ellos intervienen gran cantidad de estados multiplicándose, dividiéndose y sumándose entre sí. Realizar pruebas en corto circuito y obtener una señal de control continua es un trabajo que se realizará próximamente.

V. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Héctor Huerta, Alexander G. Loukianov, and José Manuel Cañedo, “Multimachine Power-System Control: Integral-SM Approach”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, No. 6, June 2009.
- [2]. Jozef Ritonja, “Modern power system stabilizer approaches”, University of Maribor, Faculty of electrical engineering and computer science, 2000 Maribor, Slovenia.
- [3]. Shyam Kamal, Asif Chalanga, J.A. Moreno, L. Fridman, and B. Bandyopadhyay, “Higher Order Super-Twisting Algorithm”, *13th IEEE Workshop on Variable Structure Systems*, VSS'14, June 29-July 2, 2014, Nantes, France.
- [4]. Yuri Shtessel, Christopher Edwards, Leonid Fridman y Arie Levant, *Sliding Mode Control and Observation*. Birkhauser. 2010.
- [5]. Arie Levant, “Homogeneity approach to high-order sliding mode design”, *Automatica* 41 (2005) 823-830, 2005 Elsevier Ltd.