



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

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

Anteproyecto:

Que para obtener el título de
Maestría en Ciencias de la Ingeniería

Presenta
Susana Ramírez Yocupicio

Cd. Obregón, Sonora; Diciembre de 2015

ÍNDICE

| | | |
|------|--|----|
| I. | INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1. | Antecedentes | 3 |
| 1.2. | Definición del problema | 4 |
| 1.3. | Justificación..... | 5 |
| 1.4. | Hipótesis | 5 |
| 1.5. | Objetivos | 5 |
| 1.6. | Limitaciones | 6 |
| 1.7. | Delimitaciones | 6 |
| II. | FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 7 |
| 2.1. | Forma normal | 7 |
| 2.2. | Control por modos deslizantes | 10 |
| 2.3. | Generador síncrono | 14 |
| 2.4. | Algoritmo de alto orden Super-Twisting | 17 |
| III. | MÉTODO..... | 18 |
| 3.1. | Participantes..... | 18 |
| 3.2. | Instrumentos..... | 18 |
| 3.3. | Procedimiento | 19 |
| IV. | DESARROLLO | 21 |
| 4.1. | Obtención de la forma normal | 21 |
| 4.2. | Primera estructura de control | 30 |
| 4.3. | Control por Super-Twisting..... | 31 |
| V. | RESULTADOS | 32 |
| 5.1. | Perturbación par mecánico..... | 32 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 5.2. Perturbación corto circuito..... | 32 |
| VI. CONCLUSIONES..... | 32 |

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

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 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].

Una desventaja que tiene la aplicación de control robusto por modos deslizantes es que, las primeras generaciones de estas técnicas, presentan un efecto llamado “chattering” [5]. Este efecto, se presenta de forma natural en los motores que reciben una entrada de control discontinua a alta frecuencia. Esta, es una de las principales razones por las que se han desarrollado nuevas técnicas de control robusto. De tal manera que, se enmascara esta discontinuidad para obtener como resultado una entrada de control continua.

1.2. Definición del problema

Debido a la imposibilidad de obtener modelos exactos, al desprecio de las dinámicas rápidas y a la incertidumbre de muchos parámetros. Los controles clásicos utilizados en la gran mayoría de los generadores síncronos no son insensibles ante perturbaciones ni ante cambios paramétricos. Por otra parte, muchos de los controladores no lineales propuestos presentan mejoras, sin embargo no consideran las diferentes condiciones de operación o de carga. Por lo que se presentan dificultades para realizar una comparación de efectividad entre todos ellos. Por

ejemplos, unos consideran cargas resistivas solamente, otros no consideran dinámicas del excitador, otros no consideran cortos circuitos, otros mantienen constante el voltaje en el generador, otros consideran modelos muy reducidos. Por otra parte, los controladores por modos deslizantes, si bien son robustos, pueden presentar problemas de “chattering” debido a la naturaleza discontinua de la señal de control. El fenómeno de “chattering” se puede acrecentar debido a las dinámicas no modeladas de los excitadores y otros elementos secundarios de la máquina síncrona.

1.3. Justificación

El desarrollo de nuevos algoritmos de control para la máquina síncrona permitirá realizar mejoras en el proceso de generación eléctrica. Incrementando los márgenes de operación del generador síncrono garantizando la calidad de frecuencia y voltaje ante situaciones adversas. Además, se proporcionara un modelo de aplicación de técnicas de control de alta ganancia de quinta generación sobre un modelo matemático de alto orden con incertidumbres paramétricas.

1.4. Hipótesis

Aplicar un control Super-Twisting a un generador síncrono brinda estabilidad ante perturbaciones y dinámicas no modeladas. Lo anterior, sin caer en el efecto de “chattering” resultante en las primeras generaciones de control por modos deslizantes.

1.5. Objetivos

Adaptar un algoritmo de control Super-Twisting a un modelo matemático de una máquina síncrona con parámetros reales para analizar su desempeño ante diferentes condiciones de operación. Mediante el empleo de técnicas matemáticas y simulaciones.

Los objetivos específicos son pasar el modelo matemático a su forma normal de tal manera que el sistema quede expresado en dos bloques: un bloque controlable y un bloque libre de control. Proponer un control tal que el primer bloque quede expresado como un triple integrador, donde la entrada resultante pueda diseñarse a conveniencia. Diseñar esta nueva entrada utilizando un algoritmo de control Super-Twisting de alto orden. Realizar pruebas con diferentes condiciones de operación de un generador síncrono. Finalmente, llevar a cabo un análisis de estabilidad.

1.6. Limitaciones

Una de las principales limitaciones es el tiempo con el que se cuenta para realizar la investigación, el proceso de investigación, desarrollo y pruebas, lleva meses y solo contamos con un año. Otra limitante importante es que el instituto no se cuenta con un generador síncrono y tampoco se cuenta con el presupuesto para adquirir uno. Lo anterior hace que resulte imposible probar el control en una máquina real.

1.7. Delimitaciones

Se considerará el modelo completo (de ocho estados) no lineal del generador síncrono para obtener su forma normal y posteriormente aplicar un control que no considere el excitador. En el esquema multimáquina solo se utilizarán máximo tres generadores. Se considerará un bus infinito con variaciones en el bus de generación, y no se realizarán pruebas de corto circuito desbalanceadas. No se realizarán pruebas en un generador síncrono real. No se utilizarán parámetros de otros modelos en la literatura por falta de datos, como comparación al modelo propuesto.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Forma normal

La forma normal se obtiene mediante una transformación, el propósito es llevar el sistema a una forma más fácil de controlar. Esta forma tiene la característica de dividir el sistema en dos bloques, uno controlable y otro que no es afectado por el control. Una vez diseñado el control para la forma normal, se puede aplicar el control a la forma original sin problemas, siempre y cuando el bloque que no es tocado por el control sea estable.

Derivada de Lie

Dado el sistema 1 con origen en el punto x^0 , donde $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}$, y es la salida y D es un vecindario alrededor de x^0 .

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x)\end{aligned}\quad (1)$$

Si $h(x)$ es una función escalar, su gradiente es un vector de dimensión $\mathbb{R}^{1 \times n}$ definido por

$$\nabla h = \frac{\partial h}{\partial x} = \left[\frac{\partial h}{\partial x_1} \quad \dots \quad \frac{\partial h}{\partial x_n} \right]$$

el jacobiano de $f(x)$ está dado por la matriz de dimensión $n \times n$

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Se define la derivada de Lie o la derivada direccional de h en la dirección de f como la función escalar dada por

$$L_f h = \nabla h \cdot f$$

Las derivadas múltiples pueden definirse recursivamente según:

$$L_f^0 h = h ; \quad L_f^i h = L_f (L_f^{i-1} h) = \nabla (L_f^{i-1} h) \cdot f ; \quad i = 1, 2, \dots$$

Del mismo modo, con $g(x)$, la derivada direccional de h respecto de f y g está dada por

$$L_g L_f h = \nabla (L_f h) \cdot g$$

El concepto de la derivada de Lie es importante debido a que las derivadas respecto del tiempo de la salida de un sistema dinámico, así como la derivada de una función candidata de Lyapunov, puede expresarse en términos de la derivada de Lie.

Grado relativo

El grado relativo de un sistema puede definirse como la cantidad de veces que se debe derivar la salida para obtener de manera explícita la entrada. La definición forma es la siguiente:

Se dice que el sistema tiene grado relativo r en el punto x^0 si

$$(i) \quad L_g L_f^k h(x) = 0, \quad \forall x \in D \text{ y } \forall k < r-1$$

$$(ii) \quad L_g L_f^{r-1} h(x^0) \neq 0$$

El grado relativo está íntimamente ligado al grado del controlador a utilizar, cuando de modos deslizantes se trata.

Estructura de la forma normal

La estructura de la forma normal consta de dos subsistemas: uno controlable ξ y uno que no es tocado por el control η . Lo anterior se muestra en la ecuación (2)

$$\begin{aligned} \xi &= \begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \vdots \\ \dot{z}_{r-1} = z_r \\ \dot{z}_r = b(z) + a(z)u \end{cases} \\ \eta &= \begin{cases} \dot{z}_{r+1} = q_{r+1}(z) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = q_n(z) \end{cases} \\ y &= z_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Se puede observar que en ξ , la entrada de control u se integra r veces para tener acceso a la salida definida como z_1 . La estructura de control propuesta para este sistema es

$$u = \frac{1}{a(z)}(-b(z) + v)$$

Donde v es la nueva entrada de control a ser diseñada.

Se puede observar que el subsistema η no es afectado por el control, por lo tanto se requiere que este subsistema sea estable por sí solo.

Dinámica cero

La dinámica cero se puede definir como la dinámica interna cuando la salida y todas sus derivadas son nulas. Cuando la dinámica cero es asintóticamente estable se llama sistema de fase mínima. Cuando la dinámica cero es inestable se define sistema de fase no mínima.

2.2. Control por modos deslizantes

El control por modos deslizantes es un algoritmo de alta ganancia y es el principal modo de operación del control de estructura variable. La principal ventaja de este tipo de control es la robustez que presenta ante perturbaciones y cambios paramétricos. Lo anterior es una ventaja tomando en cuenta que los modelos matemáticos no son exactos y están sujetos a incertidumbres. Además, la mayoría de los sistemas en la realidad no son asilados y son afectados por condiciones externas.

Sistemas de estructura variable

Existen numerosos sistemas físicos descritos dinámicamente por ecuaciones diferenciales con lado derecho discontinuo. Estos sistemas son llamados sistemas de estructura variable (SEV). Este tipo de sistemas puede pensarse como un conjunto de dos o más estructuras o subsistemas continuos y alguna lógica asociada que realiza conmutaciones entre ellos. Cada uno de estos subsistemas cuenta con sus

propias características. Un ejemplo de los SEV son los sistemas mecánicos, que cuenta con características como rozamiento, donde la fuerza de roce toma el signo opuesto a la dirección del movimiento. Otro ejemplo es en sistemas eléctricos donde la alimentación de los circuitos es a través de fuentes conmutadas o convertidores electrónicos, entre otros.

Estabilidad

Los sistemas tienen puntos de equilibrio, estos pueden ser estables o inestables. Un punto de equilibrio estable es aquel que tiene la propiedad de que al colocar el sistema en ese punto de equilibrio, el sistema permanece arbitrariamente cerca de ese punto. También se puede decir que el punto es asintóticamente estable si el sistema tiende a ese punto conforme el tiempo tiende a infinito.

Estabilidad de modos deslizantes

Considere el siguiente sistema con múltiples entradas

$$\dot{X} = AX + BU + DF \quad (3)$$

donde $X \in \mathbb{R}^n$ es el vector columna de estados, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ es una matriz constante con columnas linealmente independientes B_i , $U \in \mathbb{R}^m$ es el vector columna y sus elementos son llamados funciones de control, las cuales son linealmente independientes, $D \in \mathbb{R}^{n \times L}$ es una matriz con columnas linealmente independientes D_i , $F \in \mathbb{R}^L$ es un vector columna de perturbaciones con elementos linealmente independientes y $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz.

Modos deslizantes

Si la función de control es elegida de forma adecuada, las trayectorias pueden ser llevadas hacia la vecindad de una superficie G . Una vez que las trayectorias llegan a esa superficie, nunca la abandonan, se mantienen en ella o ceca de ella. Lo anterior es llamado modo deslizante y G es llamada superficie. La función de control u_i provee de una superficie G_i . Todas las funciones de control u_m garantizan el modo deslizante sobre la superficie $G_1 \cap G_2 \cap \dots \cap G_m$.

La superficie más aceptable es la superficie que pasa a través del origen y está definida por

$$g_i = C_i X = 0$$

donde g_i es un escalar llamada función de switcheo y $C_i \in \mathbb{R}^n$ es un vector renglón constante. Cuando el sistema se encuentra en la superficie deslizante, sus trayectorias pertenecen al subespacio E^{n-m} definido por la ecuación:

$$CX = 0$$

Desde que el modo deslizante no abandona E^{n-m} es aceptable decir que

$$C\dot{X} = 0 \quad (4)$$

Mediante la sustitución del valor de \dot{X} de (3) en (7) de obtiene lo siguiente

$$CAX + CDF + CBU_s = 0 \quad (5)$$

Si la matriz CB es no singular, U_s es determinable a partir de (5)

$$U_s = -(CB)^{-1}(AX + DF)$$

$$X \in E^{n-m}$$

Sustituyendo el valor de U_s en (3), se obtiene la ecuación de modos deslizantes en E^{n-m} .

$$\begin{aligned}\dot{X} &= [I - B(CB)^{-1}C](AX + DF) \\ CX &= 0\end{aligned}\quad (6)$$

Donde I es la matriz unitaria.

Estabilidad ante perturbaciones

Como se puede ver en (6) las perturbaciones F , en general, actúan en la ecuación de modos deslizantes. Dada la siguiente ecuación

$$[I - B(CB)^{-1}C]DF = 0$$

Las perturbaciones F no afectan la ecuación de modos deslizantes, siempre y cuando se cumplan con las condiciones iniciales correspondientes.

Estabilidad ante cambios paramétricos

Generalmente hablando los parámetros del sistema están representados por A . Esta matriz puede ser representada de la siguiente forma

$$A = A_v + A_c$$

donde A_v envuelve a todos las posibles variaciones de los parámetros y A_c contiene el resto de los elementos de A . La ecuación correspondiente de modos deslizantes queda

$$\begin{aligned}\dot{X} &= [I - B(CB)^{-1}C][A_c X + A_v X + DF] \\ CX &= 0\end{aligned}$$

Los parámetros incluidos en la matriz A_v desaparecerán de la ecuación de modos deslizantes si se cumple la siguiente condición

$$\left[I - B(CB)^{-1} C \right] A_v X = 0$$

Con lo anterior se puede apreciar que las perturbaciones paramétricas no afectan a la ecuación de modos deslizantes.

2.3. Generador síncrono

La generación eléctrica consiste en la obtención de energía eléctrica a base de otras fuentes de energía. Una manera de lograr lo anterior es utilizar generadores capaces de convertir el movimiento mecánico en electricidad. Estas máquinas se encuentran interconectadas en una red eléctrica que puede expandirse a través de miles de kilómetros. Dicha red debe ser capaz de soportar los cambios continuos en la demanda y mantener una calidad en voltaje, frecuencia y confiabilidad. El sistema debe cumplir con todo lo anterior a un mínimo costo y teniendo un bajo impacto ecológico.

A diferencia de los elementos pasivos que se encuentran en la red, la máquina síncrona debe ser modelada de una forma mucho más compleja. Tomando regímenes transitorios y subtransitorios. Existen en la máquina síncrona una gran cantidad de dinámicas no lineales extremadamente complejas y algunas de ellas no pueden medirse. En algunos casos, para simplificar su estudio y control, se utilizan modelos reducidos y lineales. Lo anterior da como resultado el desprecio de dinámicas importantes.

Modelo de la máquina síncrona

El generador síncrono es un dispositivo electromecánico capaz de convertir energía mecánica en energía eléctrica. La máquina consiste esencialmente en dos elementos: el campo o rotor y la armadura o estator. El generador síncrono trifásico presenta tres devanados en el estator, cada uno de ellos separado 120° eléctricos. Los devanados son alimentados con corriente alterna trifásica a una frecuencia

dependiente de la velocidad del rotor y del número de polos. El devanado del rotor es excitado con corriente continua. Existen dos estructuras de rotor básicas: rotores de polos salientes y rotores sólidos. Los primeros cuentan con barras de amortiguamiento, en corto circuito, donde se inducen corrientes por efecto de variaciones en el tiempo del rotor o del estator o por cambios en la velocidad del rotor. En los rotores sólidos las corrientes aparecen por el efecto Faraday y realizan la misma función que las barras de amortiguamiento.

Representación del generador síncrono en espacio de estados

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 $x_4 = \varphi_g$, $x_5 = \varphi_{kd}$ 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

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 - \omega_b \\
 \dot{x}_2 &= \frac{\omega_b}{2H}(T_m - T_e) \\
 \dot{x}_3 &= b_1 x_7 + b_2 x_5 + b_3 x_3 + \omega_b V_f \\
 \dot{x}_4 &= c_1 x_8 + c_2 x_6 + c_3 x_4 \\
 \dot{x}_5 &= d_1 x_7 + d_2 x_3 + d_3 x_5 \\
 \dot{x}_6 &= e_1 x_8 + e_2 x_4 + e_3 x_6 \\
 \dot{x}_7 &= h_1 V_d + h_2 V_f + h_3 x_7 + h_4 x_3 + h_5 x_5 + h_6 x_2 x_4 + h_7 x_2 x_6 + h_8 x_2 x_8 \\
 \dot{x}_8 &= k_1 V_q + k_2 x_8 + k_3 x_4 + k_4 x_6 + k_5 x_2 x_3 + k_6 x_2 x_5 + k_7 x_2 x_7
 \end{aligned} \tag{7}$$

donde ω_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.

Los parámetros de la máquina están dados por las siguientes ecuaciones:

$$a_1 = \begin{bmatrix} L_d'' - \ell_a \\ \ell_f \end{bmatrix}; a_2 = \begin{bmatrix} L_d'' - \ell_a \\ \ell_{kd} \end{bmatrix}; a_3 = \begin{bmatrix} L_q'' - \ell_a \\ \ell_g \end{bmatrix}; a_4 = \begin{bmatrix} L_q'' - \ell_a \\ \ell_{kd} \end{bmatrix}; a_5 = [L_q'' - L_d'']$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{do}'} \cdot \frac{L_d'' - \ell_a}{L_d' - \ell_a} \cdot L_{md} \end{bmatrix}; b_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{do}'} \cdot \frac{L_q'' - \ell_a}{L_q' - \ell_a} \cdot \frac{L_{wd}}{\ell_{kd}} \end{bmatrix}; b_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{do}'} \left[1 + \frac{L_d'' - \ell_a}{\ell_{kd} \ell_f} \cdot L_{md} \right] \end{bmatrix}$$

$$c_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{do}'} \cdot \frac{L_d'' - \ell_a}{L_d' - \ell_a} \cdot L_{mq} \end{bmatrix}; c_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{do}'} \cdot \frac{L_q'' - \ell_a}{L_q' - \ell_a} \cdot \frac{L_{mq}}{\ell_{kq}} \end{bmatrix}; c_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{do}'} \left[1 + \frac{L_q'' - \ell_a}{\ell_{kq} \ell_g} \cdot L_{mq} \right] \end{bmatrix}$$

$$d_1 = \begin{bmatrix} -\frac{L_d' - \ell_a}{T_{do}''} \end{bmatrix}; d_2 = \begin{bmatrix} \frac{L_d' - \ell_a}{T_{do}'' \ell_f} \end{bmatrix}; d_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{do}''} \end{bmatrix}$$

$$e_1 = \begin{bmatrix} -\frac{L_q' - \ell_a}{T_{qo}''} \end{bmatrix}; e_2 = \begin{bmatrix} \frac{L_q' - \ell_a}{T_{do}'' \ell_g} \end{bmatrix}; e_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{qo}''} \end{bmatrix}$$

$$h_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_B}{L_d''} \end{bmatrix}; h_2 = \begin{bmatrix} \frac{w_B [L_d'' - \ell_a]}{L_d'' \ell_f} \end{bmatrix}; h_3 = \begin{bmatrix} -\frac{r w_B}{L_d''} - \frac{L_d'' - \ell_a}{L_d'' \ell_f} \cdot \frac{L_d' - \ell_a}{L_d' - \ell_a} \cdot \frac{L_{md}}{T_{do}'} - \frac{L_d'' - \ell_a}{L_d'' \ell_{kd}} \cdot \frac{L_d' - \ell_a}{T_{do}''} \end{bmatrix};$$

$$h_4 = \begin{bmatrix} \frac{L_d'' - \ell_a}{\ell_{kd} T_{do}''} \cdot \frac{L_d' - \ell_a}{L_d'' \ell_f} - \frac{L_d'' - \ell_a}{L_d'' \ell_f T_{do}'} \left[1 + \frac{L_d'' - \ell_a}{\ell_{kd} \ell_f} \cdot L_{md} \right] \end{bmatrix};$$

$$h_5 = \begin{bmatrix} \frac{L_d'' - \ell_a}{L_d'' \ell_f T_{do}''} \cdot \frac{L_d' - \ell_a}{L_q' - \ell_a} \cdot \frac{L_{md}}{\ell_{kd}} - \frac{L_d'' - \ell_a}{L_d'' \ell_{kd} T_{do}''} \end{bmatrix}; h_6 = \begin{bmatrix} -\frac{L_q'' - \ell_a}{L_d'' \ell_g} \end{bmatrix}; h_7 = \begin{bmatrix} -\frac{L_q'' - \ell_a}{L_d'' \ell_{kq}} \end{bmatrix}; h_8 = \begin{bmatrix} \frac{L_q''}{L_d''} \end{bmatrix};$$

$$k_1 = \begin{bmatrix} -\frac{w_B}{L_q''} \end{bmatrix}; k_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r w_B}{L_q''} - \frac{L_q'' - \ell_a}{L_q'' \ell_g} \cdot \frac{L_q' - \ell_a}{L_q' - \ell_a} \cdot \frac{L_{mq}}{T_{qo}'} - \frac{L_q'' - \ell_a}{L_q'' \ell_{kq}} \cdot \frac{L_q' - \ell_a}{T_{qo}''} \end{bmatrix};$$

$$k_3 = \begin{bmatrix} \frac{L_q'' - \ell_a}{\ell_{kq} T_{qo}''} \cdot \frac{L_q' - \ell_a}{L_q'' \ell_g} - \frac{L_q'' - \ell_a}{L_q'' \ell_g T_{qo}'} \left[1 + \frac{L_d'' - \ell_a}{\ell_{kq} \ell_g} L_{mq} \right] \end{bmatrix}; k_4 = \begin{bmatrix} \frac{L_q'' - \ell_a}{L_q'' \ell_g T_{qo}'} \cdot \frac{L_q' - \ell_a}{L_q' - \ell_a} \cdot \frac{L_{mq}}{\ell_{kq}} - \frac{L_q'' - \ell_a}{L_q'' \ell_{kq} T_{qo}''} \end{bmatrix};$$

$$k_5 = \begin{bmatrix} \frac{L_q'' - \ell_a}{L_q'' \ell_f} \end{bmatrix}; k_6 = \begin{bmatrix} \frac{L_d'' - \ell_a}{L_q'' \ell_{kd}} \end{bmatrix}; k_7 = \begin{bmatrix} -\frac{L_q''}{L_q''} \end{bmatrix}$$

Donde L_d , L_q , L'_d , L'_q , L''_d , L''_q , ℓ_a , r_a , T'_{do} , T'_{qo} , T''_{do} , T''_{qo} , H son parámetros de la máquina síncrona y w_B es la velocidad angular base en el transitorio. El resto de los parámetros puede ser obtenido mediante los parámetros antes mencionados.

2.4. Algoritmo de alto orden Super-Twisting

Este algoritmo fue propuesto en 2014 por el doctor L. Fridman, J. A. Moreno y otros colaboradores. La idea era proponer un algoritmo general para aplicar Super-Twisting de alto orden. El algoritmo para aplicar Super-Twisting de orden cuatro se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}\dot{\chi}_1 &= \chi_2 \\ \dot{\chi}_2 &= \chi_3 \\ \dot{\chi}_3 &= -K_1 |\phi_2|^{1/2} \text{sign}(\phi_2) + \chi_4 \\ \dot{\chi}_4 &= -K_4 \text{sign}(\phi_2)\end{aligned}$$

donde $\phi_1 = \chi_2 + K_2 |\chi_1|^{3/4} \text{sign}(\chi_1)$

y $\phi_2 = \chi_3 + K_3 \left(|\chi_1|^3 + |\chi_2|^4 \right)^{1/6} \text{sign}(\phi_1)$

III. MÉTODO

En este capítulo se deja claro quién es el objeto de estudio, y quienes los participantes. Se indican cuales son los instrumentos utilizados y el procedimiento realizado para llevar a cabo correctamente el proyecto de tesis.

3.1. Participantes

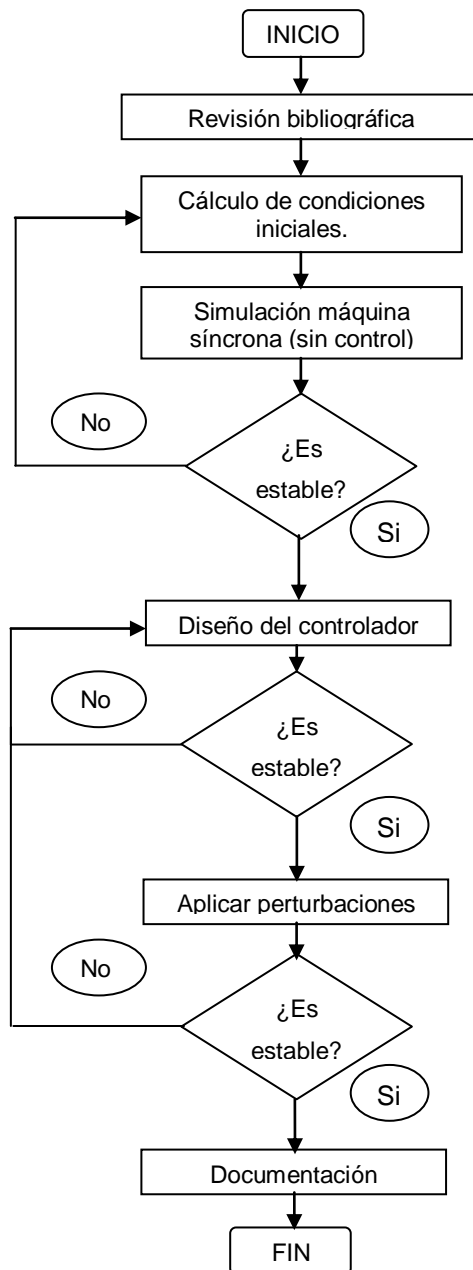
El objeto de estudio es una máquina síncrona, se considera el modelo matemático completo (ocho estados), sin tomar en cuenta el excitador. Los participantes son: Ing. Susana Ramírez Yocupicio y el Dr. Adolfo Soto Cota en colaboración con el cuerpo académico de Control No Lineal de Sistemas Dinámicos del Instituto Tecnológico de Sonora.

3.2. Instrumentos

En este proyecto no se realizaron implementaciones, todas las pruebas se llevaron a cabo en simulación utilizando dos herramientas de software matemático: MATLAB y SIMNON.

3.3. Procedimiento

En esta sección se describen a detalle los pasos a seguir para el desarrollo de la investigación y el procesamiento de los datos.



Primeramente se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva para conocer ampliamente el problema y definir el procedimiento a utilizar resolverlo. Debido a que solo se realizaron simulaciones, fue necesario calcular las condiciones iniciales de la máquina síncrona, una vez definidas estas condiciones se realiza la simulación, en estado estable. Si los resultados son los esperados entonces se pasa a la siguiente etapa. El diseño del controlador es la parte fuerte de este proyecto, por lo tanto es muy importante. Una vez que está diseñado el control, se realiza una simulación en estado estable, si la máquina es estable entonces se le aplican perturbaciones a la planta. Si el control no es capaz de estabilizar la máquina, primero que nada se ajustan las ganancias, si no es ese el problema, entonces se rediseña el control. Una vez que la planta con el controlador resulta ser robusta, es decir, inmune ante perturbaciones (bajo las características propuestas en el primer capítulo), se lleva a cabo la última etapa, documentación. En la última etapa se formaliza el trabajo realizado, sin embargo la documentación y parte del trabajo final se llevan a cabo desde el inicio del proyecto.

IV. DESARROLLO

En este capítulo 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.

4.1. 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.

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

$$\dot{x}_2 = \frac{w_b}{2H}(Tm - Te)$$

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

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

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

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

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

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

donde

$$Te = a_1 x_3 x_8 + a_2 x_5 x_8 + a_3 x_4 x_7 + a_4 x_6 x_7 + a_5 x_7 x_8$$

Dado el sistema

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad ; \quad y = h(x)$$

se debe pasar a la siguiente forma:

$$\left. \begin{array}{l} z_1 = \varphi_1(x) = h(x) \\ z_2 = \varphi_2(x) = L_f h(x) \\ \vdots \\ z_{r-1} = \varphi_{r-1}(x) = L_f^{r-2} h(x) \\ z_r = \varphi_r(x) = L_f^{r-1} h(x) \end{array} \right\} \xi$$

$$\left. \begin{array}{l} z_{r+1} = \varphi_{r+1}(x) \\ \vdots \\ z_n = \varphi_n(x) \end{array} \right\} \eta$$

donde

r es el grado relativo.

n es el grado del sistema.

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 $x_2 = w_b$. Por lo tanto:

$$y = h(x) = x_1$$

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

Identificar $f(x)$, $g(x)$, $h(x)$ y u

$$h(x) = x_1$$

$$u = V_f$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 - w_b \\ \frac{w_b}{2H} (Tm - a_1 x_3 x_8 - a_2 x_5 x_8 - a_3 x_4 x_7 - a_4 x_6 x_7 - a_5 x_7 x_8) \\ b_1 x_7 + b_2 x_5 + b_3 x_3 \\ c_1 x_8 + c_2 x_6 + c_3 x_4 \\ d_1 x_7 + d_2 x_3 + d_3 x_5 \\ e_1 x_8 + e_2 x_4 + e_3 x_6 \\ h_1 V_d + h_3 x_7 + h_4 x_3 + h_5 x_5 + h_6 x_2 x_4 + h_7 x_2 x_6 + h_8 x_2 x_8 \\ k_1 V_q + k_2 x_8 + k_3 x_4 + k_4 x_6 + k_5 x_2 x_3 + k_6 x_2 x_5 + k_7 x_2 x_7 \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ h_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Obtención del grado relativo mediante las derivadas de Lie.

Se debe cumplir lo siguiente:

$$\begin{aligned} i) L_g L_f^k h(x) &= 0 & ; & \quad \forall k = \{0, \dots, r-2\} \\ ii) L_g L_f^{r-1} h(x) &\neq 0 \end{aligned}$$

Donde r es el grado relativo.

$$L_g h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ h_2 \\ 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] f(x) = x_2 - w_b$$

$$L_g L_f h(x) = \frac{\partial (L_f h(x))}{\partial x} g(x) = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] g(x) = 0$$

$$L_f^2 h(x) = \frac{\partial (L_f h(x))}{\partial x} f(x) = \frac{w_b}{2H} Tm - \frac{w_b}{2H} (a_1 x_3 x_8 + a_2 x_5 x_8 + a_3 x_4 x_7 + a_4 x_6 x_7 + a_5 x_7 x_8)$$

$$L_g L_f^2 h(x) = \frac{\partial (L_f^2 h(x))}{\partial x} g(x)$$

$$L_g L_f^2 h(x) = -\frac{w_b}{2H} [0 \ 0 \ a_1 x_8 \ a_3 x_7 \ a_2 x_8 \ a_4 x_7 \ a_3 x_4 + a_4 x_6 + a_5 x_8 \ a_1 x_3 + a_2 x_5 + a_5 x_7] g(x)$$

$$L_g L_f^2 h(x) = a_1 w_b x_8 + (a_3 x_4 + a_4 x_6 + a_5 x_8) h_2$$

Por lo tanto 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 $\eta \in \mathbb{R}^5$, quedando de la siguiente forma:

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

$$\eta \begin{cases} \dot{z}_4 = q_4(z) \\ \dot{z}_5 = q_5(z) \\ \dot{z}_6 = q_6(z) \\ \dot{z}_7 = q_7(z) \\ \dot{z}_8 = q_8(z) \end{cases}$$

Obtención de $\varphi(x)$ dado

$$\varphi(x) = \begin{bmatrix} \varphi_1(x) \\ \varphi_2(x) \\ \varphi_3(x) \\ \varphi_4(x) \\ \varphi_5(x) \\ \varphi_6(x) \\ \varphi_7(x) \\ \varphi_8(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ L_f^2 h(x) \\ \varphi_4(x) \\ \varphi_5(x) \\ \varphi_6(x) \\ \varphi_7(x) \\ \varphi_8(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 - w_b \\ \frac{w_b}{2H}(Tm - Te) \\ \varphi_4(x) \\ \varphi_5(x) \\ \varphi_6(x) \\ \varphi_7(x) \\ \varphi_8(x) \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\varphi_i(x) : L_g \varphi_i(x) = 0 \quad ; \quad i = \{3, 4, 5, 6, 7, 8\}$$

$$\exists \varphi(x)^{-1}$$

Para obtenerlas se propone lo siguiente:

$$\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{w_b}{2H}a_1x_8 & -\frac{w_b}{2H}a_3x_7 & -\frac{w_b}{2H}a_2x_8 & -\frac{w_b}{2H}a_4x_7 & \phi_1 & \phi_2 \\ 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 & 0 & -w_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde

$$\phi_1 = -\frac{w_b}{2H}(a_3x_4 + a_4x_6 + a_5x_8)$$

$$\phi_2 = -\frac{w_b}{2H}(a_1x_3 + a_2x_5 + a_5x_7)$$

El determinante de $\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x}$ es distinto de cero (verificado mediante MATLAB).

$$\det\left(\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x}\right) \neq 0$$

Para verificar $L_g \varphi_i(x) = 0$, solo hay dudas en $\varphi_4(x)$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_4(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial \varphi_4(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial \varphi_4(x)}{\partial x_3} & \frac{\partial \varphi_4(x)}{\partial x_4} & \frac{\partial \varphi_4(x)}{\partial x_5} & \frac{\partial \varphi_4(x)}{\partial x_6} & \frac{\partial \varphi_4(x)}{\partial x_7} & \frac{\partial \varphi_4(x)}{\partial x_8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ h_2 \\ 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$\varphi_4(x) = h_2 x_3 - w_b x_7$$

$$\varphi_5(x) = x_4$$

$$\varphi_6(x) = x_5$$

$$\varphi_7(x) = x_6$$

$$\varphi_8(x) = x_8$$

Escribiendo z en función de x

$$z_1 = x_1$$

$$z_2 = x_2 - w_b$$

$$z_3 = \frac{w_b}{2H} (Tm - Te)$$

$$z_4 = h_2 x_3 - w_b x_7$$

$$z_5 = x_4$$

$$z_6 = x_5$$

$$z_7 = x_6$$

$$z_8 = x_8$$

Escribiendo x en función de z

$$x_1 = z_1$$

$$x_2 = z_2 + w_b$$

$$x_3 = \frac{1}{h_2} (z_4 + w_b x_7)$$

$$x_4 = z_5$$

$$x_5 = z_6$$

$$x_6 = z_7$$

$$x_8 = z_8$$

$$z_3 = \frac{w_b}{2H} Tm - \frac{w_b}{2H} \left[a_1 \frac{1}{h_2} (z_4 + w_b x_7) z_8 + a_2 z_6 z_8 + a_3 z_5 x_7 + a_4 z_7 x_7 + a_5 z_8 x_7 \right]$$

$$z_3 = \frac{w_b}{2H} Tm - \frac{w_b}{2H} \left(a_1 \frac{1}{h_2} z_4 z_8 + a_2 z_6 z_8 \right) - \frac{w_b}{2H} \left(a_1 \frac{1}{h_2} w_b z_8 + a_3 z_5 + a_4 z_7 + a_5 z_8 \right) x_7$$

$$\left[\left(a_5 + a_1 \frac{1}{h_2} w_b \right) z_8 + a_3 z_5 + a_4 z_7 \right] x_7 = Tm - \frac{2H}{w_b} z_3 - a_1 \frac{1}{h_2} z_4 z_8 - a_2 z_6 z_8$$

$$x_7 = \frac{Tm - \frac{2H}{w_b} z_3 - a_1 \frac{1}{h_2} z_4 z_8 - a_2 z_6 z_8}{\left(a_5 + a_1 \frac{1}{h_2} w_b \right) z_8 + a_3 z_5 + a_4 z_7}$$

$$x_3 = \frac{1}{h_2} \left[z_4 + w_b \left(\frac{Tm - \frac{2H}{w_b} z_3 - a_1 \frac{1}{h_2} z_4 z_8 - a_2 z_6 z_8}{\left(a_5 + a_1 \frac{1}{h_2} w_b \right) z_8 + a_3 z_5 + a_4 z_7} \right) \right]$$

Obtener \dot{z}

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 = x_2 - w_b = z_2$$

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 = z_3$$

$$\dot{z}_3 = b(z) + a(z)u$$

$$\dot{z}_4 = q_4(z)$$

$$\dot{z}_5 = q_5(z)$$

$$\dot{z}_6 = q_6(z)$$

$$\dot{z}_7 = q_7(z)$$

$$\dot{z}_8 = q_8(z)$$

donde

$$b(z) = L_f^3 h(x) \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$a(z) = L_g L_f^2 h(x) \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$q_i(z) = L_f \varphi_i(x) \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$x_{77} = \frac{Tm - \frac{2H}{w_b} z_3 - a_1 \frac{1}{h_2} z_4 z_8 - a_2 z_6 z_8}{\left(a_5 + a_1 \frac{1}{h_2} w_b \right) z_8 + a_3 z_5 + a_4 z_7}$$

$$x_{33} = \frac{1}{h_2} [z_4 + w_b x_{77}]$$

$$x_{22} = z_2 - w_b$$

$$q_4(z) = [0 \ 0 \ h_2 \ 0 \ 0 \ 0 \ -w_b \ 0] f(x) \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$q_4(z) = h_2(b_1x_7 + b_2x_5 + b_3x_3) - w_b(h_1V_d + h_3x_7 + h_4x_3 + h_5x_5 + h_6x_2x_4 + h_7x_2x_6 + h_8x_2x_8) \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$q_5(z) = c_1x_8 + c_2x_6 + c_3x_4 \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$q_6(z) = d_1x_7 + d_2x_3 + d_3x_5 \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$q_7(z) = e_1x_8 + e_2x_4 + e_3x_6 \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$q_8(z) = k_1V_q + k_2x_8 + k_3x_4 + k_4x_6 + k_5x_2x_3 + k_6x_2x_5 + k_7x_2x_7 \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$b(z) = -\frac{w_b}{2H} [0 \ 0 \ a_1x_8 \ a_3x_7 \ a_2x_8 \ a_4x_7 \ a_3x_4 + a_4x_6 + a_5x_8 \ a_2x_5 + a_5x_7] f(x) \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$b(z) = a_1x_8(b_1x_7 + b_2x_5 + b_3x_3) + a_3x_7q_5(z) + a_2x_8q_6(z) + a_4x_7q_7(z)$$

$$+ (a_3x_4 + a_4x_6 + a_5x_8)(h_1V_d + h_3x_7 + h_4x_3 + h_5x_5 + h_6x_2x_4 + h_7x_2x_6 + h_8x_2x_8) + (a_2x_5 + a_5x_7)q_8(z) \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

$$a(z) = a_1w_bx_8 + (a_3x_4 + a_4x_6 + a_5x_8)h_2 \Big|_{x=\varphi^{-1}(z)}$$

Reescribiendo para que todo quede expresado en función de z

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

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

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

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

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

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

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

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

Estructura de z

$$\xi = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} ; \quad \eta = \begin{bmatrix} \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \\ \dot{z}_6 \\ \dot{z}_7 \end{bmatrix}$$

$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$\dot{z}_2 = z_3$$

$$\dot{z}_3 = b(z) + a(z)u$$

$$\dot{z}_4 = q_4(z)$$

$$\dot{z}_5 = q_5(z)$$

$$\dot{z}_6 = q_6(z)$$

$$\dot{z}_7 = q_7(z)$$

$$\dot{z}_8 = q_8(z)$$

4.2. 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

$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$\dot{z}_2 = z_3$$

$$\dot{z}_3 = v$$

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

4.3. 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

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

V. RESULTADOS

5.1. Perturbación par mecánico

5.2. Perturbación corto circuito

VI. CONCLUSIONES

APÉNDICE A

En este apéndice se muestran los códigos utilizados para llevar a cabo la simulación del generador síncrono. Aplicando el control y las perturbaciones.

Cálculo de condiciones en estado estable

Generador síncrono en estado estable

Controlador

Código ODE

Perturbación par mecánico

Perturbación corto circuito

NOTA: cuando se aplican perturbaciones al generador síncrono, estas también deben aplicarse al programa del control.

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.

