

Aplicación de estrategias de control lineal en generadores síncronos y evaluación de su comportamiento en caso de cortocircuito

Héctor Ascención Mestiza

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Energía, Av. San Pablo No. 180.

C.P. 02200, México. D.F., MEXICO.

hami-221@hotmail.com

Eduardo Campero Littlewood

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Energía, Av. San Pablo No. 180.

C.P. 02200, México. D.F., MEXICO

ecl@correo.azc.uam.mx

Felipe de Jesús González Montañez

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Energía, Av. San Pablo No. 180.

C.P. 02200, México. D.F., MEXICO

fjgm@correo.azc.uam.mx

Resumen

En el presente trabajo se analiza la estabilidad eléctrica de un generador síncrono, cuando se utilizan estrategias de control lineal y se presenta un cortocircuito. El modelaje y simulación se llevan a cabo para un generador síncrono de 2 polos, 150 MVA, 120 MW, 13.8 kV y 50Hz conectado a un bus infinito a través de un transformador y una línea de transmisión simple. La representación del sistema eléctrico dinámico se hace mediante circuitos equivalentes en dos ejes y se incluye la ecuación de oscilación así como el modelo del regulador automático de voltaje Proporcional-Derivativo (PD) ó control Proporcional-Derivativo-Integral (PID). La sintonización de los controles se llevó a cabo de manera manual dentro de los valores típicos de controles y sin sobrepasar los límites de las variables eléctricas del generador. Los resultados se comparan con mediciones de

una prueba de cortocircuito que se realizó en el generador especificado y se muestran los logros en la estabilidad del voltaje, el ángulo de carga y la corriente de armadura del generador por el uso del control PD ó PID.

Palabras Claves: Control, Cortocircuito, Modelado, PD, PID.

1. Introducción

La máquina síncrona que generalmente opera como generador es considerada como el convertidor de energía mecánica en eléctrica más grande en el mundo [1]. Lo que convierte a esta máquina en el elemento principal en la generación de potencia eléctrica y un dispositivo importante en los sistemas eléctricos de potencia. Por ello el estudio de su comportamiento en estado transitorio y en estado estable es indispensable. La estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia fue reconocida como un problema importante en la seguridad de operación del sistema desde 1920. Muchos apagones totales causados por la inestabilidad del sistema ilustraron la importancia de este fenómeno. Históricamente, la estabilidad transitoria ha sido el problema dominante en la mayoría de sistemas de potencia, y por tanto el foco de atención de industrias eléctricas [2]. La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia es la propiedad que establece la capacidad para mantener el funcionamiento síncrono de su planta síncrona, cuando el sistema se somete a cambios en sus condiciones de operación, debidos a un perfil cambiante de la carga o a cambios en la configuración del sistema [3].

En este caso se analizará la falla de cortocircuito trifásica debido a que es la que provoca un transitorio más severo en el que se tiene la mayor magnitud de corriente de cortocircuito. Hoy en día la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia es una necesidad en la sociedad, ya que nos hemos acostumbrado a ser dependientes de la energía eléctrica, y una interrupción prolongada genera grandes pérdidas monetarias así como el colapso de las actividades necesarias en la vida cotidiana.

2. Modelado de la máquina síncrona

La máquina síncrona se puede modelar con seis devanados, tres devanados de fase montados en el estator distribuidos 120° , tres devanados montados en el rotor en el cual uno es de campo que proporciona la excitación y dos devanados de amortiguamiento [4]. Las ecuaciones generales para cualquier máquina síncrona [4, 5, 6]:

$$v = \pm ri \pm \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

$$\psi = Li \quad (2)$$

Las ecuaciones de voltaje en el marco de las tres fases *abc* son:

$$v_a = r_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (3)$$

$$v_b = r_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (4)$$

$$v_c = r_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (5)$$

Al aplicar la transformación de Park pasamos al marco en dos ejes *dq0* y obtenemos:

$$u_d = r_d i_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \omega_m \psi_q \quad (6)$$

$$u_q = r_q i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_m \psi_d \quad (7)$$

$$u_0 = r_0 i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \quad (8)$$

Dado que la falla trifásica de cortocircuito es un tipo de falla balanceada las corrientes en el eje *0* son cero. Las ecuaciones de voltaje en el rotor de la máquina se describen a continuación. Éstas no se ven afectadas por el cambio del marco *abc* al sistema de referencia *dq0*.

$$u_{fd} = r_f i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (9)$$

$$0 = r_{1d} i_{1d} + \frac{d\psi_{1d}}{dt} \quad (10)$$

$$0 = r_{1q} i_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt} \quad (11)$$

La red externa que conecta al generador síncrono con el bus infinito tiene una impedancia correspondiente al transformador y a la línea de transmisión (ver Fig. 1). Por lo que se utiliza el modelo de la máquina modificada incluye directamente la resistencia del estator sumada con la externa (resistencia del transformador y línea de transmisión) y la inductancia de dispersión en el estator sumada con la externa (inductancia del transformador y línea de transmisión), estos valores pueden cambiar antes y después de la falla dependiendo del lugar donde se presenta el cortocircuito [4].

$$r_q = r_a = r_a + \frac{R_r}{2} + \frac{R_L}{2} + R_{ext} \quad (12)$$

$$L_{dd} = L_d + \frac{L_r}{2} + \frac{L_L}{2} + L_{ext} \quad (13)$$

$$L_{qq} = L_q + \frac{L_r}{2} + \frac{L_L}{2} + L_{ext} \quad (14)$$

Por lo tanto ahora los voltajes en el eje directo y cuadratura serán las componentes del voltaje del bus infinito cuando opere normalmente, que están dadas por la ecuación (15) y (16) [7] y cero cuando se presente la falla de cortocircuito trifásica.

$$u_{dB} = \sqrt{2} u_B \sin \delta \quad (15)$$

$$u_{qB} = \sqrt{2} u_B \cos \delta \quad (16)$$

La ecuación de voltajes puede expresarse en forma compacta [7]:

$$u = Ri + \frac{d}{dt} Li + \omega_m Gi \quad (17)$$

donde las letras mayúsculas representan las matrices de los parámetros involucrados.

La ecuación (17) puede escribirse de forma que las corrientes sean las variables de estado [4, 8, 9]:

$$\frac{di}{dt} = Ai + Bu$$

donde:

$$i^T = [i_d \quad i_{fd} \quad i_{1d} \quad i_q \quad i_{1q}]$$

$$u^T = [u_{dB} \quad u_{fd} \quad u_{1d} \quad u_{qB} \quad u_{1q}]$$

$$B = (L^{-1})$$

$$A = -B(R + \omega_m G)$$

La ecuación de oscilación está dada por las siguientes expresiones [5,8,9]:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} T_m - \frac{\omega_0}{2H} T_e \quad (18)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 - \omega_m \quad (19)$$

El par electromagnético en por unidad por definición es [5, 8, 9]:

$$T_e = \frac{\omega_0}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (20)$$

El modelo matemático de la máquina síncrona en variables de estado sin control está dado por la matriz de séptimo orden.

$$\begin{bmatrix} i_d^g \\ i_{fd}^g \\ i_{1d}^g \\ i_q^g \\ i_{1q}^g \\ \omega_m^g \\ \delta^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & 0 & 0 \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & 0 & 0 \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & 0 & 0 \\ \frac{-\omega_0^2}{4H} L_{dd} i_q & \frac{-\omega_0^2}{4H} L_{dfd} i_q & \frac{-\omega_0^2}{4H} L_{d1d} i_q & \frac{\omega_0^2}{4H} L_{qq} i_d & \frac{\omega_0^2}{4H} L_{q1q} i_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_{fd} \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \\ \omega_m \\ \delta \end{bmatrix} + \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{15} & 0 & 0 \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} & B_{25} & 0 & 0 \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} & B_{35} & 0 & 0 \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} & B_{45} & 0 & 0 \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} & B_{54} & B_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_0}{2H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{dB} \\ u_{fd} \\ 0 \\ u_{qB} \\ 0 \\ T_m \\ 1 \end{bmatrix}$$

3. Desarrollo

Se analizó el comportamiento del Generador Síncrono (GS) cuando se presenta una falla de cortocircuito trifásica en el punto c de la red eléctrica (ver Fig. 1) durante 140 ms. Con el fin de observar la parte transitoria y la capacidad del GS de recobrar su estabilidad. El objetivo es estabilizar el voltaje en terminales, el ángulo de carga y la velocidad del rotor del generador a través del voltaje de campo con el fin de que al liberarse una falla de cortocircuito trifásica el GS regrese, lo más rápido posible, a una condición estable en sincronismo con el sistema eléctrico de potencia. Se espera que el control lineal que se adicione a la configuración original muestre una respuesta adecuada de estabilización del sistema.

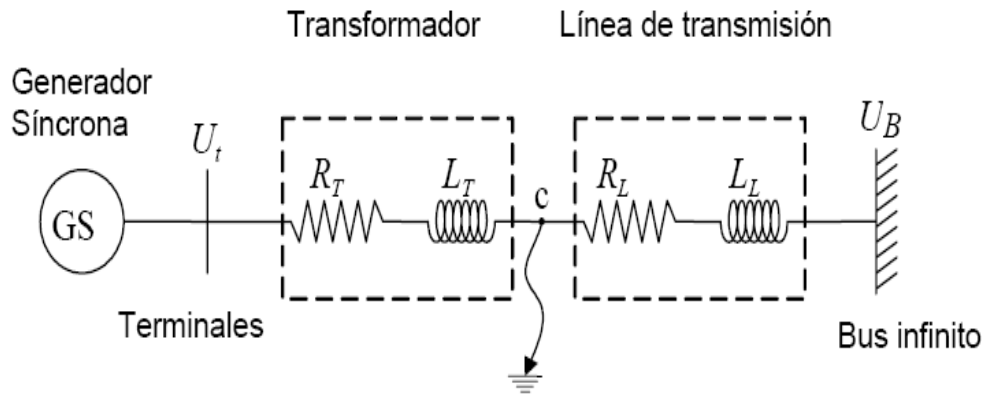


Fig. 1. Red eléctrica [4].

Se realizó un programa en MATLAB Simulink que describiera el comportamiento del generador síncrono conectado a través de un transformador y una línea de transmisión básica a un bus infinito a partir del modelo matemático planteado. Se simuló la falla trifásica de cortocircuito sin control y se observó que el generador vuelve al estado estable por sí solo. Esto se debe a que la duración de la falla permite que los devanados de amortiguamiento del rotor, así como la inercia del sistema mecánico y la inercia eléctrica del bus infinito ayuden a mantener el sincronismo ante cambios bruscos de corriente en los devanados del estator del generador síncrono.

Se entiende que el generador estaba operando de manera normal antes de ocurrida la falla de cortocircuito trifásica. Durante la falla se tienen las siguientes condiciones:

$$u_{dB} = 0$$

$$u_{qB} = 0$$

$$r_q = r_a = r_a + R_T$$

$$L_{dd} = L_{dd} - L_L$$

$$L_{qq} = L_{qq} - L_L$$

Una vez liberada la falla (etapa de postfalla) los valores modificados regresan a los originales (ver Tabla 1) y los voltajes en el eje d y eje q están dados por la ecuación (15) y (16).

$r_a = 0.0015$	Resistencia del devanado de fase
$r_f = 0.0011807$	Resistencia del devanado de campo
$r_{1d} = 0.0028752$	Resistencia del devanado de amortiguamiento en d
$r_{1q} = 0.005393$	Resistencia del devanado de amortiguamiento en q
$L_a = 0.000398523$	Inductancia en la fase a
$L_d = 0.005358734$	Inductancia en el eje d
$L_{dd} = 0.00682$	Inductancia en el eje d modificada
$L_q = 0.004716704$	Inductancia en el eje q
$L_{qq} = 0.00618$	Inductancia en el eje q modificada
$L_{fd} = 0.000047034$	Inductancia en el devanado de campo
$L_{1dn} = 0.0002362$	Inductancia en el devanado amortiguador 1d
$L_{1qn} = 0.000670$	Inductancia en el devanado amortiguador 1q
$L_{dn} = -0.0000062986$	Inductancia de dispersión en el eje d
$L_{md} = 0.004960211$	Inductancia de dispersión en el eje d
$L_{mq} = 0.004318181$	Inductancia de dispersión en el eje q
$H = 3.64$	Constante de inercia de la máquina
$R_T = 0.00448$	Resistencia del transformador
$L_T = 0.0005602$	Inductancia del transformador
$R_L = 0.02179$	Resistencia de la línea
$L_L = 0.00090985$	Inductancia de la línea
$P_0 = 0.7407$	Potencia activa en el generador
$Q_0 = -0.2347$	Potencia reactiva en el generador
$U_T = 1.0$	Tensión en las terminales del generador
$U_B = 1.15$	Tensión en el bus infinito
$\delta = -78.4^\circ$	Ángulo de carga
$K_{pc} = 20, K_{dc} = 10$	Constantes del control PD
$K_p = 20, K_i = 0.5, K_d = 5$	Constantes del control PID

Tabla 1. Parámetros del sistema eléctrico analizado en por unidad (p.u.) [7, 8, 9].

El Regulador de Tensión Automático (AVR por sus siglas en inglés) es un dispositivo que monitorea permanentemente el voltaje en el punto de regulación de voltaje del sistema e inicia automáticamente acciones correctivas para mantener el voltaje de terminales del generador. El AVR también controla que el generador síncrono opere dentro de límites previamente ajustados [10]. Primero se incluyó la configuración de un control PD [6, 9,

11] (ver Fig. 2), el cual es responsable de establecer el voltaje en terminales del generador síncrono variando el voltaje de campo cuando se le presenta la falla trifásica de cortocircuito durante 140 ms, manteniendo el par mecánico constante. Las constantes del control se determinaron considerando que los valores de corriente en el devanado de campo no excediera su límite y con valores típicos de este tipo de control.

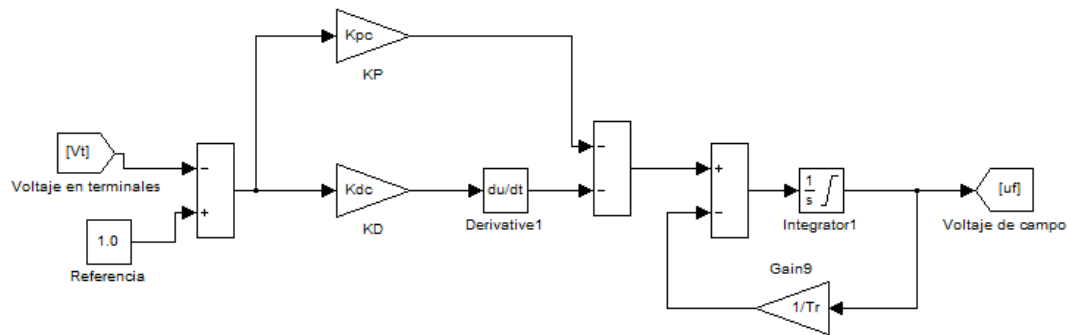


Fig. 2. AVR implementado un PD.

En segundo término se cambia la configuración del control PD por el PID (ver Fig. 3) [6, 9, 11] con el mismo objetivo de restablecer el voltaje en terminales y comparando resultados se obtuvo que control PID responde mejor y se llega a la estabilidad del sistema en un menor tiempo.

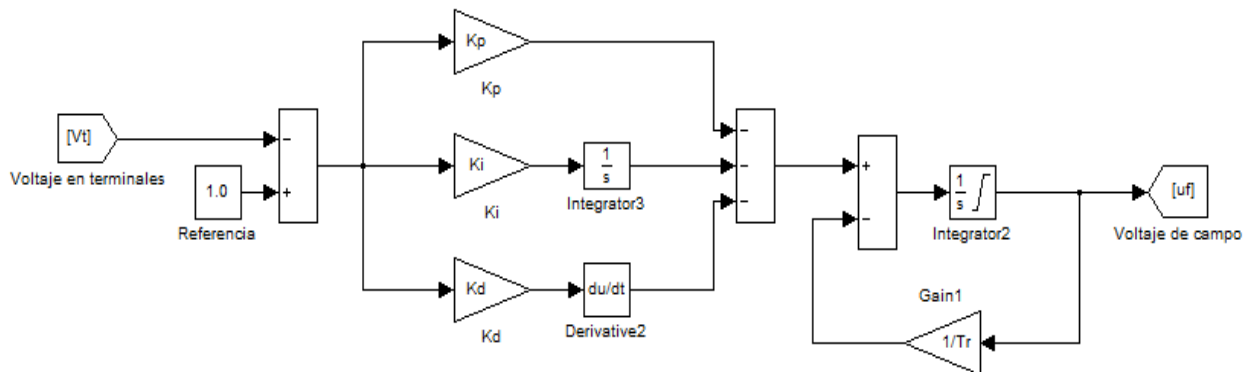


Fig. 3. AVR implementado un PID.

En las Fig. 4 a 7 se muestran los resultados obtenidos en las variables de interés comparadas con las mediciones hechas al mismo generador cuando opera con su regulador de voltaje estándar. En la Fig. 4 puede observarse que la estabilización del voltaje posterior al cortocircuito trifásico con el control PID tiene un menor tiempo de estabilización que con un control PD, pero que para lograrlo requiere valores de corriente de campo mayores.

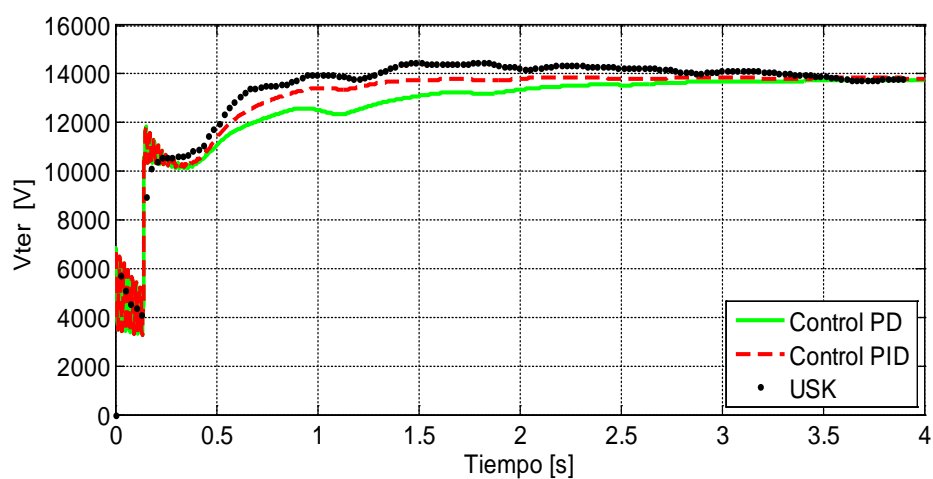


Fig. 4. Comportamiento del voltaje en terminales del generador síncrono (USK: mediciones).

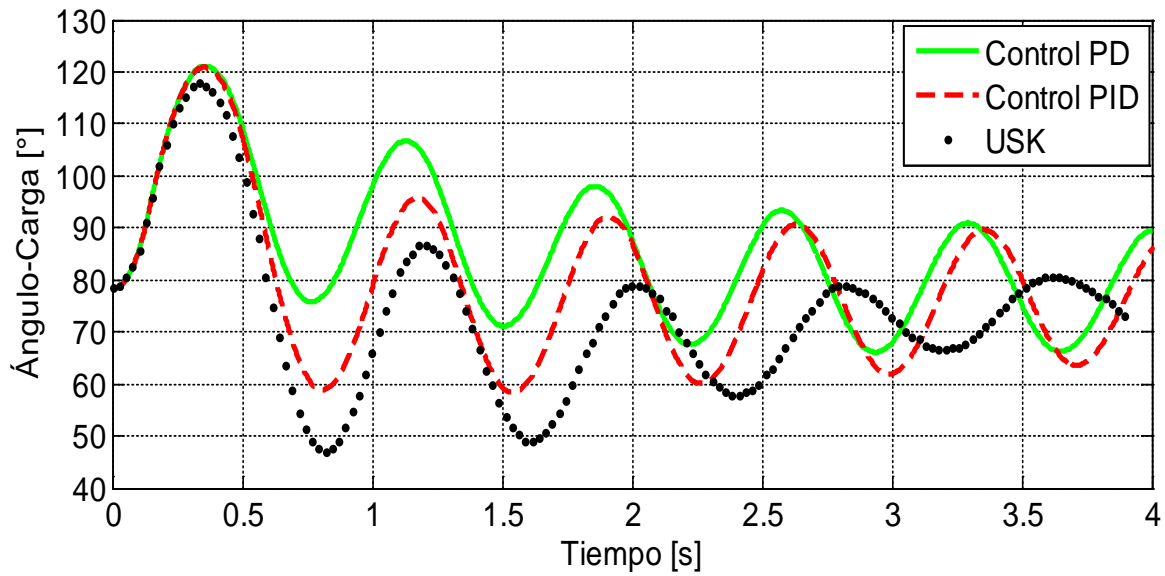


Fig. 5. Comportamiento del ángulo de carga (USK: mediciones).

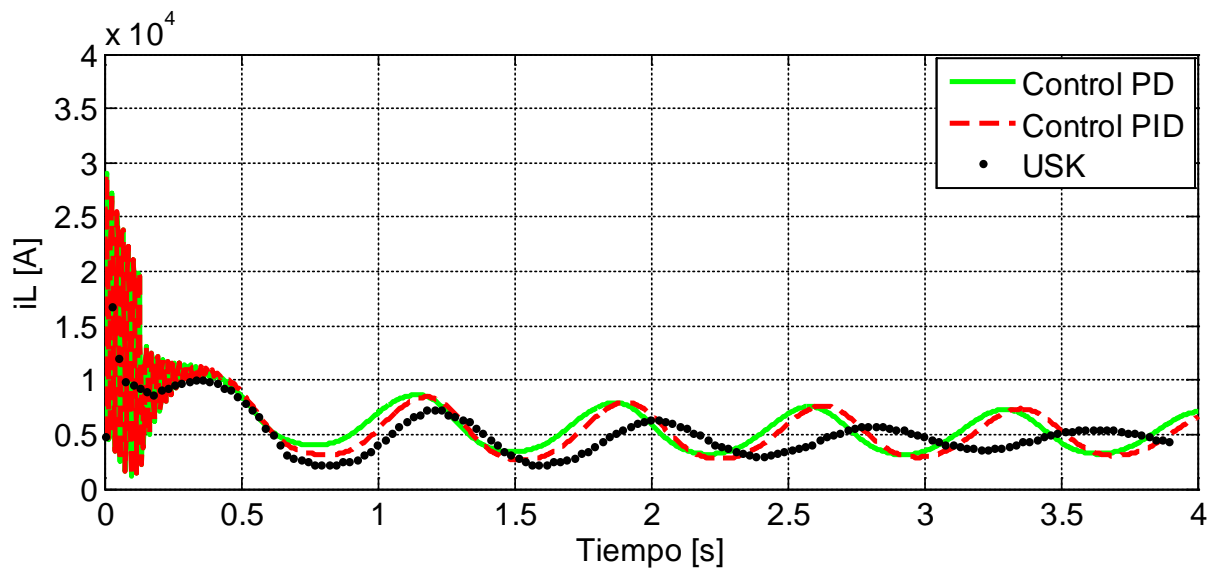


Fig. 6. Comportamiento de la corriente de línea (i_L) (USK: mediciones).

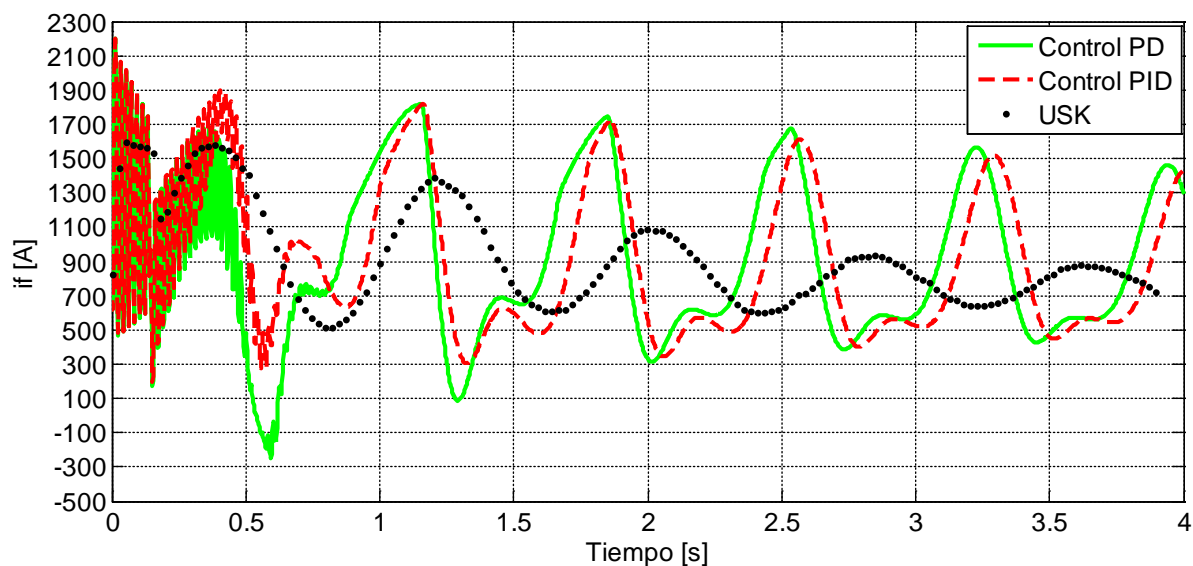


Fig. 7. Comportamiento de la corriente de campo (i_f) (USK: mediciones).

4. Conclusiones

El modelado y la simulación utilizando Simulink de Matlab para un generador síncrono conectado a un bus infinito a través de un transformador y de una línea de transmisión se logró de manera exitosa. El modelo de la máquina síncrona en el marco dq0 permitió observar con facilidad las variables que intervienen y facilitó el proceso de simulación y análisis al lograr que las inductancias dejen de depender de la posición del rotor.

El modelado y simulación se logró para un sistema no lineal ya que existen voltajes rotacionales que dependen de la velocidad del rotor. En los resultados se puede ver que el control PID ofrece la posibilidad de que la estabilidad de voltaje se logre en un tiempo razonablemente corto, pero para lograrlo la excitación del campo tiende a ser de magnitudes elevadas, en comparación con el control PD. Este tipo de control lineal ya sea el PD o PID tiene una buena influencia en el restablecimiento de la tensión en terminales del generador síncrono, mientras que en la variable mecánica sólo se presenta un impacto importante en las primeras oscilaciones.

5. Referencias

- [1] Mohd. Abdus Salam. Fundamentals of electrical machines. Primera edición. 2005. Alpha Science International Ltd. p. 255-256.
- [2] IEEE/CIGRE. Definition and Classification of Power System Stability, Transactions on Power Systems, vol.19. 2004. p.15.
- [3] C.b.Gray. Máquinas Eléctricas y sistemas accionadores. 1993. Alfaomega. p. 325-326.
- [4] Anderson, P.M and A.A Fouad, Power System Control and Stability. 2003. John Wiley & Sons Inc, New York. 2003. p. 83-127.
- [5] Kundur, P., Power systems stability and control. 1994. New York: McGraw Hill. p. 54-69.
- [6] Adkins, B.; Harley, R.G., The General Theory of Alternating Current Machines, 1975, London, Chapman and Hall. p. 124-197.
- [7] Eduardo Campero Littlewood; Rafael Escarela Pérez; Irvin López García; Juan Carlos Olivares Galván. Condiciones iniciales para el análisis transitorio de un generador modelado en dos ejes y acoplado a un bus infinito. Memorias RVP-AI/2007 (IEEE Sección México), del 8 al 14 de julio del 2007. p 1-4.
- [8] Eduardo Campero Littlewood; Irvin López García; Rafael Escarela Pérez; Josué Enríquez Zarate. Dos Enfoques en la Formulación de Modelos de Espacio Estado para Analizar el Comportamiento de un Generador Síncrono. Memorias RVP-AI/2006 (IEEE Sección México), del 9 al 15 de julio de 2006. p. 1-6.
- [9] E. Campero-Littlewood; G. Espinosa Pérez; R. Escarela Pérez. Transient Analysis of Synchronous Generator Using a High-Order State Space Representation. Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA'06). p. 1-6
- [10] Manual de usuario. Generador síncrono AMG Serie de aplicación industrial. ABB. Revisión 03/2010.
- [11] Ricardo Hernández Gaviño. Introducción a los sistemas de control. Primera edición. 2010 PEARSON. p. 361-371.

6. Autores

Héctor Ascención Mestiza estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Eduardo Campero Littlewood (México D. F., 1947). En 1969 obtuvo el grado de Ingeniero Mecánico Electricista de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Trabajó en la industria hasta 1975, año en que inició sus estudios de maestría en el Imperial College de la Universidad de Londres. En 1977 ingresó como profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana, donde es profesor Titular "C" desde 1991. Sus principales áreas de interés en investigación son máquinas eléctricas y uso eficiente de energía eléctrica.

Felipe de Jesús González Montañez (México D.F., 1985) En 2011 obtuvo su título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Mecatrónica en el CINVESTAV unidad zacatenco. Actualmente es profesor investigador del Área de Ingeniería Energética y Electromagnética en el Departamento de Energía de la UAM-A.