

Análisis Dinámico del Generador de Inducción Auto-excitado

Torres M. Emmanuel, Chan-Puc Freddy, Ramírez A. Juan

Dynamic analysis of self-excited induction generator

Abstract— This article is focused on the analysis of the dynamic behavior of the self-excited induction generator (SEIG). Due to the high fossil fuel costs, the environmental problems generated by an irrational use and the fact that a great part of the world-wide population lives far from the network of provision of electric power, the technology is being oriented to the development of the renewable sources of energy like wind, micro fuel cells and/the mini-hydraulic. The induction generator is always associated with alternative sources of energy. The SEIG it is the best option for generation of energy in remote or isolated zones, nevertheless, is necessary to know its dynamic characteristics for this configuration. This article presents an analysis of the operation of the SEIG in no-load case and on-load case. It's presented the model for both conditions of operation and a criterion to determine the enough and necessary conditions to operate a SEIG with renewable sources applications.

Keywords: Self-Excited Induction Generator, magnetic saturation.

Resumen — Este artículo está enfocado al análisis del comportamiento dinámico del generador de inducción auto-excitado (GIAE). Debido a los altos costos de los combustibles fósiles, los problemas ambientales generados por un uso irracional y al hecho que una gran parte de la población mundial vive lejos de la red de suministro de potencia eléctrica, la tecnología se está orientando al desarrollo de las fuentes renovables de energía como la solar, eólica, celdas de combustibles y la micro/mini-hidráulica. El generador de inducción se encuentra siempre asociado con fuentes alternativas de energía. Para generación de energía en zonas remotas o aisladas el GIAE es la mejor opción, sin embargo, es necesario conocer sus características dinámicas bajo esta configuración. Este artículo presenta un análisis de la operación del GIAE en vacío y bajo carga. Se presenta el modelo para ambas condiciones de operación y un criterio para determinar las condiciones necesarias y suficientes para operar una GIAE con aplicaciones de fuentes renovables.

Palabras Clave – Generador de inducción auto-excitado, saturación magnética.

Manuscrito recibido el 13 de octubre del 2010. Este trabajo fue financiado por la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo.

M.C. Emmanuel Torres hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor Investigador del Departamento de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo., México. Teléfono (983) 83 50300 Ext.192 Fax (983) 83 50389 E-mail: etorres@uqroo.mx

Dr. Freddy Chan hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor Investigador del Departamento de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo., México. E-mail: freddy@uqroo.mx

Dr. Juan M. Ramírez hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor Investigador CINVESTAV-GDL, Guadalajara, Jalisco, México.

I. INTRODUCCIÓN

El impacto de la contaminación del ambiente en el calentamiento global y los cambios climáticos resultantes pueden tener consecuencias desastrosas a largo plazo. El desarrollo tecnológico para la generación de energía eléctrica se está orientando hacia las fuentes seguras y renovables como la eólica, fotovoltaica, las celdas de combustible así como a la explotación de los recursos mini y micro hidráulicos disponibles en las poblaciones aisladas o remotas que no tienen acceso al servicio de energía eléctrica [1], [2]. Una máquina de inducción trifásica puede operar como generador de inducción auto-excitado (GIAE), [3]. Si se conecta un banco de capacitores con un valor apropiado a las terminales de la máquina mientras el rotor es impulsado por un primo motor a una velocidad apropiada, se establecerá un voltaje cuyo valor estará determinado por la saturación magnética [4-6]. En aplicaciones de energía renovable de baja y mediana potencia (hasta 100 kW), el generador de inducción auto-excitado ofrece muchas ventajas debido a su robustez, bajo costo, ausencia de escobillas (rotor jaula de ardilla), construcción sencilla, mantenimiento mínimo, mayor estabilidad, auto protección en condiciones de falla y libre de problemas de operación por mucho años [1], [4-7]. Sin embargo, la demanda de potencia reactiva y una pobre regulación de voltaje y frecuencia cuando la velocidad ó la carga varían son las principales desventajas del GIAE. Diferentes controladores de voltaje y frecuencia se han reportado en la literatura [8-11].

II. METODOLOGÍA

Como parte inicial se presenta el modelo del generador en coordenadas dq , posteriormente se describe el proceso de auto-excitación y se realiza un análisis de las condiciones necesarias y suficientes para que la auto-excitación sea exitosa y se describe la importancia de incluir la saturación magnética en el modelo del generador. Finalmente se presenta el comportamiento del generador de inducción en vacío y con carga.

A. Modelo del Generador de Inducción Auto-Excitado

El modelo del GIAE es similar al modelo tradicional de la máquina de inducción; la diferencia radica en el capacitor conectado en las terminales del estator el cual tiene la función de proporcionar a la máquina la potencia reactiva para establecer el campo magnético en el entrehierro. La Fig. 1 muestra el circuito equivalente del generador de inducción en coordenadas dq . Las ecuaciones de este circuito proporcionan la respuesta transitoria y de estado estable del proceso de auto-excitación [6].

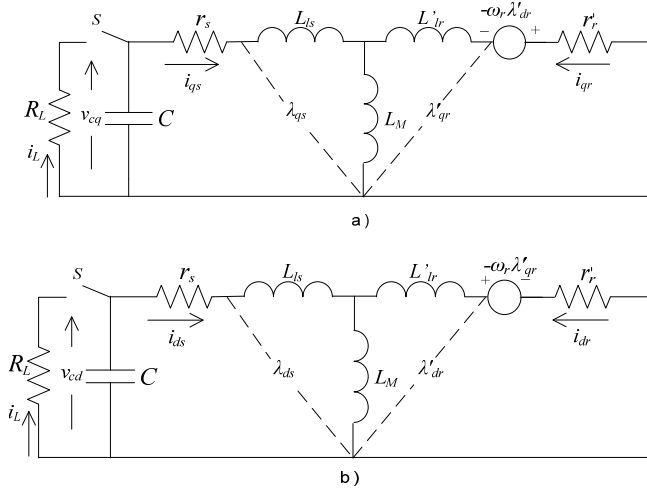


Fig. 1 Circuito equivalente del GIAE (a) eje q (b) eje d.

Planteando la ecuaciones de voltaje de Kirchoff del circuito equivalente mostrado en la Fig. 1, el comportamiento transitorio y de estado estable del GIAE está descrito por [6]:

$$\begin{bmatrix} r_s + pL_s & 0 & pL_M & 0 \\ 0 & r_s + pL_s & 0 & pL_M \\ pL_M & -\omega_r L_M & r_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_M & pL_M & \omega_r L_r & r_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{cq} \\ -V_{cd} \\ -K_q \\ -K_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $L_s = L_{ls} + L_M$, $L_r = L_{lr} + L_M$, p es el operador $\frac{d}{dt}$,

ω_r es la velocidad eléctrica del rotor y K_q y K_d son constantes que representan los voltajes inducidos iniciales a lo largo de los ejes q y d , respectivamente, debido al flujo remanente en el núcleo, V_{cq} y V_{cd} son los voltajes en los capacitores.

Los voltajes en los capacitores se calculan por medio:

$$V_{cq} = \frac{1}{C} \int i_{qs} dt + V_{cq} |_{t=0} \quad (2)$$

$$V_{cd} = \frac{1}{C} \int i_{ds} dt + V_{cd} |_{t=0} \quad (3)$$

donde C es el valor seleccionado del capacitor.

Los parámetros del circuito equivalente del modelo de la máquina de inducción se obtienen de la prueba de corriente directa, la prueba de vacío y la prueba de rotor bloqueado. La máquina de inducción usada como GIAE en esta investigación es un motor trifásico tipo jaula de ardilla con las siguientes especificaciones: 2 kW, 120/208 V, 15.2/8.8 A, 60 Hz, 4 polos y conexión estrella. Los parámetros obtenidos de las pruebas son: $r_s = 0.6\Omega$, $r_r = 1.06\Omega$, $L_{ls}=L_{lr} = 6.4mH$, $L_M = 51.3mH$.

B. Análisis del proceso de auto-excitación

Una máquina de inducción trifásica puede funcionar como un generador auto-excitado, cuando un primo motor hace girar su rotor a una velocidad apropiada, y la excitación necesaria para establecer el campo magnético giratorio en el entrehierro es suministrada conectando a las terminales del estator un banco trifásico de capacitores [2-3].

El fenómeno de auto-excitación de la máquina de inducción puede o no ocurrir. Es decir, que incluso conectando capacitores a las terminales del estator de la máquina y haciendo girar el rotor, puede o no aparecer voltaje en las terminales del generador. Cuatro son los factores que determinan el proceso de auto-excitación.

- 1) Los parámetros de la máquina.
- 2) La Inductancia de Magnetización.
- 3) Velocidad del primo motor.
- 4) Banco de capacitores.

1.- *Parámetros de la máquina.* Estos se encuentran determinados por el tipo de material de los devanados del estator, tipo de rotor (devanado, tipo jaula, doble jaula, de barras profundas), clase de diseño (NEMA, IEC), etc.

2.- *Inductancia de magnetización.* Es el factor principal en el establecimiento, incremento y la estabilización del voltaje en terminales en condiciones de vacío y con carga, y está determinada por el grado de saturación del material magnético.

3.- *Velocidad del primo motor.* Cuando el generador de inducción trabaja en vacío, existe una velocidad mínima para que el proceso de auto-excitación sea exitoso. Mientras que en condiciones con carga existen una velocidad mínima y una velocidad máxima. Por lo tanto, es necesario determinar en el caso general, la velocidad mínima necesaria para que el fenómeno de auto-excitación ocurra.

4.- *Banco de capacitores.* Junto con la velocidad del primo motor, el tamaño del banco de capacitores (valor en faradios), es uno de los factores que pueden ser manejados para obtener el voltaje requerido en condiciones de vacío y con carga. Sin embargo, con una velocidad seleccionada, existe también un valor mínimo de los capacitores para que se establezca un voltaje en las terminales del generador.

Para realizar un análisis detallado del proceso de auto-excitación, las ecuaciones (1-3) se transforman al dominio de Laplace, con lo que se obtiene, [11]:

$$\begin{bmatrix} r_s + sL_s + \frac{1}{sC} & 0 & sL_M & 0 \\ 0 & r_s + sL_s + \frac{1}{sC} & 0 & sL_M \\ sL_M & -\omega_r L_M & r_r + sL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_M & sL_M & \omega_r L_r & r_r + sL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{cq}(0) \\ -V_{cd}(0) \\ -K_q \\ -K_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

Las corrientes de auto-excitación se obtienen haciendo $I = Z^{-1}V_0$. Donde I es el vector de corrientes, Z^{-1} es la matriz inversa y V_0 es el vector de condiciones iniciales. El comportamiento transitorio y de estado estable de la máquina puede determinarse con cualquiera de las dos corrientes del

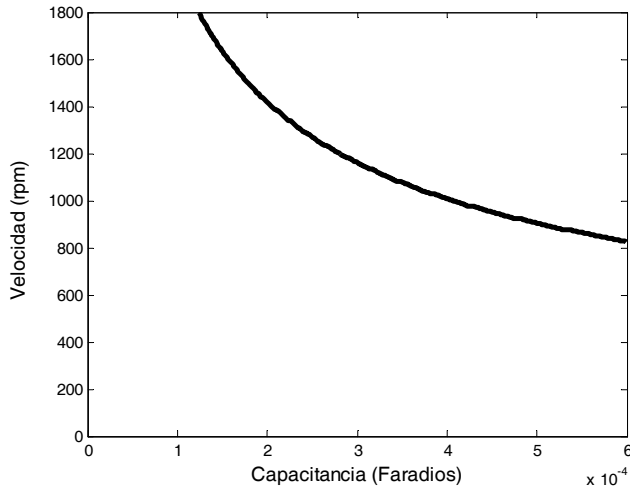


Fig. 2 Característica capacitancia - velocidad para el GIAE en vacío.

estator, en esta investigación se trabajo con la corriente de cuadratura i_{qs} . Despejando de (4) la corriente i_{qs} se obtiene [11]:

$$i_{qs} = \frac{U}{As^6 + Bs^5 + Ds^4 + Es^3 + Fs^2 + Gs + H} \quad (5)$$

donde s es el operador de Laplace y U representa todos lo términos del numerador y depende de las condiciones iniciales en los capacitores y de los parámetros de la máquina, sin embargo solamente tiene efecto en los coeficientes de las fracciones parciales de (5) y no afecta el comportamiento de las corrientes [6]. A, B, D, E, F, G, H y U se definen en el Apéndice. Igualando a cero el denominador de (5) se obtiene el polinomio característico de la corriente i_{qs} esto es:

$$As^6 + Bs^5 + Ds^4 + Es^3 + Fs^2 + Gs + H = 0 \quad (6)$$

El éxito del proceso de auto-excitación depende de la ubicación de las raíces del polinomio característico. Si al menos una de las seis raíces de (6) se encuentra en el lado derecho del semiplano complejo (raíz con parte real positiva), entonces la respuesta transitoria crecerá con el tiempo y un voltaje comenzará a establecerse en las terminales del generador. Este voltaje continuará incrementándose hasta alcanzar un valor determinado por la saturación magnética.

Los valores mínimos de capacitancia y velocidad para la auto-excitación pueden obtenerse calculando las raíces de (6) que tengan parte real positiva y almacenando los valores de capacitancia y velocidad que originaron al menos una raíz con parte real positiva. Usando esta técnica, los puntos calculados para la auto-excitación en vacío de la máquina de inducción empleada en esta investigación se muestran en la Fig.2.

La Fig. 2 permite determinar los valores apropiados para que el proceso de auto-excitación sea exitoso, por ejemplo para un banco de capacitores de 200 μ F se requiere de una velocidad mínima de 1400 rpm. Este método es simple ya que solo se requiere de un algoritmo que incremente los valores de C y ω_r ,

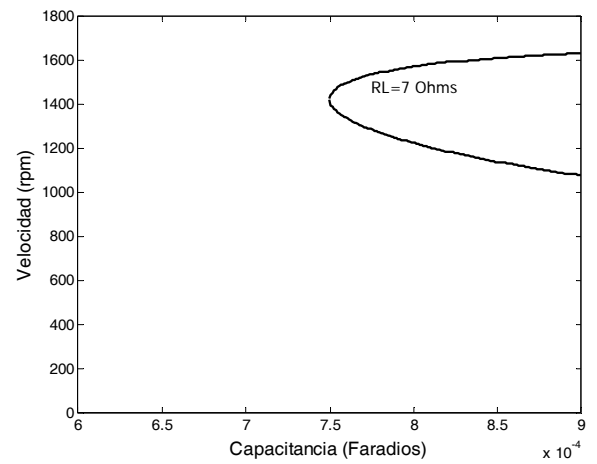


Fig. 3 Característica capacitancia-velocidad para el GIAE con carga.

calcule las raíces de (6) y almacene los valores de C y ω_r con los cuales se obtuvo al menos una raíz con parte real positiva.

C. Generador de Inducción auto-excitado con carga

Cuando una carga eléctrica se conecta a las terminales del GIAE, el generador entregará potencia activa. Sin embargo, el voltaje y la frecuencia generados varían junto con la carga. El modelo con carga del GIAE está dado por:

$$\begin{bmatrix} r_s + sL_s + \frac{R_L}{R_L + R_L s C} & 0 & sL_M & 0 \\ 0 & r_s + sL_s + \frac{R_L}{R_L + R_L s C} & 0 & sL_M \\ sL_M & -\omega_r L_M & r_r + sL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_M & sL_M & \omega_r L_r & r_r + sL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{cq}(0) \\ -V_{cd}(0) \\ -K_q \\ -K_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

Resolviendo (7) de forma similar a (4), se obtiene la corriente de auto-excitación en el estator en el eje q . el polinomio característico de i_{qs} está dado por:

$$A_2 s^6 + B_2 s^5 + D_2 s^4 + E_2 s^3 + F_2 s^2 + G_2 s + H_2 = 0 \quad (8)$$

Calculando las raíces de (8) que tengan partes reales positivas es posible determinar la curva capacitancia-velocidad para el caso con carga. Empleando esta técnica se calcula para la máquina empleada en esta investigación la curva con carga para $R_L=7 \Omega$ de, esto se ilustra en la Fig.3

Se observa de la Fig. 3 que para el caso con carga, existe no solamente una velocidad mínima para la auto-excitación, sino que también existe una velocidad máxima. Para el caso con $R_L=7 \Omega$, el rango de velocidad se encuentra entre 1220 y 1570 rpm, aproximadamente. Cuanto mayor sea la potencia demandada por la carga (es decir R_L se aproxime a cero), esta curva será más cerrada. Si R_L es grande la curva se aproxima más al caso en vacío. Empleando esta característica es posible determinar si el generador seleccionado es apropiado para aplicaciones eólicas, es donde los generadores eólicos operan dentro de un rango de velocidad determinado.

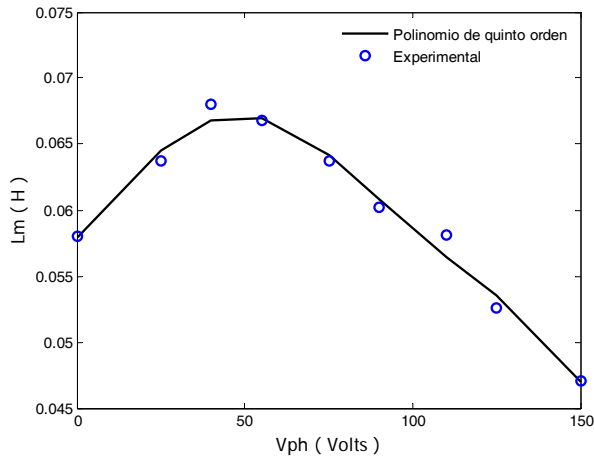


Fig. 4 Variación de la inductancia de magnetización respecto al voltaje de fase.

D. Saturación magnética

Cuando la máquina de inducción funciona como generador auto-excitado, la variación de la inductancia de magnetización L_M es el factor principal en la dinámica del voltaje y su estabilización. La saturación magnética es la responsable de que el voltaje generado en terminales, alcance un valor de estado estacionario. Existen diversas formas de incluir la saturación magnética en el modelo de la máquina de inducción, como se reporta en [12-14] algunas más complicadas que otras. En el presente trabajo la saturación magnética se incluye en el modelo del generador como en [6], por medio de un polinomio el cual representa la variación de la inductancia de magnetización respecto al voltaje de fase. Para determinar el polinomio se hace girar la máquina de inducción a velocidad síncrona por medio de un primo motor y se aplica un voltaje al estator que varía de 0 a 120% del su valor nominal. Para cada valor de voltaje se mide el valor de la corriente. Con estos datos se calcula la inductancia de magnetización y se grafican los puntos obtenidos los cuales se ajustan con un polinomio de 5° orden para incluir la saturación magnética en el modelo del generador. Esto se muestra en la Fig. 4.

El polinomio de quinto orden está dado por (9):

$$L_m = -4.3205 \cdot 10^{-12} V_{ph}^5 + 1.6065 \cdot 10^{-9} V_{ph}^4 - 1.9225 \cdot 10^{-7} V_{ph}^3 + 5.2616 \cdot 10^{-6} V_{ph}^2 + 2.2883 \cdot 10^{-4} V_{ph} + 0.0579 \quad (9)$$

III. RESULTADOS

A. Operación del GIAE en vacío

Para la simulación del comportamiento del GIAE se empleó el software MATLAB-SIMULINK y se programó el modelo del GIAE. El proceso de auto-excitación en vacío con una velocidad de 1500 rpm y una capacitancia de 165 μ F se muestra en la Fig. 5. El voltaje generado se establece en un valor de 120 V debido a la saturación magnética. La frecuencia del voltaje es de 50 Hz.

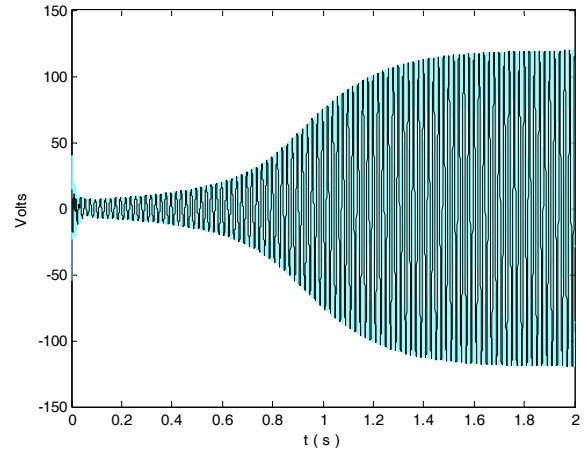


Fig. 5 Voltaje generado en el proceso de auto excitación con una velocidad mecánica de 1500 rpm y un banco trifásico de capacitores de 165 μ F.

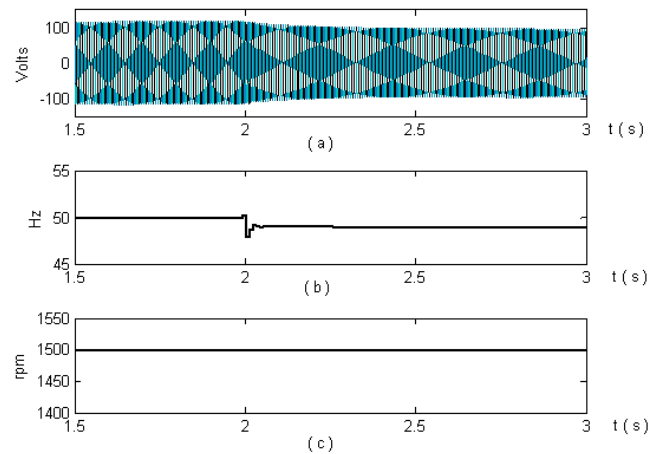


Fig. 6 Efecto de la conexión de una carga después de que el voltaje alcanza su valor de estado estacionario. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

B. Operación del GIAE con carga

Cuando una carga se conecta al generador la magnitud del voltaje y la frecuencia disminuyen. Esto se ilustra en la Fig. 6 cuando en el instante de conexión de una carga ($t = 2$ s) puede observarse que la magnitud del voltaje cae por debajo de 100 V y la frecuencia por debajo de 50 Hz.

Si en el instante de conexión de la carga ($t = 2$ s) la velocidad del primo motor también disminuye la magnitud del voltaje y la frecuencia se reducen en una proporción mayor que en el caso anterior cuando la velocidad del primo motor permanecía constante, esta situación se muestra en la Fig. 7.

La magnitud del voltaje depende directamente de la capacitancia y de la velocidad del primo motor. Esto significa que un incremento en cualquiera de estos dos parámetros ocasionaría un aumento en la magnitud del voltaje. La Fig. 8 muestra un incremento ($t = 2.5$ s) en el valor de la capacitancia lo que se traduce en aumento en la magnitud del voltaje más no en la frecuencia

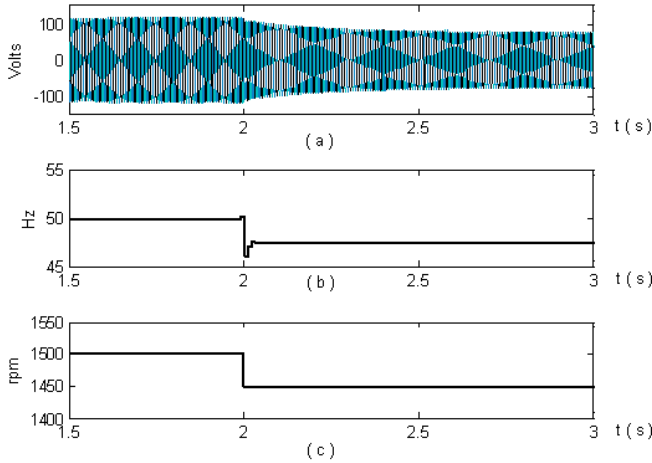


Fig. 7 Efecto de la disminución de la velocidad del primo motor cuando se conecta una carga. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

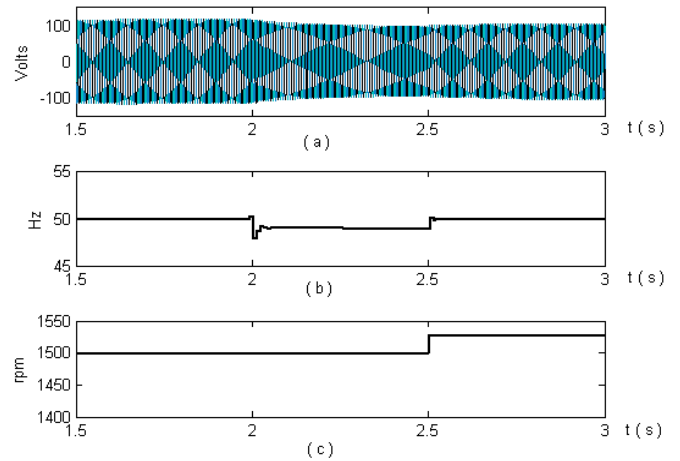


Fig. 9 Incremento de la velocidad del primo motor, después de la conexión de carga. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

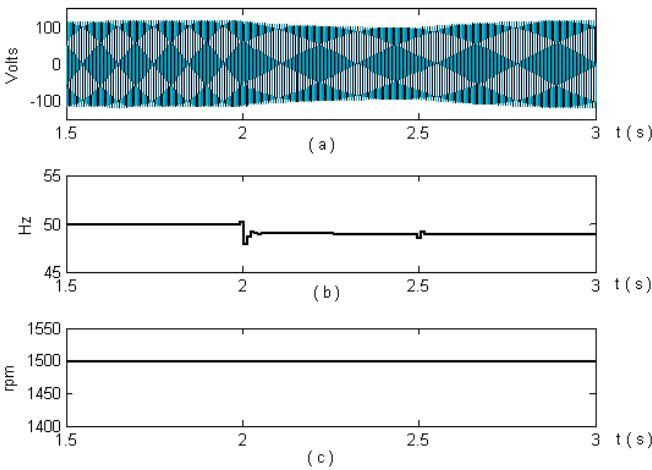


Fig. 8 Incremento del valor de la capacitancia después de la conexión de carga. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

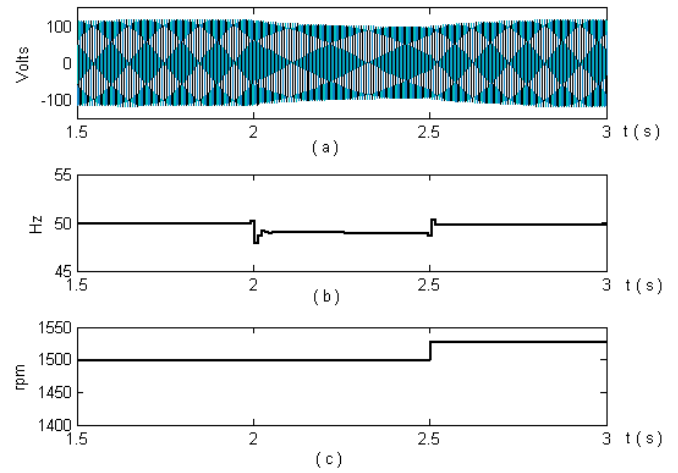


Fig. 10 Incremento de la capacitancia y de la velocidad del primo motor después de la conexión de carga. (a) Voltaje (b) Frecuencia (c) Velocidad del primo motor.

La frecuencia depende básicamente de la velocidad del primo motor y un incremento en la capacitancia ocasiona un cambio muy ligero en la frecuencia. La Fig. 9 ilustra esta situación. En $t=2.5$ s se incrementa la velocidad del primo motor lo que ocasiona un incremento en la magnitud de la frecuencia y el voltaje.

Para mantener tanto el voltaje como la frecuencia en los valores deseados (120 V y 50 Hz), es necesario un incremento tanto de la capacitancia como de la velocidad del primo motor, como se observa en la Fig. 10. En el instante $t=2.5$ s, se incrementan tanto la velocidad del primo motor como la capacitancia, lo que produce que la magnitud del voltaje y la frecuencia se mantengan en los valores deseados. La Fig. 11 muestra la corriente generada $i_g(a)$, la corriente de carga $i_L(b)$ y la potencia entregada a la carga $P_{out}(c)$.

En el instante de conexión de la carga ($t=2$ s) la potencia de salida disminuye por debajo del valor esperado debido al decremento en la magnitud del voltaje. Sin embargo, debido al aumento en el valor de la capacitancia y de la velocidad del

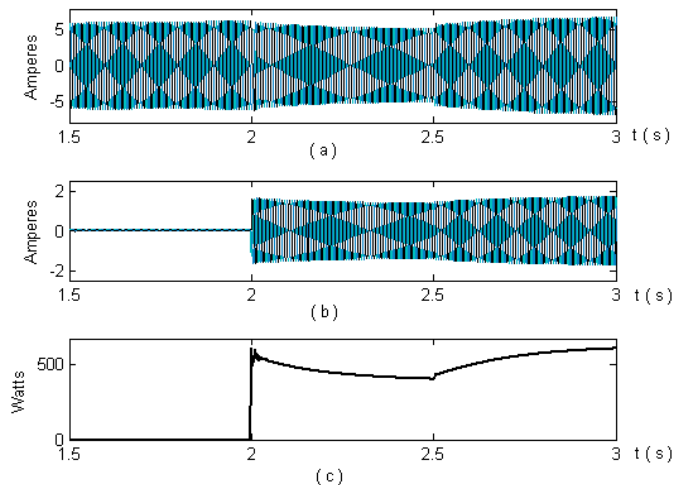


Fig. 11 Incremento de la capacitancia y de la velocidad del primo motor después de la conexión de carga. (a) Corriente generada (b) Corriente de carga (c) Potencia de salida.

primo motor en ($t = 2.5$ s) la potencia de salida se restablece en el valor esperado.

Cabe mencionar que la velocidad del primo motor se estableció en 1500 rpm porque genera en una máquina de 4 polos voltaje con una frecuencia de 50 Hz. Debido a que estas pruebas se realizarán en laboratorio y que la velocidad nominal de la máquina es de 1765 rpm, se cuenta con un margen de 300 rpm para incrementar la velocidad de la máquina hasta alcanzar las condiciones deseadas de voltaje y frecuencia.

Debido a la alta dependencia del voltaje con la carga es necesario operar el GIAE con controladores que permitan tener un voltaje constante sin importar la variación de la carga.

Para sistemas de potencia mecánica constante como los mini/micro-hidráulicos se han diseñado *Controladores Electrónicos de Carga* como se reporta en [8]-[11,12], banco de capacitores conmutados [10]. Para sistemas con potencia mecánica variable se han publicado [6,9].

Por último si se desea emplear un GIAE en aplicaciones eólicas se debe determinar el rango de velocidad en el cual se operará así como la carga por alimentar, de esta forma se selecciona los valores mínimos y máximos de capacitancia y velocidad y se determinan las variaciones de voltaje y frecuencia que se presentarán. Adicionalmente se puede diseñar un controlador de voltaje y frecuencia.

IV. CONCLUSIONES

Se propuso una forma sencilla para determinar los valores apropiados de capacitancia y velocidad para que la máquina de inducción opere como GIAE, esto simplemente calculando para que valores de capacitancia y de velocidad del primo motor las raíces del polinomio característico de alguna de las corrientes del estator tienen parte real positiva y con cada par de valores de velocidad y capacitancia se obtienen las curvas en vacío o con carga que permiten determinar el rango de velocidad en el cual el GIAE puede operar. La saturación magnética se incluye en el modelo del generador de una forma sencilla empleando un polinomio que se ajusta a los datos obtenidos de la prueba realizada en el laboratorio, esto da como resultado un polinomio que simula la variación no lineal de la inductancia de magnetización L_m respecto al voltaje generado. Se programó el modelo del GIAE empleando Matlab-Simulink y se presentó un análisis de las características dinámicas del generador en vacío y con carga con lo cual es posible determinar si una máquina de inducción puede ser empleada como GIAE para aplicaciones renovables como la eólica o la mini/micro-hidráulica. Se determinó que existe una fuerte dependencia del voltaje y frecuencia respecto a la carga conectada, sin embargo, un incremento de capacitancia o velocidad del primo motor o una combinación de ambas pueden lograr mantener voltaje y frecuencia constantes en las terminales del generador, lo que lo hace una opción viable para generación de energía eléctrica en poblaciones alejadas de la red eléctrica.

APÉNDICE

$$A = (L_r L_s - L_M^2)^2 C^2$$

$$B = 2(L_r L_s - L_M^2)(r_s L_r + r_r L_s) C^2$$

$$D = \left(\begin{aligned} & ((r_s^2 + \omega_r^2 L_s^2) L_r^2 + (-2\omega_r^2 L_s L_M^2 + 4r_r r_s L_s) L_r \\ & + \omega_r^2 L_M^4 + r_r^2 L_s^2 - 2r_r r_s L_M^2) C + 2L_r^2 L_s - 2L_r L_M^2 \end{aligned} \right) C$$

$$E = 2 \left(\begin{aligned} & (\omega_r^2 L_r L_s + (r_s r_r - \omega_r^2 L_M^2) L_r + L_s r_r^2) r_s C \\ & + r_s L_r^2 + 2L_r L_s r_r - r_r L_M^2 \end{aligned} \right) C$$

$$F = (r_s^2 (\omega_r^2 L_r^2 + r_r^2) C^2 + (2\omega_r^2 L_r L_s + (4r_s r_r - 2\omega_r^2 L_M^2) L_r + 2L_s r_r^2) C + L_r^2)$$

$$G = (2r_s (\omega_r^2 L_r^2 + r_r^2) C + 2r_r L_r)$$

$$H = \omega_r^2 L_r^2 + r_r^2$$

REFERENCIAS

- [1] M. Godoy Simoes, Felix a. Farret, "Renewable Energy Systems. Design and Analysis with Induction Generators". CRC PRESS, 2004.
- [2] R.C. Bansal, "Tree phase self excited induction generator: an overview", IEEE Trans. On Energy Conversion, vol 20, no.2, pp. 292-299, June 2005.
- [3] E.D. Basset and F.M. Potter, "Capacitive excitation of induction generators", Trans. of the Amer. Inst. Electr. Eng., Vol. 54, No. 5, pp. 540-545, May 1935.
- [4] S.S. Murthy, B.P. Singh, C. Nagamani, K.V.V. Satyanarayana, "Studie on the use of conventional Induction Motors as Self-Excited Induction Generators", IEEE Transactions on energy Conversion, Vol. 3, No. 4, December 1988.
- [5] L. Shridhar, B. Singh, C. S. Jha, B. P. Singh, SM and S.S. Murthy, "Selection of Capacitors for the Self Regulated Short and Shunt Self Excited Induction Generators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 1. March 1995.
- [6] D. Seyoum, C. Grantham and Muhammed F. Rahman, "The dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 4 July/August 2003.
- [7] S.P. Singh, B. Singh, M.P. Jain, "Performance Characteristics and Optimum Utilization of a Cage Machine as Capacitor Excited Induction Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, No. 4, December 1990.
- [8] B. Singh, S.S. Murthy, S. Gupta, "Analysis and implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, January 2004.O. Yanez, private communication, May 2002.
- [9] C. Grantham, F. Rahman, D. Seyoum, "A self-Excited Induction Generator with Voltage Regulation for use in a Remote Area Power Supply", Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. PIEMC 2000. The Third International. Vol. 2, 15-18 Aug. 2000 Page(s):710 – 715.
- [10] M. A. Al Saffar, E. C. Nho, T. A. Lipo, "Controlled shunt Capacitor Self-Excited Induction Generator", Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, Vol. 2, pages 1486-1490, 12-15 Oct. 1998.
- [11] Ramirez, J.M, Torres E. "An Electronic Load Controller for the Self-Excited Induction Generator", Cinvestav, Guadalajara; Transaction on Energy Conversion, IEEE, June 2007. Volume: 22, Issue: 2 On page(s): 546-548.
- [12] B. Singh, S.S. Murthy, S. Gupta, "Analysis and implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 1, January 2004.
- [13] L. Shridhar, Bhim Singh, C. S. Jha, B.P. Singh, SM and S.S. Murthy, "Selection of capacitors for the self regulated short shunt self excited induction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No.1, March 1995.
- [14] Décio Bispo, Luciano Martins Neto, José Tarcisio de Resende, and Darizon Alvez de Andrade. "A new strategy for Induction Machine Modeling Taking Into Account the Magnetic Saturation", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November/December 2001.



Torres M. Emmanuel nació el 2 de Septiembre de 1979 en Chetumal Quintana Roo, obtuvo el título de Ingeniero eléctrico por el Instituto Tecnológico de Chetumal, en la ciudad de Chetumal Quintana Roo, México en el 2002. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV Unidad GDL, en la ciudad de Guadalajara Jalisco en el 2006. Del 2002 al 2004 laboró en la Industria de la Construcción en el diseño y supervisión de instalaciones eléctricas en baja y media tensión. En el 2007 participó como profesor por honorarios en la Universidad de Quintana Roo. A partir del 2008 es profesor Investigador de la Universidad de Quintana Roo en la ciudad de Chetumal Quintana Roo, México. Sus líneas de investigación de interés son: análisis y control del generador de inducción auto-excitado, calidad de energía y ahorro de energía.



Chan P. Freddy nació el 5 de marzo de 1973 en Mérida Yucatán. Obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Mérida en 1991. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica y el Doctorado en ciencias en Ingeniería Electrónica en el *cenidet* de Cuernavaca en 1999 y 2008 respectivamente. Desde el 2000 funge como profesor investigador de la Universidad de Quintana Roo. Sus áreas de interés son la electrónica de potencia y la conversión de energía. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.



Ramírez A. Juan nació el 20 de Febrero de 1961 en Salamanca Guanajuato, obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico por la Universidad de Guanajuato en 1984. El grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica lo obtuvo por la Universidad Nacional Autónoma de México en 1987. Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1992. Ha sido Profesor-Investigador en la Universidad de Guanajuato, entre 1987-1995. En la Universidad de Guadalajara, entre 1995-1996 y en la Universidad Autónoma de Nuevo León, entre 1997-1998. Desde Febrero de 1999 a la fecha es Investigador del CINVESTAV Unidad Guadalajara en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México. Dr. Ramírez es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II Ramírez A. Sus áreas de interés son los dispositivos FACTS y el control de los Sistemas Eléctricos de Potencia.