

Análisis armónico de un aerogenerador y un STATCOM basado en una técnica mejorada para la obtención de la solución periódica

CONTRERAS-AGUILAR, Luis†*, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y JIMÉNEZ-BETANCOURT, Ramón.

Universidad de Colima, campus Coquimatlán, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Km 9 carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, C.P. 28400, Tel. 01 (312)316 11 65, Ext. 51451. luisc@ucol.mx.

Recibido Octubre 26 2016; Aceptado Noviembre 4, 2016

Resumen

Debido al cambio climático el interés sobre el uso de energías renovables se ha incrementado. Respecto a ello, los aerogeneradores son los que han cobrado mayor importancia debido a las grandes capacidades de recurso eólico y tecnologías disponibles para su aplicación. Por tal motivo, el interés sobre el modelado y las técnicas de análisis de estos dispositivos de generación de energía está en auge. De tal forma, que en este artículo se lleva a cabo un análisis de armónicos en un aerogenerador y un STATCOM, utilizando un procedimiento mejorado para la localización de soluciones periódicas de sistemas eléctricos. El proceso de la localización de soluciones periódicas está basado en la discretización del sistema de ecuaciones diferenciales con el mapa de Poincaré y un método tipo Newton es usado para obtener la solución periódica de forma rápida y eficiente. En adición, en esta propuesta se desarrolla una alternativa para mejorar el proceso de localización de soluciones periódicas, con el fin de impactar directamente en el rendimiento computacional requerido para determinar la solución.

Mapa de Poincaré, Método de Newton, Solución Periódica, Aerogenerador y STATCOM.

Abstract

Due to climate change the interest on the use of renewable resources has increased. In this regard, the wind turbines have become more important due to the large capacities of wind resources and technologies available for this application. Therefore, the interest on the modeling and analysis of these devices is growing. In this way, in this paper a harmonic analysis is carried out for a wind turbine and a STATCOM system by using an improved method for to compute periodic solutions of electric systems. The process for locating periodic solutions is based on a discretization of the ordinary differential equations with the Poincaré map and the efficient solution is carried out with the application of Newton's method. In addition, in this proposal a new alternative is developed for improve the process for locating periodic solutions in order to impact directly on the computational effort required to determine the solution.

Poincaré map, Newton Method, Periodic Solution, wind power and STATCOM.

Citación: CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y JIMÉNEZ-BETANCOURT, Ramón. Análisis armónico de un aerogenerador y un STATCOM basado en una técnica mejorada para la obtención de la solución periódica. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 34-47

*Correspondencia al Autor:(Correo Electrónico: luisc@ucol.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Debido al gran crecimiento en la demanda de energía eléctrica a nivel mundial durante las últimas décadas, fue necesario construir un número considerable de plantas generadoras de electricidad, que en su mayoría se basan en la quema de combustibles fósiles. Este hecho ha contribuido directamente sobre el cambio climático, debido a las emisiones de CO₂ y de gases de efecto invernadero que se producen en tal proceso. Por tal motivo, en muchos países los apoyos gubernamentales para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan generar energía eléctrica con menor impacto sobre el medio ambiente se ha incrementado.

Actualmente las tecnologías de energías renovables tienen más presencia en los sistemas eléctricos de potencia de todo el mundo. En este contexto, la generación de energía eólica es la tecnología que ha experimentado el crecimiento más rápido entre todos los tipos de tecnologías renovables que actualmente se investigan (T. Ackermann, 2005). De tal forma que, la integración de grandes parques eólicos sobre el sistema eléctrico de potencia afectará considerablemente el comportamiento dinámico, ya que los sistemas de generación eólicos y los sistemas convencionales de generación presentan diferentes características dinámicas (Slootweg, 2003).

Respecto a las investigaciones sobre la energía eólica se han direccionado en diferentes vertientes. Por ejemplo, mejoras en los modelos de turbinas de viento (R. Piwko et al., 2005), características de operación de los parques eólicos (Energy, GE, 2005), impacto de la integración al sistema eléctrico (Charles Smith, Milligan, DeMeo, & Parsons, 2007), predicción de los recursos eólicos y su impacto en el sistema eléctrico (M. Ahlstrom et al., 2005), estrategias de control (Charles Smith, Milligan, DeMeo, & Parsons, 2007) y entre otros.

Por otro lado, la demanda de potencia reactiva en parques eólicos es un tema de interés, principalmente por el tipo de tecnología que se utiliza como generador (generador de inducción). Por lo tanto, los bancos de capacitores o dispositivos capaces de suministrar potencia reactiva como el STATCOM (Compensador estático síncrono) y SVC (Compensador estático de VARs) juegan un rol muy importante en este tipo de instalaciones. Contribuciones como (Xu, Yao, & Sasse, 2006), (Hasan & Farooq, 2012), (Fadaeinedjad, Moschopoulos, & Moallem, 2008), (Qi, Langston, & Steurer, 2008) y (Saad Saoud, Lisboa, Ekanayake, Jenkis, & Strbac, 1998) muestran las ventajas y desventajas de utilizar estos tipos de dispositivos en sistemas con generación eólica, donde se expone la ventaja de utilizar el STATCOM sobre el uso del SVC, razón por la cual se opta en este trabajo incluir el STATCOM como dispositivo de compensación de potencia reactiva.

Respecto al modelado, la importancia y viabilidad de contar con modelos matemáticos apropiados que permitan comprender la operación en estado estable y dinámico, así como su interacción con diferentes dispositivos ha sido un tema de interés (Saad Saoud & Jenkins, Simple Wind Farm Dynamic Model, 1995) y (Ekanayake, Holdsworth, Wu, & Jenkins, 2003). Además, se debe tener en cuenta el incremento de los problemas asociados a la calidad de energía, principalmente armónicos, cuando se incluyen dispositivos basados en electrónica de potencia. De tal forma, que herramientas para determinar la solución periódica de forma eficiente son de gran utilidad cuando se involucran múltiples dispositivos que tienen dinámicas y constantes de tiempo diferentes.

Bajo el contexto anterior, el uso del método de mapa de Poincaré ha sido extensamente usado para determinar la solución periódica de sistemas eléctricos de forma rápida y eficiente. Algunos intentos en la aplicación de esta metodología sobre parques eólico se han reportado en (Peña Gallardo, Medina, & Anaya Lara, 2013). En esta contribución se aplican técnicas de procesamiento en paralelo para el cálculo eficiente de la solución periódica de un modelo de parque eólico en el marco de referencia de las fases. En (Charles Smith, Milligan, DeMeo, & Parsons, 2007) la metodología del mapa de Poincaré es aplicada a un modelo de parque eólico en el marco de referencia síncrono (qd0) y se realizan estudios post-disturbio. En este trabajo se considera un modelo de generador de inducción de velocidad fija en el marco de referencia de las fases, así como un modelo de STATCOM y su transformador incluyendo la no linealidad del núcleo. Además, se logra aplicar el método de mapa de Poincaré sobre el modelo considerando distintos periodos entre las variables de estado, por ejemplo los periodos asociados a las variables de estado del rotor y estator del generador. En base a esta aplicación se realiza un estudio enfocado al análisis de armónicos del sistema bajo prueba. Más aun, en esta contribución se logran mejorar los rendimientos computacionales para el cálculo eficiente de la solución periódica, esto basado en un enfoque de transformación del método de mapa de Poincaré con la bien conocida transformada de Park.

Método de mapa de Poincaré

La representación en el dominio de tiempo de un sistema eléctrico no lineal puede ser descrito como:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(t, \mathbf{x}), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \tag{1}$$

Donde \mathbf{x} es un vector de estado n -dimensional y \mathbf{x}_0 es la condición inicial. Si el conjunto de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO) tiene entradas periódicas, tal $f(t, \cdot)$ es también T -periódica, entonces puede ser representado como un ciclo límite para \mathbf{x}_∞ en términos de otro elemento periódico o en términos de una función arbitraria de período T (T. S. Parker and L. O. Chua, 1989).

Si se asume una órbita transitoria simple que comienza en x_i y termina en x_{i+1} después de un periodo de integración conocido como Ciclo Base (BC), su comportamiento dinámico es convenientemente descrito por sus interceptos en el mapa de Poincaré (Σ) como se muestra en la Figura 1,

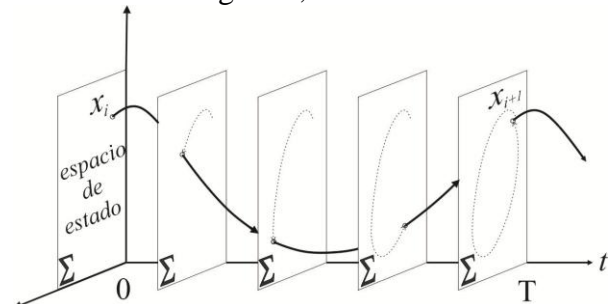


Figura 1 Órbita transitoria simple sobre el mapa de Poincaré.

Ahora si una perturbación Δx de la variable de estado se aplica al ciclo límite x_∞ , entonces (1) toma la forma,

$$\dot{\mathbf{x}} + \Delta \dot{\mathbf{x}} = f(t, \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) \tag{2}$$

La linealización de (2) tomando los términos de primer orden en la expansión de las series de Taylor resulta en,

$$\dot{\mathbf{x}} + \Delta \dot{\mathbf{x}} \approx f(t, \mathbf{x}) + J(t, \mathbf{x})\Delta \mathbf{x} \tag{3}$$

Donde la matriz de derivadas parciales $J(t, \mathbf{x})$ representa la matriz jacobiana de (3). Simplificando (3) se conserva que,

$$\Delta \dot{x} \approx J(t, x) \Delta x \quad (4)$$

Y la perturbación Δx evoluciona de acuerdo a (T. S. Parker and L. O. Chua, 1989),

$$\Delta \dot{x}_i = \Phi(t, x) \Delta x_0 \quad (5)$$

Donde Φ es llamada la matriz de transición de estado.

Entonces, las variables de estado se pueden extrapolar al ciclo límite utilizando un método tipo Newton,

$$\mathbf{x}_\infty = \mathbf{x}_i + (\mathbf{I} - \Phi)^{-1}(\mathbf{x}_{i+T} - \mathbf{x}_i) \quad (6)$$

Donde \mathbf{x}_∞ son las variables de estado en el ciclo límite, \mathbf{I} es la matriz identidad, \mathbf{x}_i son las variables de estado al principio del CB y \mathbf{x}_{i+1} son las variables de estado al final del CB.

Con el cálculo de las variables de estado en el ciclo límite se puede obtener, por integración directa, la solución T -periódica en $\mathbf{x}_\infty(t)$ en $t = T$. Más allá, el mayor esfuerzo computacional para determinar la solución periódica es requerido en el cálculo de la matriz de transición Φ , ya que para una aplicación del método se requiere integrar sobre un periodo n -veces dependiendo del espacio del sistema. De tal forma, que algunas estrategias para mejorar dicho calculo ya se han reportado y van desde métodos mejorados considerando simetría de medio ciclo (Segundo Ramírez & Medina, 2010) y procesamiento en paralelo (García, N., and E. Acha, 2004).

A. Procedimiento de diferenciación numérica

Hay tres formas de determinar la matriz de transición de estados Φ (Semlyen & Medina, 1995), estos son: procedimiento de Diferenciación Numérica (DN), procedimiento de Aproximación Directa (AD) y procedimiento de Expansión de matriz Exponencial Discreta (EED) (Segundo Ramírez & Medina, 2010). En este trabajo se usa el método de diferenciación numérica por su simplicidad en la formulación y algoritmo.

En esta aproximación para determinar la matriz de transición Φ por columnas requiere de la aplicación de una perturbación secuencial en el vector de variables de estado determinadas en el ciclo base, donde la perturbación se expresa como,

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_0 + \xi \mathbf{e}_i = \mathbf{x}_0 + \xi [0 \dots 1 \dots 0]_i^T \quad (7)$$

Donde ξ es un pequeño valor de $1e^{-6}$.

La aproximación se basa en la diferenciación numérica definida como,

$$\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0 = \xi \mathbf{e}_i \quad (8)$$

Usando (8) en la expresión para un problema n -dimensional descrito en (5), se mantienen la siguiente relación,

$$\Delta \mathbf{x}_{i+1} = \Phi \xi \mathbf{e}_i \quad (9)$$

Consecuentemente, si $i = 1, 2, \dots, n$, entonces Φ puede ser obtenida desde (9) como,

$$\Phi = \frac{1}{\xi} \Delta \mathbf{x}_{i+1} \quad (10)$$

B. Técnica mejorada del mapa de Poincaré.

Cuando se trabaja con modelos matemáticos de sistema eléctricos trifásicos en el marco de referencias de las fases pueden convenientemente ser descritos por modelos más simples en otros marcos de referencia. Aprovechando esta peculiaridad, en esta propuesta se desarrolla un proceso de transformación sobre el método de mapa de Poincaré y preservando las características de los modelos matemáticos en el marco de referencias de las fases de los dispositivos. Más importante, con la propuesta de transformación se logra unificar múltiples periodos entre las variables de estado de los modelos para converger a una solución y después transformarla a la solución periódica por medio de su anti-transformada. Para lograr lo anterior, se hace uso de la bien conocida transformada de Park, la cual permite la transformación directa entre las variables de estado de un sistema eléctrico trifásico preservando el orden del sistema n -dimensional. De tal forma, que la solución de (6) para esta nueva propuesta es,

$$\mathbf{x}_{\infty}^{abc} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}_{\infty}^{qd0} \quad (11)$$

Donde \mathbf{K}^{-1} es la transformada inversa de Park (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994) definida por,

$$\mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Con la solución mediante el método tipo Newton como,

$$\mathbf{x}_{\infty}^{qd0} = \mathbf{x}_i^{qd0} + (\mathbf{I} - \Phi^{qd0})^{-1} (\mathbf{x}_{i+T}^{qd0} - \mathbf{x}_i^{qd0}) \quad (13)$$

Y la transformación de las variables de estado \mathbf{x}_i^{abc} para cualquier instante de tiempo t_i es,

$$\mathbf{x}_i^{qd0} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_i^{abc} \quad (14)$$

Donde \mathbf{K} es la transformada de Park definida por,

$$\mathbf{K} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Modelo del aerogenerador incluyendo un STATCOM

La Figura 2 muestra la configuración general del caso de estudio desarrollado en este trabajo. El sistema consiste de un aerogenerador y un STATCOM. El STATCOM se implementa mediante el uso de un transformador incluyendo la saturación del núcleo y conexión Y- Δ con el fin de acoplar el convertidor de la fuente de voltajes conmutados (VSC, por sus siglas en inglés) hasta el punto de acoplamiento común (PCC).

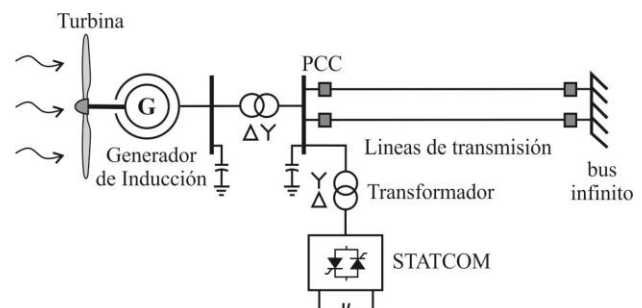


Figura 2 Esquema de aerogenerador y STATCOM.

A. Modelo de la turbina eólica

La relación entre la potencia mecánica extraída desde una turbina eólica y la velocidad del viento es (T. Ackermann, 2005),

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \rho A v_w^3 \quad (16)$$

Donde P_m es la potencia mecánica de salida de la turbina, C_p se conoce como el coeficiente de eficiencia de potencia, ρ es la densidad del aire, A es el área de la turbina y v_w es la velocidad del viento.

Cuando se utilizan valores por unidad, la ecuación (16) puede ser normalizada como,

$$P_{m_pu} = k_p C_{p_pu} v_{w_pu}^3 \quad (17)$$

Donde los valores en pu se calculan mediante el uso de cantidades base y k_p es una ganancia de potencia con un valor de $k_p \leq 1$, y para este trabajo $k_p = 0,73$ obtenido desde Simulink/MATLAB.

El coeficiente de eficiencia $C_p(\lambda, \beta)$, el cual es una relación entre la velocidad específica λ y el ángulo de los alabes β , se calcula,

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (18)$$

Con

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (19)$$

Donde c_{1-6} son coeficientes constantes con valores tomados de Simulink/MATLAB. De la característica $C_p - \lambda$, con $\beta = 0^\circ$ y $\lambda = 8.1$ el valor nominal de c_{p_nom} es igual a 0.48 Simulink / MATLAB, entonces,

$$C_{p_pu} = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{C_{p_nom}} \quad (20)$$

El par mecánico de la turbina eólica se define como (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994),

$$T_{m_pu} = \frac{P_{m_pu}}{\omega_{r_pu}} \quad (21)$$

Por otro lado, para los aerogeneradores de gran capacidad la topología más común es la turbina eólica de eje horizontal. En esta configuración, el sistema de acoplamiento mecánico de la turbina-generator se puede describir por medio de un sistema equivalente de una masa (Pérez, 2011),

$$\frac{1}{H_{total}} = \frac{1}{H_{tur}} + \frac{1}{H_{gen}} \quad (22)$$

Donde H_{tur} es la inercia de la turbina eólica, H_{gen} es la inercia del generador y H_{total} es la inercia total equivalente.

B. Modelo del generador

La Figura 3 muestra el circuito equivalente del generador de inducción jaula de ardilla implementado en este trabajo. Las ecuaciones de voltaje para las fases a, b, c en valores por unidad se expresan como (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994),

$$\mathbf{v}_{s,r}^{abc} = \mathbf{r}_{s,r} \mathbf{i}_{s,r}^{abc} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \Psi_{s,r}^{abc} \quad (23)$$

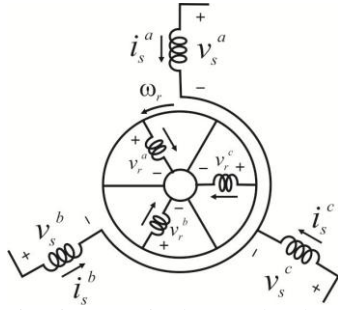


Figura 3 Circuito equivalente de la máquina de inducción jaula de ardilla con conexión estrella.

Donde el superíndice abc denota las fases del sistema, el subíndice s,r indica las variables del estator y el rotor, $\Psi_{s,r}^{abc}$ es el vector de flujo, $\mathbf{i}_{s,r}^{abc}$ es el vector de corrientes, $\mathbf{r}_{s,r}$ es la matriz diagonal de resistencias, $\mathbf{v}_{s,r}^{abc}$ es el vector de voltajes de entrada y ω_b es la velocidad angular base. Los flujos Ψ se relacionan con las corrientes a través de la inductancia \mathbf{L} de la siguiente forma,

$$\Psi_{s,r}^{abc} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{i}_{s,r}^{abc} \quad (24)$$

Con

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{sr}^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \quad (25)$$

Y

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Donde θ_r es la posición actual del rotor, L_{ls} , L_{lr} y L_m son las inductancias de dispersión del estator, rotor y la inductancia de magnetización, respectivamente, (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994). Mediante la combinación de (23) y (24) se obtiene la siguiente formulación en términos de corriente,

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_{s,r}^{abc} = \omega_b [\mathbf{L}^{-1} (\mathbf{v}_{s,r}^{abc} - (\mathbf{r}_{s,r} + \mathbf{G}_{s,r}) \cdot \mathbf{i}_{s,r}^{abc})] \quad (29)$$

Con la matriz

$$\mathbf{G}_{s,r} = \omega_{r_pu} \left[\frac{d}{d\theta_r} \mathbf{L} \right] \quad (30)$$

Donde \mathbf{L} es la matriz de inductancias y ω_{r_pu} es la velocidad del rotor en pu.

El torque electromagnético, la velocidad y la posición el rotor asociadas a las ecuaciones mecánicas del sistema se definen como (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994),

$$T_{e_pu} = \left(\frac{2}{3} \right) \mathbf{i}_s^{abcT} \frac{d}{d\theta_r} [\mathbf{L}_{sr}] \mathbf{i}_r^{abc} \quad (31)$$

$$\frac{d}{dt} [\omega_{r_pu}] = \frac{(T_{e_pu} - T_{m_pu})}{2H_{total}} \quad (32)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = [\omega_{r_pu}] \omega_b \quad (33)$$

Donde T_{e_pu} es el torque electromagnético en pu y T_{m_pu} es el torque mecánico calculado desde (21).

C. Modelo del STATCOM

El circuito equivalente del STATCOM es mostrado en la Figura 4. Este consiste de un convertidor de fuentes de voltaje conmutadas (VSC), con un esquema de conmutación basado en técnicas de modulación por ancho de pulso. Además, un transformador conexión Y- Δ es utilizado para acoplar la VSC con el PCC.

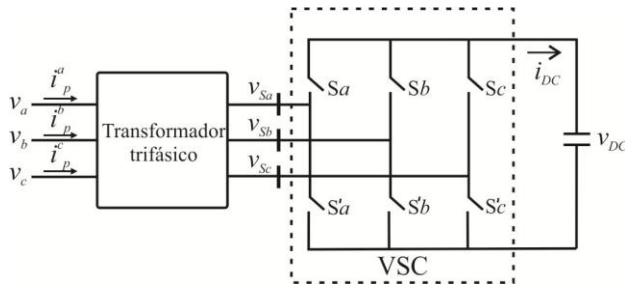


Figura 4 Circuito equivalente para el STATCOM.

Transformador: El modelo del transformador no lineal utilizado en este trabajo está basado en (García, Madrigal, & Acha, 2001). De tal forma, que las ecuaciones que representan a una unidad monofásica del transformador están dadas por,

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{\omega_b}{L_p} \left[v_p - (r_p + r_c)i_p + r_c \left(\frac{i_s}{a} + i_m \right) \right] \quad (34)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{\omega_b}{L_s} \left[r_c(i_p - i_m) - (r_s + r_c)i_s - a^2(v_{Sa} - v_{Sb}) \right] \quad (35)$$

Los flujos asociados a la característica no lineal del núcleo ferromagnético se pueden expresar como,

$$\frac{d\phi_m}{dt} = \omega_b r_c \left[i_p - \frac{i_s}{a} - i_m \right] \quad (36)$$

Donde, i_p , i_s y i_m son las corrientes en el lado primario, secundario y la corriente de magnetización, respectivamente.

La característica no lineal del transformador es representada por un polinomio de la forma (García, Madrigal, & Acha, 2001),

$$i_m = 0.7576\phi_m + 0.69\phi_m^7 \quad (37)$$

Una expansión al modelo trifásico con las diferentes conexiones puede ser desarrollada a partir de (35), (36) y (37).

Modelo VSC: Un convertidor bidireccional trifásico de seis pulsos es utilizado para construir una fuente de voltaje conmutada de dos niveles. Cada switch es un arreglo de un GTO, IGBT o MOSFET en anti-paralelo con un diodo. Además, las pérdidas en los semiconductores se desprecian, por tal motivo, el modelo ideal de los switches es usado en este trabajo. Entonces, las discontinuidades en las funciones de conmutación bidireccionales se identifican por S y S' para cada fase, que puede ser encendido o apagado (1 o 0), respectivamente. También, S y S' son complementarios para cada fase, por lo que $S + S' = 1$. Entonces los voltajes $v_{S_{abc}}$ a tierra en el lado de corriente alterna son,

$$v_{Sa} = \left[S_a - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] v_{dc} \quad (38)$$

$$v_{Sb} = \left[S_b - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] v_{dc} \quad (39)$$

$$v_{Sc} = \left[S_c - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] v_{dc} \quad (40)$$

Donde v_{dc} es el voltaje del capacitor en el lado de corriente directa y S_{abc} son 1 o 0 de acuerdo al control basado en las técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM).

Enlace de corriente directa del capacitor: El comportamiento dinámico del voltaje del capacitor en el lado de corriente directa es,

$$\frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{\omega_b i_{dc}}{B_{dc}} \quad (41)$$

Con

$$i_{dc} = [(i_p^a - i_p^c) \quad (i_p^b - i_p^a) \quad (i_p^c - i_p^b)] \times \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (42)$$

D. Modelo de la línea de transmisión

En este trabajo, se considera una línea de transmisión corta, por tanto, se utiliza un modelo de parámetros concentrados simple,

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{\omega_b (v_k - r_L i_L - v_m)}{x_L} \quad (43)$$

Donde v_k y v_m son los voltajes en el lado k y m respectivamente, r_L y x_L son la resistencia y reactancia de la línea de transmisión.

Casos de estudio

El caso de estudio es el mostrado en la Figura 2. El sistema es conformado por 49 ecuaciones diferenciales. Las condiciones iniciales, para todas las simulaciones, son establecidas en cero. El método de integración seleccionado para resolver las ecuaciones diferenciales es el Runge-Kutta de cuarto orden con un paso de integración de $1 \mu s$. El paso de integración es muy pequeño debido principalmente a que el sistema conformado resulta ser un sistema rígido.

Esto ocurre cuando se involucran constantes de tiempo de diferente proporción y principalmente cuando se incluyen modelos discretos y alta no-linealidad, como el transformador con saturación. El bus infinito es representado por una fuente equivalente cosenoidal de 1 pu. Los parámetros asociados al caso de estudio están dados en la tabla I,

Generador eólico		Turbina eólica	
n_p	6	R	27 m
X_{ls}	0.1248 pu	ρ	1.225 Kg/m ³
X_{lr}	0.0884 pu	c_1	0.5176
X_m	1.8365 pu	c_2	116
r_r	0.0073 pu	c_3	0.4
r_s	0.0076 pu	c_4	5
H_{gen}	0.250 pu	c_5	21
H_{tur}	2.410 pu	c_6	0.0068
Transformador		Parámetros adicionales	
$r_s = r_r$	0.005 pu	r_L	0.01
$x_s = x_r$	0.05 pu	x_L	0.1 pu
a	$1/\sqrt{3}$	Bc	0.2 pu

Tabla 1 Parámetros del sistema de prueba.

Validación: Con el fin de validar el esquema implementado, se utiliza el simulador por medio de bloque en Simulink de MATLAB. Una simulación muy corta (0.1 seg.) incluyendo el arranque del aerogenerador es realizada. Los modelos incluidos en esta simulación son: bloque de turbina eólica, teniendo en cuenta un ángulo $\beta=0^\circ$, un promedio de velocidad del viento de 13 m/s. Un bloque de la máquina asíncrona donde se selecciona el modo de jaula de ardilla. Un bloque transformador trifásico operado como transformador no-lineal. Un bloque de puente universal en combinación con un generador PWM, a una frecuencia base de 60 Hz y una señal triangular portadora de 900 Hz, un índice de modulación de 0.8 y un ángulo de fase del generador PWD de 60° .

Los parámetros de simulación en Simulink son: método de integración ode15s, el tamaño máximo de paso es de $1e-6$ y la tolerancia relativa máxima se ajusta en $1e-6$. Para comparar las señales se seleccionan las variables de estado de corriente de la fase *a* en el estator y voltaje del capacitor en el lado de dc del STATCOM, Figura 5. La respuesta transitoria durante para el arranque del sistema presenta una excelente concordancia entre el modelo de los bloques de Simulink.

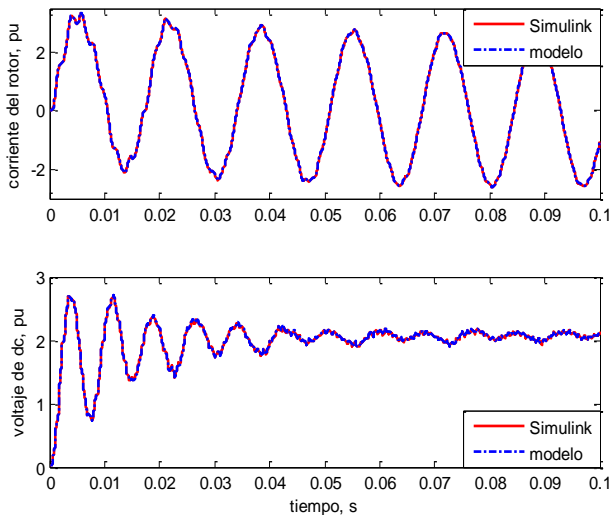


Figura 5 Respuesta transitoria del sistema bajo prueba.

Técnica mejorada para determinar la solución periódica: En esta sección se analiza la solución al estado estacionario periódico. El estudio se lleva a cabo con el aerogenerador interactuando con el STATCOM, una velocidad de viento de 13 m/s es usada como entrada para determinar el torque mecánico de entrada al generador. 30 ciclos iniciales se toman para determinar el ciclo base y a ese tiempo inician las aplicaciones del método tipo Newton. El error máximo para determinar la solución periódica del sistema se toma en 1×10^{-10} .

El esfuerzo computacional fue medido con una PC con procesador Intel Core i5 y 8 GB de Memoria. Además, para el caso base se utiliza un periodo de discretización en el mapa de Poincaré de $T = 1/f$, donde f es la frecuencia base del sistema, para este caso 60 Hz. La Tabla II muestra el número de aplicaciones que toma al método para determinar una solución periódica al periodo base de discretización. Es importante notar que el tiempo requerido para lograr la convergencia fue de 21.337 min.

NA	error
CB	3.909732e-002
1	3.518666e-002
2	1.184015e-005
3	1.248596e-011

Tabla 2 Numero de aplicaciones (NA) del método mapa de Poincaré para el caso base.

Con el objetivo de probar computacionalmente las mejoras de la propuesta se seleccionan los periodos de discretización de $T = 1/af$, donde a es un numero entero y $a = [1, 2, 3, 4, 5]$. La Figura 6 muestra el tiempo de cómputo requerido para cada factor analizado, así como el número de aplicaciones requeridas para determinar la solución periódica con la técnica propuesta. Es importante notar que el menor número de aplicaciones del método es cuando se usa el factor de 1, es decir la discretización del mapa de Poincaré en el periodo base, mientras que para factores de hasta 5 se requieren 4 aplicaciones del método, lo cual produce un esfuerzo computacional extra, que no es notorio debido a que la discretización disminuye requiriendo un tiempo menor para lograr cada aplicación del método. De tal forma, que en base a los resultados obtenidos se observan reducciones en tiempo de computo de hasta un 72.42 % con respecto al caso base.

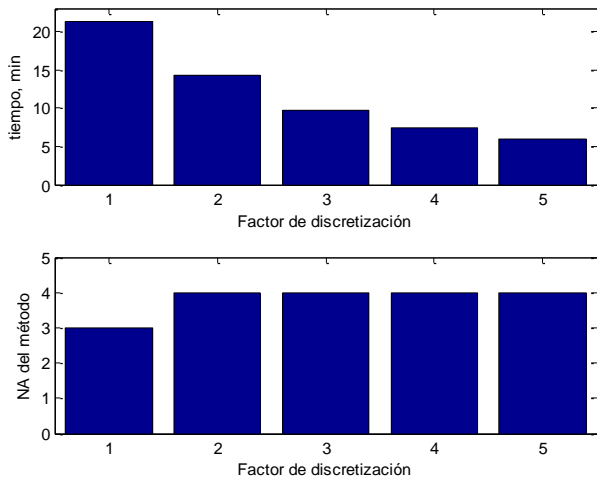


Figura 6 Tiempo de cómputo y número de aplicaciones del método de mapa de Poincaré.

Análisis armónico: Teniendo en cuenta la naturaleza de la distorsión armónica en el dispositivo STATCOM, y el transformador no línea bajo ciertas circunstancias de operación, un estudio orientado a armónicos se efectúa al caso de estudio. Una vez que calcula la solución periódica de forma eficiente con la nueva propuesta, la transformada discreta de Fourier es aplicada a un conjunto de variables seleccionadas. Las variables son, las corrientes del estator en el aerogenerador, el voltaje en terminales del aerogenerador, las corrientes en el lado de la estrella del transformador que acopla el aerogenerador y el sistema, los voltajes del PCC, las corrientes del lado estrella del transformador STATCOM y las corrientes de una línea de transmisión. Con la finalidad de observar el efecto del índice de modulación de frecuencia mf , sobre el contenido armónico de las variables seleccionadas se realizan 3 casos para $mf = [9, 15, 27]$. Las figuras 7, 8 y 9 muestran el contenido armónico de las variables para estos tres casos de estudio. Ahí se observa que para índices de modulación de frecuencia menor el contenido armónico es mayor en las variables. En el caso cuando $mf = 27$ para las corrientes del aerogenerador el 5to armónico es el mayor con 0.0164 pu.

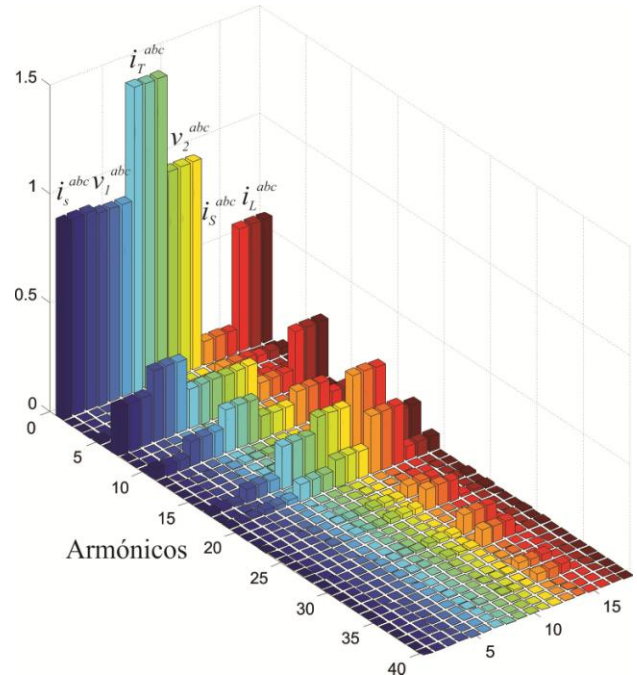


Figura 7 Armónicos de variables seleccionadas con $mf=9$.

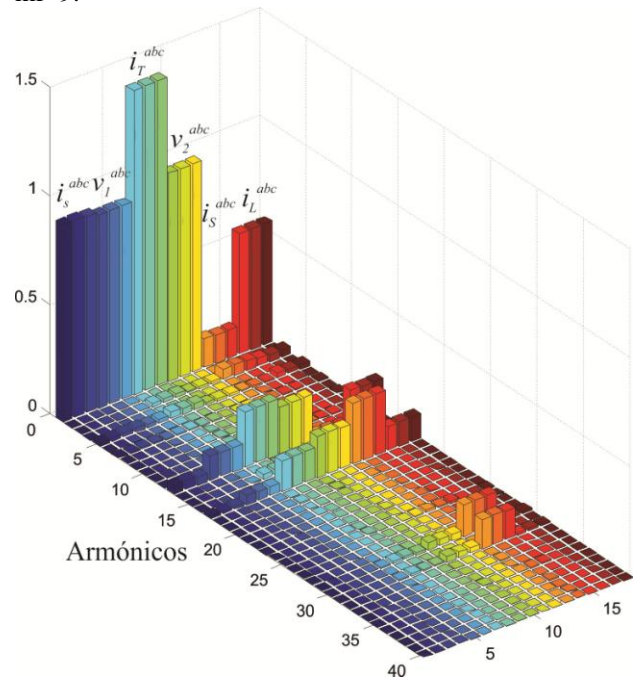


Figura 8 Armónicos de variables seleccionadas con $mf=15$.

La Figura 10 muestra la distorsión armónica total con respecto a la fundamental. Especialmente se ha detectado la mayor distorsión en las corrientes del STATCOM.

La mayor distorsión armónica encontrada es del orden de los 500%, esto en las corrientes del STATCOM. Mientras que la menor es 2.14 % y se encuentra en los voltajes del aerogenerador.

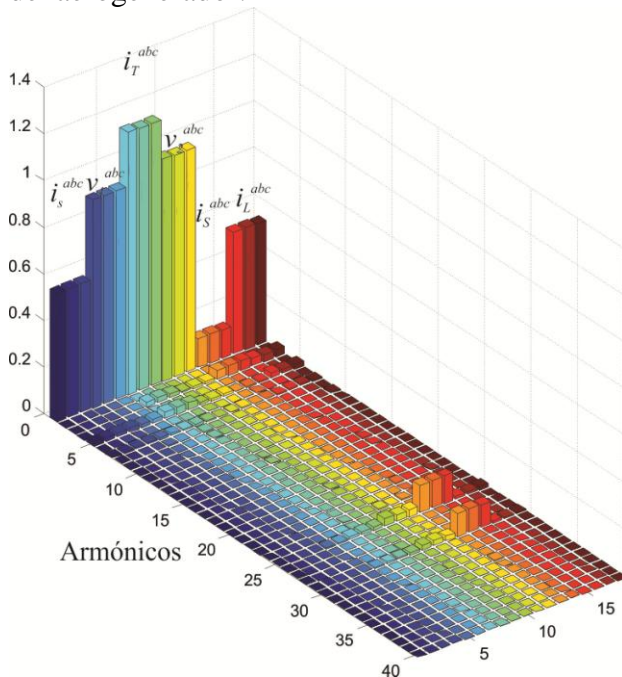


Figura 9 Armónicos de variables seleccionadas con $mf=27$.

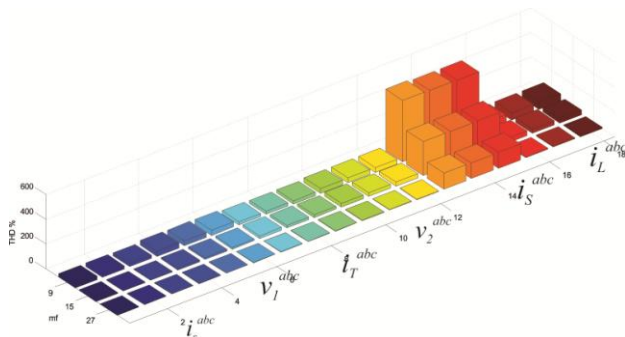


Figura 10 Porcentaje de la distorsión armónica total.

Agradecimiento

Los autores agradecen al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el apoyo financiero recibido para llevar a cabo esta investigación, bajo el proyecto PRODEP No. DSA-103.5-15-6897.

Conclusiones

En este trabajo se presentó una nueva propuesta para determinar la solución periódica de sistemas eléctricos trifásicos que pueden estar operando con distintas frecuencias entre sus variables de estado. El objetivo de esta propuesta es poder preservar los modelos matemáticos en el marco de referencia de las fases. Un caso de estudio que consiste en un aerogenerador y un sistema STATCOM fue presentado para probar la nueva propuesta. El orden del sistema es de 39 ecuaciones diferenciales en la cual incluye inherentemente alta rigidez debido a los modelos matemáticos no lineales del transformador y STATCOM. La nueva propuesta muestra reducciones de hasta 72 % en esfuerzo computacional requerido para obtener la solución periódica es logrado. Más aun, se pudo logra obtener la solución periódica y aplicar la transformada discreta de Fourier para obtener el contenido armónico y el porcentaje de la distorsión total en el sistema. Además se mostró que entre mayor índice de modulación de frecuencia menor contenido armónico en el sistema. Distorsiones en las formas de onda de hasta 500 % son detectadas en las corrientes del STATCOM.

Referencias

Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*. England: John Wiley & Sons.

Charles Smith, J., Milligan, M. R., DeMeo, E. A., & Parsons, B. (2007). *Utility wind integration and operating impact state of the art* (Vol. 22). IEEE Trans. Power Syst.

Ekanayake, J. B., Holdsworth, L., Wu, X., & Jenkins, N. (2003, May). *Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines* (Vol. 18). IEEE Transactions on Power Systems.

- Energy, GE. (2005). *The Effects of Integrating Wind Power on Transmission System Planning, Reliability, and Operations: Report on Phase 2*. Prepared for The New York State Energy Research and Development Authority.
- Fadaeinedjad, R., Moschopoulos, G., & Moallem, M. (2008). *Using STATCOM to Mitigate Voltage Fluctuations Due to Aerodynamic Aspects of Wind Turbines*. Canadá: School of Engineering Science, Simon Fraser University, Surrey.
- García, N., Madrigal, M., & Acha, E. (2001). *Interaction of the STATCOM and its associated transformer non-linearity: time domain modelling and analysis*. University of Glasgow, Scotland, U.K.
- García, N., & E. Acha, (2004) "Periodic Steady-State Analysis of Large-Scale Electric Systems Using Poincaré Map and Parallel Processing", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 1784-1793, Nov.
- Hasan, N., & Farooq, S. (2012). *Dynamic Performance Analysis of DFIG based Wind Farm with STATCOM and SVC* (Vol. 2). International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering,.
- Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (1994). *Analysis of Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill.
- M. Ahlstrom *et al.* (2005). The future of wind forecasting and utility operations. *Working With Wind; Integrating Wind into the Power System*.
- Parker, T. S., & L. O. Chua, (1989) "Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems", NY: Springer Verlag.
- Peña Gallardo, R., Medina, A., & Anaya Lara, O. (2013). *A Methodology for the Efficient Computer Representation of Dynamic Power Systems: Application to Wind Parks* (Vol. 13). Wind Energy.
- Peña, R., Medina, A., Anaya Lara, O., & McDonald, J. R. (2011). *Steady-State Solution of Fixed-Speed Wind Turbines Following Fault Conditions Through Extrapolation to the Limit Cycle* (Vol. 57). IETE Journal of Research.
- Pérez, C. (2011). *Análisis de la Respuesta de Estado Estable de Parques Eólicos de Generación Usando el Método de Diferencias Finitas*. tesis de maestría, UMSNH.
- Qi, L., Langston, J., & Steurer, M. (2008). *Applying a STATCOM for Stability Improvement to an Existing Wind Farm with Fixed-Speed Induction Generators*. EUA: U.S. Department of Energy.
- R. Piwko *et al.* (2005). Wind energy delivery issues. *Working With Wind; Integrating Wind into the Power System*.
- Saad Saoud, Z., & Jenkins, N. (1995). *Simple Wind Farm Dynamic Model* (Vol. 142). IEE Proc. Gener. Trans. Distrib.
- Saad Saoud, Z., Lisboa, M. L., Ekanayake, J. B., Jenkis, N., & Strbac, G. (1998). *Application of a STATCOMs to Winds Farms* (Vol. 145). England: IEE, Proc. Gener. Trans. Distrib.
- Segundo Ramírez, J., & Medina, A. (2010). *An Enhanced Process for the Fast Periodic Steady State Solution of Nonlinear Systems by Poincaré Map and Extrapolation to the Limit Cycle*. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation.

Segundo Ramírez, J., & Medina, A. (2010). *Computation of the Steady-State Solution of Nonlinear Power Systems by Extrapolation to the Limit Cycle Using a Discrete Exponential Expansion Method*. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation.

Semlyen, A., & Medina, A. (1995). *Computation of the Periodic Steady State in Systems with Nonlinear Components Using a Hybrid Time and Frequency Domain Methodology* (Vol. 10). IEEE Transactions on Power System.

Slootweg, J. G. (2003). *Wind Power: Modelling and Impact on Power System*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft.

Xu, L., Yao, L., & Sasse, C. (2006). *Comparison of Using SVC and STATCOM for Wind Farm Integration*. Reino Unido: International Conference on Power System Technology.