

# Estudio Comparativo de Estimadores de Velocidad para Generadores Síncronos de Imanes Permanentes empleados en Sistemas de Generación Eólica

Sergio Cortes Gutiérrez, José Álvaro Frutos Martínez, Oscar Carranza Castillo, Rubén Ortega Gonzalez

Escuela Superior de Cómputo, Instituto Politécnico Nacional, Av. Juan de Dios Batiz S/N, Col. Lindavista, Del. Gustavo A. Madero, 07738, D.F., México, email: sorgi\_wcg8@hotmail.com, ocarranzac@ipn.mx, rortegag@ipn.mx

## Resumen

Este trabajo realiza un estudio de estimadores de velocidad para generadores síncronos de imanes permanentes empleados en sistemas de generación eólica. Esto se realiza para establecer un estado del arte de los estimadores de velocidad que son empleados en generadores síncronos. Aunque también se amplía a los estimadores en generadores de inducción, de manera de analizar la posibilidad de que sean empleados en generadores síncronos. Los estimadores de velocidad nos permiten aplicar técnicas *sensorless* en el control del sistema de generación eólica, evitando el uso de sensores mecánicos. El presente estudio analiza las diversas técnicas que han sido desarrolladas para la estimación de la velocidad, clasificándolos según su modelo de funcionamiento y comparándolos entre sí, mostrando que algunos modelos aun falta por ser desarrollados y los que han sido analizados de manera optima las ventajas y desventajas que presenta. El estudio arroja una tabla comparativa que nos permite observar las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, para así seleccionar el más adecuado según las necesidades específicas del sistema.

**Palabras Clave:** Estimadores de velocidad, generador síncrono de imanes permanentes, *sensorless*

## I. Introducción

En los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo en la estimación de la velocidad mecánica de giro (y la posición) de los generadores síncronos de imanes permanentes para evitar la necesidad de incluir algunos de los sensores de velocidad o posición. Son varias las ventajas que pueden obtenerse al prescindir de un sensor electromecánico para la medida de la velocidad son: Disminución del coste, debido al precio del sensor en sí y, sobre todo, a la necesidad de proveer acopladores en el eje del generador para la inclusión del sensor, entre otras. De allí la importancia de realizar un estudio de los diferentes métodos utilizados para estimar la velocidad y la posición para los generadores síncronos de imanes permanentes, evitando el uso de sensores y cuyos algoritmos sean los más sencillos, con menor costo computacional con la finalidad de implementarlo en un aerogenerador.

El término *sensorless* engloba a los controladores de motores o generadores que evitan la presencia de alguno de los sensores mecánicos necesarios para su implementación. En general, puede eliminarse el sensor dedicado a la medida de velocidad (control *sensorless* de velocidad), o bien eliminar los sensores de par y/o flujo necesarios en el control vectorial directo o el control directo de par. Son varias las ventajas que pueden obtenerse al prescindir de un sensor electromecánico para la medida de la velocidad son:

- Disminución del coste, debido al precio del sensor en sí y, sobre todo, a la necesidad de proveer acopladores en el eje del generador para la inclusión del sensor.
- Menor sensibilidad al ruido eléctrico, lo que incrementa la fiabilidad en ambientes industriales.
- Disminución en los costes de mantenimiento.

- No aumenta la inercia del sistema, la cual es indeseable para un control de altas prestaciones en motores y generadores de baja potencia.

La estimación de velocidad en motores de corriente alterna es un campo de investigación ampliamente estudiado. Sin embargo, su aplicación a generadores eólicos y a Generadores Síncronos de Imanes Permanentes (GSIP) en particular, es un campo de reciente actualidad que aun esta en investigación.

Las técnicas estudiadas han sido comprobadas experimentalmente por especialistas en el tema, en diferentes puntos de operación mediante un Un procesador digital de señales o DSP (sigla en inglés de *digital signal processor*), utilizado en el sistema de control del Sistemas de Generación Eólica (SGE), comparando la velocidad y posición del rotor con un sensor mecánico (encóder incremental). Al igual que las técnicas de sensorless para el control de convertidores PWM [1][2], en el control de máquinas síncronas, es de importancia conocer la posición angular de la fuerza electromotriz inducida. Las técnicas de estimación de posición y velocidad permiten conocer con cierta precisión la posición angular del rotor. Gracias a estas técnicas es posible suprimir elementos mecánicos u ópticos tradicionales en el sensado de estas variables físicas, logrando reducir elementos mecánicos acoplados al rotor o circuitos adicionales para el sensado. En el uso de máquinas síncronas acopladas a rectificadores controlados, disponer de la posición angular del rotor con cierta exactitud, o en su defecto de las variables eléctricas, puede comprometer el comportamiento del sistema. Por ejemplo, en el caso de utilizar técnicas de control vectorial, la eficacia dependerá en gran medida del conocimiento preciso que se tenga de la posición angular de las variables eléctricas del sistema, dado que esta técnica se basa en fijar un ángulo de desfase determinado entre las corrientes y voltajes de línea.

En el caso de las máquinas síncronas, es aún más importante conocer la posición del rotor, dado que sin ella sería inalcanzable su

sincronización entre la fuerza electromotriz inducida y el flujo magnético producido por los imanes permanentes. Por esto, es necesario realizar una comparación entre las técnicas de estimación de posición y velocidad que optimicen el uso de la técnica de control vectorial utilizada. Las técnicas sensorless parten de modelos matemáticos y variables eléctricas físicamente mensurables en la máquina estudiada, que permiten estimar la posición y velocidad del rotor, con errores acotados por el tipo de técnica utilizada. Varias técnicas sensorless presentan errores considerables en la estimación de velocidad en el rango de baja velocidad y rotor parado [3], pero en aplicaciones de energía eólica con generadores síncronos de múltiples polos, el problema se reduce hasta llegar a ser despreciable, dado que la velocidad angular del voltaje y corriente de línea del generador es la velocidad del rotor multiplicada por el número de pares de polos del generador.

Las técnicas sensorless más sencillas, son las de bucle abierto que dependen en gran medida de los parámetros internos de la máquina y de la adquisición de las variables del sistema, no poseen alimentación y producen un error elevado de las variables estimadas [4]. Dentro de las técnicas más destacadas están los sistemas deterministas que utilizan ecuaciones de estado y se fundamentan en el modelo de la máquina utilizada; por el contrario están los estocásticos que dependen en menor grado del modelo o utilizan propiedades no lineales de la máquina.

Las técnicas deterministas son comúnmente utilizadas en sistemas lineales, una de éstas, es el caso de los observadores de Luenberger o los observadores de orden completo. En el caso de los sistemas no lineales, las técnicas más usadas son los observadores derivados del filtro de Kalman. Actualmente existen técnicas que se basan en redes neuronales o lógica difusa, gracias a la alta capacidad de procesamiento digital que existe hoy en día [5].

## II. Clasificación de técnicas de estimadores de velocidad sensorless en GSIP

Una clasificación gráfica de las técnicas de estimación de velocidad y posición (Sensorless) en generadores sincrónicos de imanes permanentes, puede observarse en la Fig1 [6]. Dentro de los controladores con estimación de velocidad puede hacerse una clasificación en función del modelo del motor de inducción utilizado para la estimación de la velocidad:

- 1) Estimadores basados en el modelo estático del GSIP.
- 2) Estimadores basados en las ecuaciones de estado del GSIP. En este grupo pueden distinguirse los siguientes estimadores:
  - a. Estimadores en bucle abierto
  - b. Estimadores basados en modelo de referencia adaptativo.
  - c. Estimadores basados en el observador de orden completo de Luenberger.
  - d. Estimadores basados en el filtro de Kalman extendido.
  - e. Estimadores basados en observadores en modo deslizante.
  - f. Estimadores basados en Phase Lock Loop
- 3) Estimadores de velocidad basados en las propiedades no lineales del GSIP.
- 4) Estimadores basados en inteligencia artificial.

En los apartados siguientes se hará una descripción más detallada de los diferentes tipos de control *sensorless* para GSIP, aunque cabe señalar que no todos los modelos han sido implementados en los GSIP, sino en otras maquinas como los motores de Inducción.

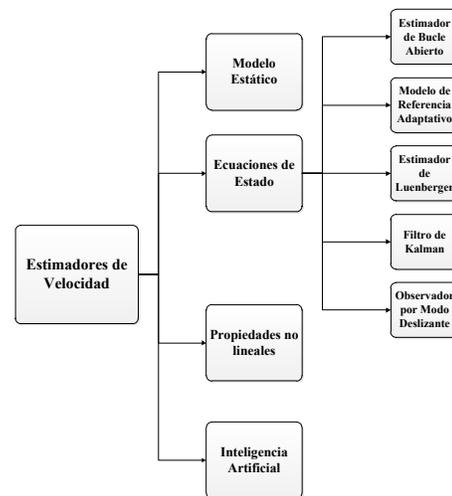


Fig. 1 Clasificación de técnicas de estimadores de velocidad sensorless en GSIP

### III. Tipos de estimadores

A continuación se hace una descripción de los diferentes tipos de estimadores de velocidad y posición empleados en GSIP.

#### a) Estimación de velocidad por medio de Modelo estático

La ecuación utilizada para estimar el valor de la velocidad del rotor viene dado por el voltaje promedio de salida  $V_d$  y la corriente  $I_d$  del diodo rectificador que rige la ecuación [7]:

$$\omega_m = \frac{V_d + 2R_s I_d}{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} K_m - \frac{P}{20} L_s I_d} \quad (1)$$

Donde  $\omega_m$  es la velocidad mecánica del rotor en (rpm) y  $K_m$  fuerza electromotriz.

Se emplea la estimación por este modelo en los motores de Inducción en donde esta técnica se estima el deslizamiento del motor mediante cálculo analógico, basándose en la sencilla relación existente entre el par electromagnético y el voltaje en el entrehierro. Donde se toman consideraciones como la potencia y el par del generador dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\omega_s = \frac{3}{2} n_p \frac{R_r |I_r|^2}{T_e} \quad (2)$$

De la ley de Faraday y tomando consideraciones como las variaciones en el deslizamiento queda:

$$\omega_s = \frac{3n_p k_1^2}{2 k_2^2} R_r \frac{T_e \omega_e^2}{|V_m|^2} = k R_r \frac{T_e \omega_e^2}{|V_m|^2} \quad (3)$$

Estos estimadores se basan en el modelo estático del motor de inducción. Por tanto no responden bien durante los transitorios. Además, suelen contener simplificaciones en las que se considera pequeño el deslizamiento, por lo que conforme aumenta éste se incrementa el error en la estimación. Estas técnicas, por tanto sólo pueden aplicarse a controladores con bajas prestaciones. Uno de estos casos es el control *V/f* (voltaje-frecuencia) con compensación del deslizamiento. En el control *V/f* convencional de bajo coste no se usa compensación alguna del deslizamiento, por lo que no se utiliza ningún sensor de velocidad. En un sistema así, el error de velocidad se incrementa conforme la carga aumenta. Con las técnicas descritas es posible estimar el deslizamiento y corregirlo, consiguiéndose mejoras en las prestaciones del control. Así que ha sido implementado con mayor regularidad en los motores de inducción y solo en pocos casos en GSIP [6].

#### b) Estimación de la velocidad en bucle abierto mediante ecuaciones de estado

En este tipo de estimadores utilizado principalmente en los motores de inducción la velocidad se obtiene directamente de las corrientes y voltajes del motor de inducción medida en cada instante haciendo uso de las ecuaciones de estado del motor de inducción y despejando de las mismas.

Las ecuaciones que describen este método son:

$$e_{md} = v_{sd} - R_s i_{sd} - \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} \quad (4)$$

$$e_{mq} = v_{sq} - R_s i_{sq} - \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} \quad (5)$$

$$i_{md} = \frac{1}{L_m} \int e_{md} dt \quad (6)$$

$$i_{mq} = \frac{1}{L_m} \int e_{mq} dt \quad (7)$$

$$\omega_r = \frac{1}{i_{md}} \left[ \frac{1}{\tau_r} (i_{sq} - i_{mq}) - \frac{1}{L_m} e_{mq} \right] \quad (8)$$

Dado que las medidas de las corrientes y voltajes contienen una componente de continua es conveniente reemplazar los integradores involucrados en la obtención de *im* por filtros paso bajo. Aún con esto, puede resultar necesario realizar un filtrado paso-banda de las corrientes y voltajes medidos del motor para, por un lado, eliminar las componentes de continua, y por otro los ruidos de conmutación. Esto empobrece la dinámica del estimador y aumenta aún más la mínima velocidad que es posible estimar pero, por contra, mejora la estabilidad de la estimación y consiguientemente el control de velocidad [6]. Los voltajes se obtienen a partir del voltaje de la DC-Link del inversor y el estado de los interruptores de potencia según:

$$V_{ab} = V_{dc}(SW_0 - SW_1) \quad (9)$$

$$V_{bc} = V_{dc}(SW_1 - SW_2) \quad (10)$$

#### c) Estimación de velocidad mediante Modelo de Referencia Adaptativo basado en el flujo del rotor

En [8] un modelo de referencia de adaptación del observador (MRAS) es implementado. El estimador utiliza dos modelos para calcular el flujo del PMSG. El modelo de referencia, consiste en las ecuaciones de flujo en el estator y el modelo de adaptación, que considera que el rotor velocidad como el parámetro ajustable, se muestra en las ecuaciones siguientes:

$$\hat{\Psi}_{sd} = \int (U_{sd} + \hat{\omega} L \hat{I}_{sq} - R_s \hat{I}_{sd}) dt + \Psi_m \quad (11)$$

$$\hat{\Psi}_{sq} = \int (U_{sq} + \hat{\omega} L \hat{I}_{sd} - R_s \hat{I}_{sq} - \hat{\omega} \Psi_m) dt \quad (12)$$

El parámetro ajustable (la velocidad), ajusta el modelo de adaptación con el fin de impulsar el error de salida entre los dos modelos a cero. El error de los dos modelos es la entrada a un controlador PI, que se utiliza para ajustar la velocidad tal que el error se hace cero. El

observador descrito es sensible a los parámetros del motor, especialmente a la resistencia del estator. Una variación del 20% de la resistencia del estator puede producir un error de estimación importante [8][9].

#### d) Estimador basado en el observador de Luenberger

El observador de Luenberger estima las variables de estado del motor de inducción según:

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = \hat{A}\hat{x} + Bv_s + G(\hat{i}_s - i_s) \quad (13)$$

$$\hat{\omega}_r = K_P[(i_s - \hat{i}_s) \times \hat{\lambda}_r] + K_I \int (\hat{i}_s - i_s) \times \hat{\lambda}_r dt \quad (14)$$

El mecanismo de adaptación se realiza según:

$$G = - \begin{bmatrix} g_1 I + g_2 \\ g_3 I + g_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$g_1 = -(k-1) \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1}{\sigma \tau_r} \right) \quad (16)$$

$$g_2 = (k+1) \hat{\omega}_r \quad (17)$$

$$g_3 = (k^2 - 1) \left\{ - \left[ \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right] \frac{\sigma L_s L_m}{L_r} + \frac{L_m}{\tau_r} \right\} + \sigma L_s \frac{L_m}{L_r} (k-1) \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right) \quad (18)$$

$$g_4 = -(k-1) \hat{\omega}_r \frac{\sigma L_s L_m}{L_r} \quad (19)$$

A pesar de la mayor cantidad de cálculos necesarios para este estimador en comparación con los estimadores mediante Modelo de Referencia Adaptativo estudiados anteriormente, el tiempo de muestreo conseguido sigue siendo relativamente óptimo, tomando en cuenta las consideraciones de la misma [6].

#### e) Estimador basado en el filtro de Kalman

El observador simplificado de Kalman (OSK) surge del clásico estimador de Luenberger con la particularidad de que su sintonización está basada en el filtro de Kalman. A diferencia del observador basado en el filtro extendido Kalman, estudiado en [10] y no evaluado

experimentalmente debido a su compleja programación en cuanto a la manipulación matricial se refiere. Una vez conocido el diseño de observadores con la aplicación del filtro extendido de Kalman, es posible realizarle modificaciones, de tal manera que su desempeño sea igualmente notable con respecto a otras técnicas, pero simplificando su estructura y reduciendo el cálculo necesario para su uso. La simplificación del observador de Kalman fue propuesta por [11], donde la principal característica es el uso de una matriz de ganancia constante, a diferencia del filtro extendido, en el que se emplean métodos para el cálculo de su ganancia, obteniendo una simplificación considerable del procesamiento matemático y del vector de variables estimadas. Este algoritmo del filtro simplificado también es utilizado con otras técnicas sensorless como es el caso de [12] donde es utilizado como filtro digital con la técnica de modos deslizantes. Finalmente el conjunto de ecuaciones que definen el estimador son mostradas en las ecuaciones (20)-(23).

$$\varepsilon(k) = y_2(k) \cos \hat{\theta}(k) - y_1(k) \sin \hat{\theta}(k) \quad (20)$$

$$\hat{\theta}(k+1) = [\hat{\theta}(k) + T_s \hat{\omega}(k) + k_{e1} \varepsilon(k)] \quad (21)$$

$$\hat{\omega}(k+1) = \hat{\omega}(k) + \dot{\omega}(k) + k_{e2} \varepsilon(k) \quad (22)$$

$$\dot{\omega}(k+1) = \dot{\omega}(k) + k_{e3} \varepsilon(k) \quad (23)$$

También existe el filtro de Kalman extendido (EKF) es un estimador estocástico óptimo del sistema de estados que puede ser usado para la estimación de parámetros en sistemas no lineales a partir de señales perturbadas con ruido aleatorio. Su uso es principalmente para estimar las variables de estado de un motor de inducción, incluida la velocidad, se describe a continuación:

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d(k) u(k) \quad (24)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (25)$$

Siendo:

$$A_d = e^{AT} \approx I + AT + \frac{(AT)^2}{2} \quad (26)$$

Este estimador tiene como gran inconveniente el costo que presenta en cuanto a número de operaciones a realizar en cada tiempo de muestreo. Esto obliga a emplear un tiempo de muestreo muy grande en comparación con los métodos anteriores, del orden de 8 veces mayor, lo que empeora la convergencia del estimador. Otro inconveniente es la presunción de que las variables medidas (voltajes y corrientes) tienen una componente de ruido esencialmente blanco, lo que en un motor de inducción controlado a través de un inversor no es totalmente cierto (los voltajes y corrientes tienen una componente de ruido muy importante asociada a la frecuencia de conmutación de los interruptores de potencia y sus armónicos). De allí que para los GSIP se utilice el OSK y casi no se halla implementado el EKF, aunque si hay algunos estudios.

#### f) Observador por Modos Deslizantes

La técnica de sensorless mediante modos deslizantes (OMD) se deriva de las estrategias de control no lineal en sistemas de estructura variable [13], utilizando las ecuaciones de estado del sistema para estimar la fuerza electromotriz inducida. Existen diversos estudios sobre estimadores de velocidad utilizando modos deslizantes, [14][15][16]. En particular, ha sido utilizado junto con técnicas de filtrado adaptativo para mejorar su desempeño en la estimación a baja velocidad y estimación de la posición ante variaciones en la velocidad de rotación. Donde el modelo está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} z_\alpha \\ z_\beta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$e_\alpha = z_\alpha \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (28)$$

$$e_\beta = z_\beta \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (29)$$

$$\hat{\theta} = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{e}_\beta}{\hat{e}_\alpha} \right) + \Delta\hat{\theta} \quad (30)$$

$$\hat{\omega} = \frac{d\hat{\theta}}{dt} \quad (31)$$

El observador OMD es de los que menor costo computacional implica.

#### g) Estimación basada en las propiedades no lineales

Los estimadores basados en propiedades no lineales aplicados a motores de inducción propios por su principio de funcionamiento y poco explotados en los GSIP. Si se desea estimar la velocidad cuando la frecuencia de funcionamiento es pequeña, hay que recurrir a efectos no lineales del motor de inducción no descritos en las ecuaciones de estado. Estos efectos se derivan de la forma constructiva de la máquina (en barrado del rotor, distribución de los devanados) y de la saturación magnética.

En los siguientes subapartados se describen alguno de estos efectos y como utilizarlos para estimar la velocidad.

#### i. Estimación basada en los armónicos debidos del estator y el rotor

En un motor de inducción la interacción entre la distribución del bobinado del estator y las barras del rotor producen armónicos en el flujo del entrehierro, lo que los induce a su vez en el voltaje del estator (y por consiguiente en la corriente) cuando el rotor gira. La ventaja del uso de estas técnicas para la medida de la velocidad se basa en que los parámetros del motor de inducción no tienen influencia alguna en la precisión de la medida, a diferencia de los métodos basados en las ecuaciones del motor de inducción.

Por el contrario, el escaso número de ranuras existente en la mayoría de los motores normalmente utilizados en la industria limita el comportamiento dinámico de la estimación así como la precisión obtenida. Hay que destacar también el hecho de la dependencia de los armónicos generados por el ranurado con las condiciones de carga del sistema, dificultando enormemente la estimación de la velocidad en condiciones de vacío.

## ii. Estimación basada en la componente de tercer armónico del voltaje del estator debida a la saturación

Como todos los métodos de estimación basados en efectos no lineales del motor de inducción, el método expuesto presenta la ventaja de ser completamente independiente de los parámetros del mismo. Sin embargo, no hay constancia en la literatura acerca del correcto funcionamiento de estas técnicas. Resulta complicado extraer la información del flujo de la componente de tercer armónico debida a la saturación. Existen numerosas máquinas en las que ésta componente resulta pequeña e incluso indetectable.

Para solucionar este problema, se recurre a modificar la construcción del motor de inducción para que presente un mayor contenido de tercer armónico debido a la saturación, o bien, se inyectan unas componentes de alta frecuencia adicionales en las corrientes.

La primera solución limita el uso de estos estimadores a motores especialmente construidos, mientras que la segunda complica el control de corrientes, aumenta el contenido en armónicos del par y por tanto en la velocidad de giro. Este método sólo permite estimar el vector flujo, debiéndose complementar con algún otro si se desea estimar además la velocidad.

## iii. Estimación de velocidad basada en variaciones de la inductancia de fugas

Este método permite de una forma precisa estimar la posición y velocidad en motores de inducción siempre que ésta sea cercana a cero. En la bibliografía no aparecen resultados del estimador en la zona de velocidades altas.

Otro inconveniente que presenta es la necesidad de modificar el control de corrientes.

PWM esta modificación supone además, la inyección de armónicos en las corrientes del estator. También presenta cierta dificultad la estimación cuando se trabaja en condiciones de pares de carga elevados en los que presente

componentes subarmónicos de frecuencia  $2N$  debidos a la saturación magnética.

## h) Estimadores basados en Inteligencia Artificial (I.A)

Las dos principales soluciones basadas en inteligencia artificial utilizadas para la estimación de la velocidad están basadas en las redes neuronales (ANN) y las redes difusas-neuronales (FNN).

Los estimadores de velocidad basados en inteligencia artificial forman un campo extremadamente novedoso, que requiere de una investigación más profunda acerca de sus posibilidades. A menos que se utilicen redes neuronales muy sencillas, la complejidad del algoritmo aumenta considerablemente, requiriéndose además un entrenamiento previo, que debe realizarse para cada tipo de motor. Esto último dificulta su aplicación industrial al precisar de operarios muy cualificados para el ajuste del controlador. Los observadores basados en lógica difusa resultan asimismo extremadamente complejos y precisan de una optimización previa muy compleja para cada tipo de motor.

## i) Estimadores Phase Locked Loop trifásico (PLL).

La técnica PLL es utilizada ampliamente en aplicaciones de rectificadores trifásicos controlados, inversores [17]-[20] y también en aplicaciones de energía eólica [21]-[22] para generadores sincrónicos de imanes permanentes y generadores de inducción de doble devanado. En esta técnica, también llamada dqPLL, la utilización del sistema de referencia síncrono mediante la transformada de Park, permite estimar de manera sencilla la velocidad y posición angular de la señal de referencia. Las variables de entrada del PLL trifásico en aplicaciones de sensorless, pueden ser el flujo magnético del GSIP estimado o la fuerza electromotriz inducida. La primera, posee las ventajas de la técnica de control *Virtual flux Oriented Control* (VFOC), donde se obtiene una señal de referencia con menor ruido [23] y una

señal sinusoidal de amplitud constante. La segunda, utiliza la técnica *Voltage Oriented Control* (VOC), que toma como variable de entrada la fuerza electromotriz inducida en el GSIP, teniendo armónicos de alta frecuencia producidos por la conmutación del convertidor asociado a la máquina.

Debido a lo anteriormente expuesto, se prefiere la estimación de flujo magnético inducido en el GSIP, para esto es necesario realizar la integral de la fuerza electromotriz inducida, estimada mediante la ecuación (32), donde  $(\hat{e}_a, \hat{e}_b, \hat{e}_c)$  es el vector de la fuerza electromotriz inducida, en el sistema de referencia  $abc$ , por los imanes permanentes.

$$\begin{pmatrix} \hat{e}_a \\ \hat{e}_b \\ \hat{e}_c \end{pmatrix} = \mathbf{r}_s \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \mathbf{L} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad (32)$$

Finalmente la estimación del flujo magnético dado por los imanes permanentes se consigue mediante la ecuación (33).

$$\begin{pmatrix} \hat{\Psi}_a \\ \hat{\Psi}_b \\ \hat{\Psi}_c \end{pmatrix} = \int \begin{pmatrix} \hat{e}_a \\ \hat{e}_b \\ \hat{e}_c \end{pmatrix} dt \quad (33)$$

En la implementación digital de la técnica PLL, se presenta el problema de obtener errores residuales o drift en la integral de la ecuación (33) con señales de entradas sinusoidales desbalanceadas o con componentes continuas transitorias.

Este problema es resuelto mediante la sustitución de la integral por un filtro pasa bajo con una frecuencia de corte menor a la frecuencia mínima de operación de la señal de entrada, esta solución es utilizada en [24]. El controlador utilizado por esta técnica es generalmente un clásico regulador PI, aunque en algunas aplicaciones también se agregan filtros adicionales para suprimir en la señal de sincronización algún armónico de interés [25].

#### IV. Resultados

Derivado del análisis realizado se obtienen los siguientes resultados:

- Salvo el estimador basado en las variaciones de la inductancia de fugas con la posición del rotor, ninguno permite la estimación a velocidades próximas a cero. Sin embargo, no existen en la bibliografía resultados que determinen si este estimador funciona correctamente cuando la velocidad es elevada.
- Los estimadores basados en las ecuaciones estáticas sólo estiman la velocidad correctamente en condiciones estáticas de funcionamiento, no siendo adecuados para su aplicación en controladores de motores y generadores de altas prestaciones.
- Los estimadores basados en la saturación magnética y el ranurado del rotor sólo pueden aplicarse a máquinas especialmente construidas o modificando el control de corrientes con la inyección de componentes de alta frecuencia. Además presentan un ancho de banda limitado.
- Los estimadores basados en las ecuaciones de estado son muy sensibles a los parámetros del motor y del generador y presentan una estimación ruidosa y oscilatoria.
- Los métodos que emplean el modelo de referencia de adaptación son menos sensibles a variaciones a los parámetros, que los estimadores anteriores, permiten un funcionamiento a velocidades sensiblemente más bajas y son extremadamente simples.
- Los métodos basados en el estimador de orden completo o Luenberger presentan las mejores características generales en cuanto a la estimación del flujo y la velocidad. Por contra, son complejos y precisan de una mayor capacidad de cálculo que los que emplean el modelo de referencia de adaptación del observador.
- Los métodos basados en el filtro de Kalman extendido prometen unos

resultados óptimos en cuanto a la estimación de la velocidad y el flujo, sin embargo, su extremada complejidad aritmética imposibilita su uso en la actualidad, debido a su alto cálculo computacional.

- Los métodos basados en el observador simplificado de Kalman son una reducción del filtro de Kalman extendido en donde se establece una ganancia estática, la ventaja que presentan es que se reduce considerablemente el costo computacional y se pueden implementar en DSPs.
- Los métodos basados en inteligencia artificial deben todavía de estudiarse con mayor profundidad. Son menos sensibles a variaciones en los parámetros, pero la

implementación de un buen estimador precisa de un número de neuronas elevado, lo que resulta costoso en tiempo de cálculo y requieren de un aprendizaje previo para cada motor a controlar.

- Los métodos basados en el Phase Lock Loop tienen una buena prestación, sin embargo, son sensibles al ruido en la entrada y presentan oscilaciones en la señal de salida, el cálculo computacional es bajo.
- La Tabla 1 muestra un comparativo entre los diferentes estimadores estudiados, donde se considera la complejidad, el costo computacional, la estabilidad y el desempeño.

Tabla 1 Comparativa de Estimadores de Velocidad

Estimador	Complejidad	Costo Computacional	Estabilidad	Desempeño	Potencia
Modelo estático	Simple	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Estimador de Bucle abierto	Medio	Bajo	Alto	Bajo	Medio
Modelo de Referencia de Adaptación	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio
Luenberger	Alto	Bajo	Medio	Medio	Medio
Observador Simplificado de Kalman	Medio	Bajo	Alto	Alto	Medio
Filtro de Kalman Extendido	Alto	Alto	Bajo	Medio	Alto
Observador en Modo Deslizante	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Propiedades no Lineales	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Bajo
Inteligencia Artificial	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio
Phase Lock Loop	Medio	Medio	Medio	Alto	Medio

## V. Conclusiones

Este estudio permite hacer un análisis de los diversos estimadores de velocidad que se emplean en generadores síncronos, además también se analizan algunos que se emplean en generadores de inducción de manera de poderse implementar en generadores síncronos en estudios posteriores. Considerando la gran variedad de métodos existentes, basados en efectos muy diversos y con filosofías de estimación que cubren amplios campos de investigación por sí solas. El estudio presenta como aportación un análisis crítico acerca de las prestaciones que puede ofrecer cada

método. Estos estimadores de velocidad permiten aplicar técnicas sensorless en sistemas de generación eólica, permitiendo reducir los sensores mecánicos. Los resultados enmarcan las ventajas y desventajas de cada uno de ellos y permiten facilitar la selección de cada uno de ellos para su aplicación en un sistema de generación eólica.

## VI. Referencias

- [1] Malinowski M, Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers, Ph.D., Dissertation, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland.

- [2] Kwon BH, Youm JH, Lim JW, A Line-Voltage-Sensorless Synchronous Rectifier, *IEEE Trans Power Electronics* 1999;14(5):966-972.
- [3] Hinkkanen M, Flux Estimators for Speed Sensorless Induction Motor Drives, Ph.D. Dissertation, Helsinki University of Technology, 2004.
- [4] Yousfi D, Halelfadl A, El Kard M. Review and evaluation of some position and speed estimation methods for PMSM sensorless drives. In: *International Conference on Multimedia Computing and Systems, ICMCS '09*, Chennai, India; April 2-4, 2009.
- [5] Mora JL. Aportaciones al control vectorial es de motores de inducción y su realización integrada. Ph.D., Disertation, Universidad de Sevilla, Spain 2001.
- [6] Morales LG, “Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable” Universidad de valencia, Mayo 2011
- [7] R. Esmaili, and L. Xu, “Sensorless Control of Permanent Magnet Generator in Wind Turbine Application,” *IEEE Industry Applications Conference Annual Meeting*, pp. 2070 – 2075.vol.4, Oct. 2006
- [8] J. Brahmi et al., A comparative study between three sensorless control strategies for PMSG in wind energy conversion system, *Appl Energy*, 2008
- [9] M. Oana Mora, F. Lov, U. Jakobsen, “Sensorless vector control of PMSG for wind turbine applications”, Master Thesis, PED4-1038B, 03rd June 2009.
- [10] Gonzalez LG et al. Synchronization techniques comparison for sensorless control applied to Wind Energy Conversion Systems (WECS), In: *13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2009*, Barcelona, Spain; September 8-10, 2009.
- [11] Harnefors L. Speed estimation from noisy resolver signal. In: *6th international conference on power electronics and variable speed drives, PEVD'96*, Nottingham, England; September 23-25, 1996.
- [12] Sheng Z, Xiafu P. A Modified Direct Torque Control Using Space Vector Modulation (DTC-SVM) for Surface Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) with Modified 4-order Sliding Mode Observer, In: *International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007*, Heilongjiang, China; August 5-8, 2007.
- [13] Utkin V, Guldner J, Shi J. *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. Columbus, USA: CRC press; 2009.
- [14] Zhuang X, Pengyao G, Dianguo X, High performance control of a permanent magnet wind power generation system using an adaptive sliding observer. In: *8th International Conference Power Electronics and Drive Systems 2009. PEDS 2009*. Taipei, Taiwan; November 2-5, 2009.
- [15] Song C, Zheng Z, Longya X. Sliding-Mode Sensorless Control of Direct-Drive PM Synchronous Motors for Washing Machine Applications, *Industry Applications, IEEE Trans Trans Industry Applications* 2009;45(2):582-590.
- [16] Foo GH, Rahman MF. Direct Torque Control of an IPM-Synchronous Motor Drive at Very Low Speed Using a Sliding-Mode Stator Flux Observer, *IEEE Trans Power Electronics* 2010;25(4):933-942.
- [17] Rodriguez P et al. Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control, *IEEE Trans Power Electronics* 2007;22(2):584-592.
- [18] Amuda LN et al. Wide bandwidth single and three-phase PLL structures for grid-tied PV systems, In: *28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2000*, Anchorage, Alaska; September 17-22, 2000.
- [19] Moreno VM, Liserre M, Pigazo A, Dell'Aquila A. A Comparative Analysis of Real-Time Algorithms for Power Signal Decomposition in Multiple Synchronous Reference Frames, *IEEE Trans Power Electronics* 2007;22(4):1280-1289.
- [20] Se-Kyo Chung. A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters, *IEEE Trans Power Electronics* 2000;15(3):431-438.
- [21] Baike S, Mwinyiwiwa B, Yongzheng Z, Boon-Teck O. Sensorless Maximum Power Point Tracking of Wind by DFIG Using Rotor Position Phase Lock Loop (PLL), *IEEE Trans Power Electronics*. 2009;24(4):942-951.
- [22] Jiao L, Heng N, Jiawen L, Rong Z. Sensorless control of PMSG for wind turbines based on the on-line parameter identification. In: *12th Electrical Machines and Systems, ICEMS 2009*, Tokyo, Japan; November 15-18, 2009.

- [23] Malinowski M, Kazmierkowski MP, Trzynadlowski AM. A Comparative Study of Control Techniques for PWM Rectifiers in AC Adjustable Speed Drives, IEEE Trans Power Electronics 2003;18(6):1390-1396.
- [24] Can H, Akin E, Bulent Ertan H. A new integration algorithm for flux estimation using the voltage model, Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2002; 21(2): 252–264.
- [25] Karimi-Ghartemani M, Iravani MR. A Method for Synchronization of Power Electronic Converters in Polluted and Variable-Frequency Environments, IEEE Trans Power Systems. 2004;19(3),1263-1270.

## **VII. Autores**

**Sergio Cortes Gutiérrez** es estudiante de noveno semestre de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices en la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional, Becario PIFI.

**José Álvaro Frutos Martínez** estudiante de noveno semestre de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices en la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional, Becario PIFI.

**Dr. Oscar Carranza Castillo** es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, con especialidad en Electrónica en la ESIME del Instituto Politécnico Nacional, es Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica con especialidad en Instrumentación en la ESIME del Instituto Politécnico Nacional y obtuvo su doctorado en ingeniería electrónica en enero del 2012 en la Universidad Politécnica de Valencia. Desde 1999 es Profesor Investigador en la Escuela Superior de Cómputo de tiempo completo su área de especialidad es electrónica de potencia aplicada energías renovables. Becario COFAA.

**M. en C. Ruben Ortega Gonzalez** es Ingeniero en Eléctrica, en la ESIME del Instituto Politécnico Nacional, es Maestro en Ciencias en Ingeniería en Sistemas en la ESIME del Instituto Politécnico Nacional y esta estudiando su doctorado en ingeniería electrónica en la Universidad Politécnica de Valencia. Desde 1997 es Profesor Investigador en la Escuela Superior de Cómputo de tiempo completo su área de especialidad es electrónica de potencia aplicada energías renovables. Becario COFAA.