

Auto calibración de encoder para el control de un generador eoloeléctrico basado en una máquina de inducción doblemente alimentada

Encoder auto calibration for the control of a wind generator based on a doubly fed induction machine

CALDERÓN, Gabriel†*, MINA, Jesús, HERNÁNDEZ, Oscar y LÓPEZ, Adolfo

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internadao Palmira S/N, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor., México.

ID 1^{er} Autor: *Gabriel, Calderón*

ID 1^{er} Coautor: *Jesús, Mina*

ID 2^{do} Coautor: *Oscar, Hernández*

ID 3^{er} Coautor: *Adolfo, López*

DOI: 10.35429/JEE.2020.13.4.21.28

Recibido Julio 30, 2020; Aceptado Diciembre 30, 2020

Resumen

Para los generadores eoloeléctricos (Wind Energy Conversion Systems: WECSs), muchas propuestas se han desarrollado respecto al control, e.g. de la potencia activa/reactiva en un WECS interconectado a red. Algunos esquemas de control, como es el control vectorial que está basado en las transformaciones entre marcos de referencia ($abc \rightarrow dq$), suelen hacer uso de la velocidad y/o de la posición mecánica, así como de la posición angular del circuito rotórico. Dado que la posición del circuito rotórico no se puede obtener de manera directa, éste se suele calcular a partir de la posición generada por el encoder; sin embargo, la posición cero del encoder con la de los devanados del rotor generalmente no coincide. Este error crea problemas serios en el desempeño de los controladores del WECS, derivando incluso en daños severos. En este sentido, este trabajo aborda un algoritmo que permite determinar el error de posición de manera automática para su adecuada corrección dentro de los esquemas de control. De manera particular este algoritmo de corrección se prueba en un WECS basado en Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG), un convertidor back-to-back y control vectorial. Las pruebas se hacen a nivel simulación usando PSIM, para un WECS de 1/2HP.

Generador Eoloeléctrico, DFIG, Convertidor Back-to-Back, Control Vectorial, Encoder, Calibración

Abstract

For WECS (Wind Energy Conversion Systems), many proposals have been developed about the control, e.g. of active/reactive power in a grid-interconnected WECS. Some control schemes, such as vector control which is based on the transformations between reference frames ($abc \rightarrow dq$), often use the speed and/or the mechanical position, as well as the angular position of the rotor circuit. Since the position of the rotor circuit cannot be obtained directly, it is usually calculated from the position generated by the encoder; however, the zero position of the encoder with the position of the rotor windings generally do not match. This error leads to serious problems in the performance of the WECS controllers, deriving even in severe damages. In this sense, this paper proposes an algorithm to determine the position error automatically for appropriate correction within the control schemes. In particular this correction algorithm is tested in a WECS based on doubly fed induction generator (DFIG), a back-to-back converter and vector control. Tests are made in a simulation context using PSIM for a 1/2 HP WECS.

WECS, DFIG, Back-to-back Converter, Vector Control, Encoder, Calibration

Citación: CALDERÓN, Gabriel, MINA, Jesús, HERNÁNDEZ, Oscar y LÓPEZ, Adolfo. Auto calibración de encoder para el control de un generador eoloeléctrico basado en una máquina de inducción doblemente alimentada. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2020. 4-13:21-28.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: gcalderon@cenidet.edu.mx)

Nomenclatura

v_a, v_b, v_c – voltajes trifásicos

$v_d, v_q, v_\alpha, v_\beta$ – voltajes bifásicos

i_a, i_b, i_c – corrientes trifásicas

i_d, i_q – corrientes bifásicas

ω_s – frecuencia angular del marco de referencia dq del estator

ω_r – frecuencia angular del marco de referencia dq del rotor

P, Q – potencia activa y reactiva

θ_m – posición angular mecánica del rotor

θ_{enc} – posición angular mecánica del encoder

θ_{cor} – diferencia de posición angular entre la posición del encoder y del eje del rotor

θ_r – posición angular entre el marco de referencia $\alpha\beta$ y el dq del rotor

$\lambda_d, \lambda_q, \lambda_\alpha, \lambda_\beta$ – enlaces de flujo bifásicos

r_s, r_r – resistencias de estator y de rotor

L_l, L_r, L_m – inductancias de estator, rotor y mutua

Introducción

El Sistema de Conversión de Energía Eólica (*Wind Energy Conversion System: WECS*), el cual se conforma de un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (*Doubly Fed Induction Generator: DFIG*) y un convertidor electrónico de potencia *back-to-back* es el más utilizado en la actualidad de acuerdo con (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2012*). Algunas de las principales características de esta configuración son: que puede entregar a la red una potencia superior a la potencia nominal de la máquina a velocidades super-síncronas y que la potencia manejada por el convertidor oscila alrededor del 30% de la potencia nominal de la máquina; lo cual hace a esta configuración económicamente atractiva (*Vidal, Abad, Arza, & Aurtenechea, 2013*). El esquema general de esta configuración se ilustra en la Figura 1.

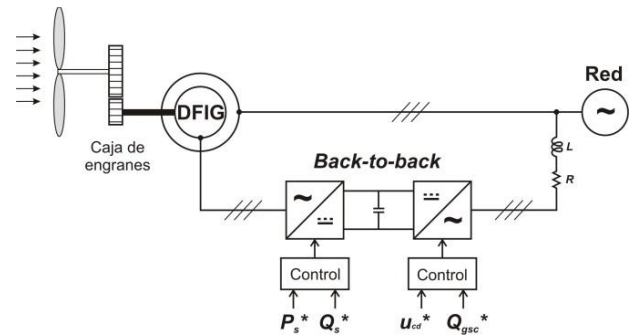


Figura 1 WECS de velocidad variable con convertidor de frecuencia de escala parcial

En el caso de WECS interconectados a red, los objetivos básicos de control suelen ser (*Munteanu, Cutululis, Bratcu, & CeangĂ, 2008; Wright & Fingersh, 2008*): seguimiento del punto de máxima potencia y manejo de la transferencia de energía entre el WECS y la red eléctrica (control de potencia activa y reactiva). Respecto al último objetivo de control, la técnica más utilizada en máquinas de CA para aplicaciones eólicas es el *control vectorial* (*Abad, López, Rodríguez, Marroyo, & Iwanski, 211AD*). El control vectorial se basa en la representación del modelo y variables del generador eléctrico, en un sistema coordenado bifásico dq , que se caracteriza por ser ortogonal. Esta representación bifásica permite el diseño de controladores desacoplados para las corrientes y con diversos objetivos de control, que resultan ser muy precisos, tanto en estado estable como en estado transitorio (*Ademi & Jovanovic, 2014; Pena, Clare, & Asher, 1996*), (*Pena et al., 1996*), (*Calderón, Mina, Calleja, & Adolfo, 2014*).

Como se mencionó, el control vectorial está basado en las transformaciones entre marcos de referencia ($abc \rightarrow dq$), en donde un aspecto clave es la determinación del ángulo del vector del marco de referencia.

Muchas propuestas de control vectorial de WECS requieren de la posición angular del circuito rotórico, sin embargo, ésta no se puede obtener de manera directa y se suele calcular a partir de la posición mecánica provista por un encoder. A pesar de que la idea es sencilla y válida, no obstante, la posición cero del encoder con la de los devanados del rotor generalmente no coincide, lo cual genera un *error de posición* que no es fácil determinar y que se propaga en todas las transformaciones de coordenadas y en el sistema de control, deteriorando el desempeño de los controladores e incluso provocando daños severos en el WECS.

Uno de los enfoques que sobresalen en la literatura para determinar la correcta posición y velocidad mecánica es el llamado *sensorless*, que se basa en estimadores diseñados a partir de los parámetros y variables eléctricas de la máquina (Ataji, Miura, Toshifumi, & Tanaka, 2016), (Mwinyiwiwa, Zhang, Shen, & Ooi, 2009); sin embargo, sus inconvenientes son que el diseño de estos estimadores es complejo y demanda altos recursos computacionales, además de que son susceptibles a variaciones paramétricas y errores de medición. Por otra parte, existen opciones en donde se sigue haciendo uso de un encoder pero se recurre a un mecanismo de calibración basado en las variables eléctricas de la máquina, uno de estos ejemplos es el de (Konghirun, 2005), sin embargo, como éste, la información que proveen sobre el mecanismo de calibración es muy vaga.

En este sentido, en este trabajo se aborda la calibración de un encoder tipo incremental, tomando en consideración que para el control del WECS se hace uso de la técnica de *control vectorial*. Esto es importante, puesto que el mecanismo de auto-calibración propuesto se basa en la teoría de los marcos de referencia.

Por otro lado, también se resalta que dicho mecanismo lleva a cabo la auto-calibración del encoder en la etapa del arranque del WECS.

El trabajo está organizado como sigue. En la sección 2 se aborda el modelado del DFIG. En la sección 3 se proveen los argumentos teóricos sobre la necesidad de la calibración del encoder, así como la explicación del esquema de auto-calibración propuesto. En la sección 4 se llevan a cabo pruebas de simulación implementadas en PSIM para evaluar el funcionamiento del esquema de calibración propuesto. Finalmente, en la sección 5 se dan las conclusiones del trabajo.

Modelado del DFIG

De acuerdo con el modelo trifásico del DFIG dado en (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 2002) y que se omite aquí por razones de espacio, éste puede re-escribirse en un marco de referencia arbitrario dq , tal y como se muestra en (1).

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} + \lambda'_{ds} \\
 v_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} + \lambda'_{qs} \\
 v_{dr} &= r_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} + \lambda'_{dr} \\
 v_{qr} &= r_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} + \lambda'_{qr} \\
 \lambda_{ds} &= (L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms}) i_{ds} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{dr} \\
 \lambda_{qs} &= (L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms}) i_{qs} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qr} \\
 \lambda_{dr} &= (L_{lr} + \frac{3}{2} L_{ms}) i_{dr} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{ds} \\
 \lambda_{qr} &= (L_{lr} + \frac{3}{2} L_{ms}) i_{qr} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{qs}
 \end{aligned} \tag{1}$$

El objetivo de emplear un modelo dq en lugar del modelo trifásico, es para facilitar el diseño de los controladores, ya que al aplicar la transformación ($abc \rightarrow dq$), se obtiene un modelo dinámico de dos fases (componentes) y se logra el desacoplamiento de ciertas variables de interés, lo cual permite eliminar dependencias existentes en el modelo abc .

Calibración del encoder

De acuerdo con el esquema del WECS de la Figura 1, el propósito del RSC es controlar la potencia activa y reactiva del devanado del estator en un amplio margen de velocidades de la máquina, tanto por encima como por debajo de la velocidad de sincronismo. De forma similar, el control del GSC se encarga de mantener el voltaje del bus de cd en un nivel constante, al mismo tiempo que mantiene regulada la potencia reactiva a la salida del convertidor.

Considerando un sistema WECS donde todos los objetivos de control se logran mediante el uso del control vectorial, la orientación del modelo a un marco de referencia particular, así como las transformaciones entre marcos de referencia $abc \leftrightarrow dq$ cobran importante relevancia. En este sentido, las transformaciones que involucran al marco de referencia arbitrario requieren de la variable θ_r (para el caso del RSC), tal y como se puede apreciar en la Figura 2. Un valor erróneo de θ_r ocasionará que el desempeño de los controladores, y en consecuencia de todo el sistema WECS, sea severamente deficiente, pudiendo ocasionar, en el peor de los casos, averías en la DFIG o en el convertidor.

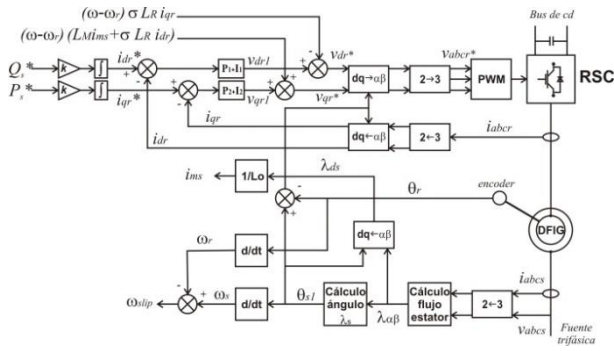


Figura 2 Esquema de control del RSC empleando el marco de referencia orientado al flujo del estator
Fuente: Basado en (Calderón et al., 2014)

Los errores en el valor de la variable θ_r surgen en el acoplamiento mecánico del encoder con la flecha del rotor del DFIG. Al llevar a cabo este acoplamiento es casi improbable que la posición cero del encoder coincida con la posición cero de los devanados trifásicos del rotor (véase Figura 3). La alineación entre estas dos posiciones cero es importante para la adecuada implementación de las transformaciones entre los diferentes marcos de referencia.

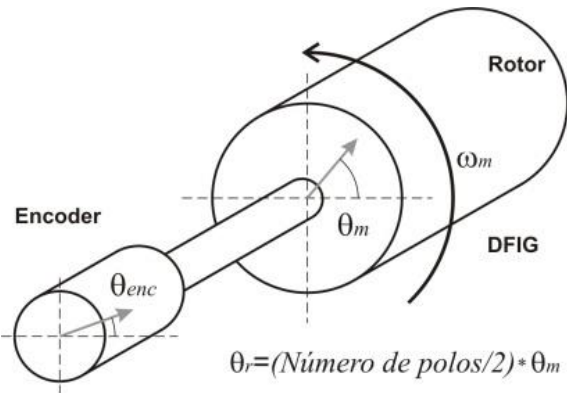


Figura 3 Representación de las alineaciones del encoder con el eje de los devanados de rotor

En la Figura 4a se puede observar un diagrama vectorial en el cual se aprecian las posiciones teóricas ideales de las variables eléctricas del rotor en los diferentes marcos de referencia. La atención se centra en la posición angular θ_r , ya que ésta es fundamental en el control vectorial del RSC.

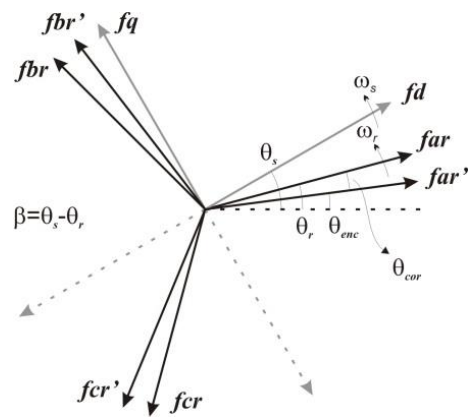
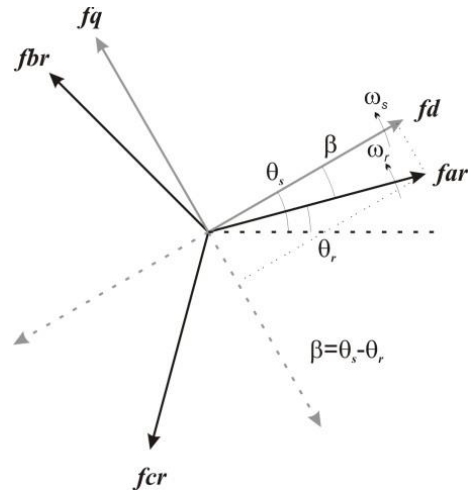


Figura 4 Representación vectorial de las variables del rotor. (a) Sin error de posición. (b) Con error de posición

Por otra parte, en la Figura 4b se puede observar el diagrama vectorial que se deriva de un acoplamiento donde la posición cero del encoder no se encuentra alineada con la posición cero de los devanados del rotor. En este sentido, es necesario determinar el error de posición (θ_{cor}) y usarse como un ángulo de corrección al momento de llevar a cabo las transformaciones entre marcos de referencia.

El mecanismo de auto-calibración que se propone está basado en un procedimiento de prueba sobre la DFIG, que se lleva a cabo en la etapa de arranque y se centra en el análisis de algunas de las variables del circuito rotórico y del estator. Las condiciones de dicha prueba son las que se listan a continuación:

- Se establece un voltaje trifásico constante en terminales de rotor. No se requiere definir un valor en particular.
- La velocidad mecánica aplicada al DFIG debe ser constante. No se requiere definir un valor en particular.

- Los devanados de estator deben estar en condiciones de circuito abierto (sin carga o sin flujo de corriente). Es decir, la máquina describe un comportamiento similar al de un transformador, por lo que la tensión en terminales de estator es un voltaje inducido debido al voltaje en terminales de rotor.

Con la máquina trabajando bajo dichas condiciones de operación, el cálculo del ángulo del rotor se basa en la estimación del flujo de rotor mediante dos métodos. En el *primer método* se toman en cuenta las ecuaciones de λ_{dr} y λ_{qr} dadas en (1), las cuales se re-escriben aquí:

$$\begin{aligned}\lambda_{dr} &= (L_{lr} + \frac{3}{2}L_{ms})i_{dr} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{ds} \\ \lambda_{qr} &= (L_{lr} + \frac{3}{2}L_{ms})i_{qr} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{qs}\end{aligned}\quad (2)$$

Dado que no hay flujo de corriente a través del estator, la expresión (2) se reduce a:

$$\begin{aligned}\lambda_{dr} &= (L_{lr} + \frac{3}{2}L_{ms})i_{dr} \\ \lambda_{qr} &= (L_{lr} + \frac{3}{2}L_{ms})i_{qr}\end{aligned}\quad (3)$$

A partir de la cual se puede obtener el ángulo del rotor como sigue

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_{qr}}{\lambda_{dr}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_{\beta r}}{\lambda_{\alpha r}}\right)\quad (4)$$

Nótese de (4) que θ_1 se puede calcular en términos de las variables dq o en términos de las variables $\alpha\beta$ del marco estacionario, el cálculo es indistinto dado que las variables de rotor son vistas como un marco de referencia estacionario.

Por otra parte, considerando las expresiones para el flujo de estator dadas en (1) y que se reescriben aquí

$$\begin{aligned}\lambda_{ds} &= (L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ms})i_{ds} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{dr} \\ \lambda_{qs} &= (L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ms})i_{qs} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{qr}\end{aligned}$$

Éstas también pueden reducirse tomando en consideración que $i_{ds} = i_{qs} = 0$, resultando

$$\begin{aligned}\lambda_{ds} &= \frac{3}{2}L_{ms}i_{dr} \\ \lambda_{qs} &= \frac{3}{2}L_{ms}i_{qr}\end{aligned}\quad (5)$$

Hasta aquí, es importante observar que tanto los flujos de rotor como de estator expresados en (3) y (5) se calculan en función de i_{dr} e i_{qr} ; lo cual se traduce en que los correspondientes vectores espaciales λ_s y λ_r serán de diferentes magnitudes, pero *ambos estarán en fase*. Lo anterior puede apreciarse de manera visual mediante el diagrama vectorial de la Figura 5.

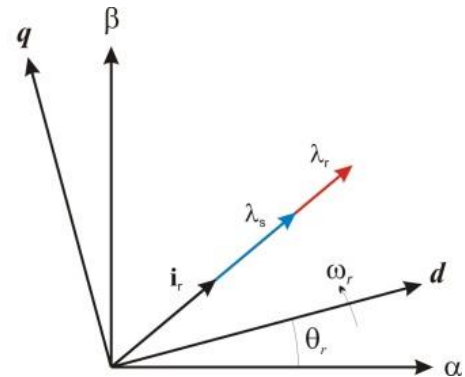


Figura 5 Alineación de los vectores de flujo de rotor y estator considerando corrientes de estator igual a cero

La conclusión más importante del análisis previo es, que, bajo las condiciones de la prueba propuesta, ambos vectores espaciales (λ_s y λ_r) poseen la misma posición angular, así es que el cálculo de la posición angular de uno u otro es indistinto y/o se puede calcular mediante variables de flujo de rotor por un lado, y mediante variables del flujo de estator por otro. Así, aquí se tomará como primer método el basado en las ecuaciones dadas en (3) y (4).

De acuerdo con lo mencionado previamente, como *segundo método* para estimar la posición del vector espacial del flujo del rotor, éste se lleva a cabo mediante las variables del flujo de estator; el cual se plantea en término de las ecuaciones $\alpha\beta$ del voltaje de estator dadas en (1). En este sentido, los flujos $\alpha\beta$ de estator se calcularían como sigue

$$\begin{aligned}\lambda_{\alpha s} &= \int (v_{\alpha s} - r_s i_{\alpha s}) dt \\ \lambda_{\beta s} &= \int (v_{\beta s} - r_s i_{\beta s}) dt\end{aligned}\quad (6)$$

Los cuales, debido a las corrientes cero en el estator, se reducen a

$$\begin{aligned}\lambda_{\alpha s} &= \int v_{\alpha s} dt \\ \lambda_{\beta s} &= \int v_{\beta s} dt\end{aligned}\quad (7)$$

Por otro lado, dado que los voltajes de estator son inducidos por los devanados de rotor, los cuales giran a una velocidad ω_r , entonces es necesario calcular las versiones dq del flujo de estator a partir de sus componentes $\alpha\beta$ mediante: $K_T(\theta_r): f_{\alpha\beta} \rightarrow f_{dq}$; a partir de las cuales se puede calcular el ángulo correspondiente de acuerdo con:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \right) \quad (8)$$

Con la definición de dos métodos diferentes para calcular el ángulo de la posición angular del vector del circuito rotórico, lo que se logra es que para el mecanismo de calibración, el primer método, ecuaciones (3) y (4), se usa como modelo de referencia; mientras que el segundo método, ecuaciones (7) y (8), se usa como un modelo de adaptación. El esquema del mecanismo de calibración se muestra en la Figura 6.

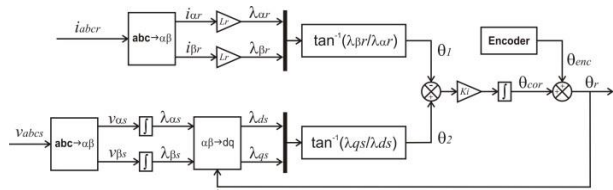


Figura 6 Diagrama a bloques para la calibración del encoder

En el modelo de adaptación, el ajuste se hace en la transformación $\alpha\beta \rightarrow dq$ del flujo de estator, el cual depende del ángulo θ_r ; el cual a su vez, depende del ángulo provisto por el encoder (θ_{enc}) y del ángulo de corrección (θ_{cor}). Cuando el modelo de adaptación converge, significa que se tiene una diferencia constante entre θ_1 y θ_2 , cuyo valor corresponde al ángulo θ_{cor} .

Finalmente, es preciso destacar que, una vez concluido el proceso de calibración, éste no tendrá que repetirse en caso de que todo el sistema WECS sea des-energizado; esto debido a que el encoder incremental cuenta con un pin, comúnmente llamado *Z Index*, el cual envía un pulso lógico cuando éste ha rotado una revolución. La presencia de este pulso atiende a una posición angular, la cual está físicamente definida por el hardware del encoder.

Resultados de simulación

A continuación, se muestran resultados de simulación implementados en el software PSIM para un WECS de velocidad variable basado en un DFIG de 1/2 HP, el cual es controlado mediante un convertidor del lado del rotor (RSC).

Para las pruebas de simulación se considera una velocidad mecánica de 2200 rpm y un voltaje de línea trifásico en devanados de rotor de 15 *Vrms*. Puesto que estamos tratando con pruebas de simulación, se establece intencionalmente un desfase de 1.5 radianes entre el cero del encoder y el cero de los devanados de rotor. Los parámetros utilizados son mostrados en el Anexo.

En el Gráfico 1 se pueden observar las posiciones espaciales de los vectores de flujo de rotor y estator, obtenidos a partir de las ecuaciones (4) y (8), respectivamente. El desfase entre estas dos posiciones es de 1.5 radianes y corresponde con el desfase establecido en la simulación.

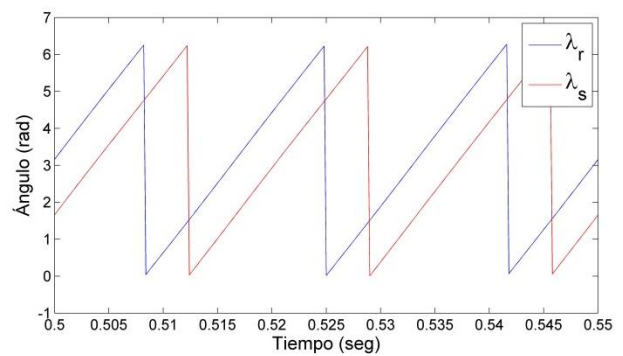


Gráfico 1 Desfase entre las posiciones de los vectores de flujo de rotor y flujo de estator, considerando una desalineación entre el encoder y los devanados del rotor.

En el Gráfico 2 se muestra el resultado de aplicar el método propuesto de calibración del encoder, en donde se observa que las posiciones angulares de ambos flujos (rotor y estator) están en fase.

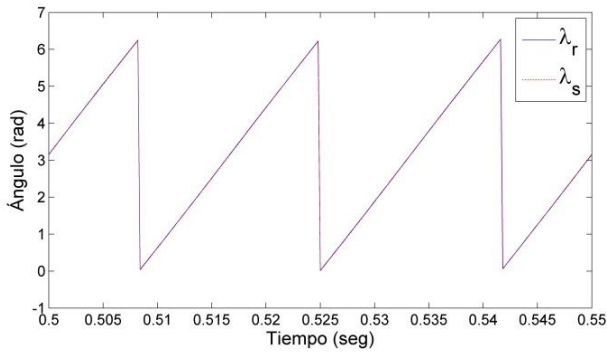


Gráfico 2 Posiciones en fase de los vectores de flujo de rotor y flujo de estator, habiendo efectuado el proceso de calibración del encoder

Finalmente, a fin de valorar el efecto del error de posición, en el Gráfico 3 se observa el comportamiento de las corrientes de rotor, que es una de las variables eléctricas más representativas en lo referente al control del WECS.

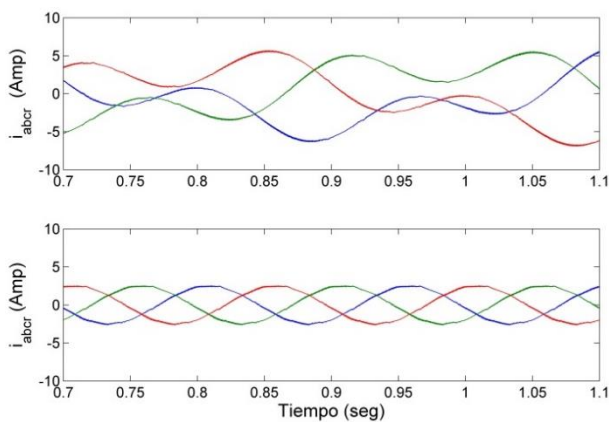


Gráfico 3 Comportamiento dinámico de las corrientes trifásicas de rotor. Superior: Con encoder desalineado. Inferior: Con encoder calibrado

Se puede observar del Gráfico 3 que cuando la calibración del encoder no es considerada, la magnitud de las corrientes de rotor se eleva y principalmente sufren distorsiones. Este tipo de situaciones varían con el grado del error de posición, pero, sobre todo, pueden ser perjudiciales cuando se trata de probar los sistemas de control del WECS.

Conclusiones

En este artículo se ha presentado el algoritmo de calibración de un encoder de tipo incremental, el cual está acoplado al eje del rotor de un DFIG. En primera instancia, se planteó el modelo del DFIG en el marco de referencia arbitrario dq ; posteriormente, se establecieron las condiciones de operación de la máquina eléctrica para poder establecer el algoritmo de calibración.

Dicha calibración se realizó a través de los devanados de rotor, por lo que estos se energizaron con un voltaje trifásico balanceado, estableciendo una velocidad mecánica constante y teniendo los devanados de estator en circuito abierto.

Partiendo de las consideraciones de prueba, descritas previamente, se encontró que los vectores espaciales del flujo de rotor y de estator deberían tener la misma posición angular. Este principio llevó a la posibilidad de plantear dos formas de cálculo de dicho ángulo de posición, en donde un primer método se consideró como modelo de referencia y el segundo método como modelo de adaptación. La particularidad del modelo de adaptación es que éste depende del ángulo estimado de la posición angular del circuito rotórico el cual a su vez depende del ángulo provisto por el encoder.

Con esto se logra que la diferencia entre las posiciones generadas por los dos métodos, implícitamente se traduzca en el valor del ángulo de error (θ_{cor}), que es el desfase que existe entre el cero del encoder con el cero de los devanados de rotor.

Por su parte, las pruebas de simulación demostraron el correcto funcionamiento del algoritmo de calibración propuesto; en donde, además, se destacó que si este error de posición no se corrige el desempeño de los controles del WECS se pueden ver comprometidos, derivando incluso en averías irreversibles en algún punto del sistema.

Finalmente, se resalta también que el proceso de calibración se lleva a cabo una sola vez, bajo una condición de prueba o de arranque del WEC, y que no se tiene que repetir aun si el WECS fuese des-energizado. No obstante, si se llevase a cabo un cambio físico en la posición del encoder o del rotor de la DFIG, e.g. por acciones de mantenimiento, entonces el proceso de calibración tendrá que llevarse a cabo de nueva cuenta.

Anexo**Parámetros de simulación**

$$r_s = 0.343 \Omega, r_r = 0.312 \Omega$$

$$L_{ls} = L_{lr} = 1.198 \text{ mH}$$

$$L_{ms} = 38.62 \text{ mH}$$

$$\text{No. de polos (DFIG)} = 2$$

$$\text{Inercia (DFIG)} = 0.00336 \text{ J}$$

$$\text{Fricción (DFIG)} = 0.01 \text{ Nm}\cdot\text{seg}$$

$$\text{Potencia (DFIG)} = 1/2 \text{ HP}$$

$$\text{Vestator} = 42 \text{ V}\cdot\text{f}\cdot\text{rms}$$

$$\text{Vel. nom. (DFIG)} = 3600 \text{ rpm}$$

$$K_i = 70$$

Referencias

Abad, G., López, J., Rodríguez, M. A., Marroyo, L., & Iwanski, G. (2011AD). *Doubly Fed Induction Machine Modeling and Control for Wind Energy Generation* (1st ed.). Wiley-IEEE Press.

Ademi, S., & Jovanovic, M. (2014). Vector Control Methods for Brushless Doubly-Fed Reluctance Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *PP*(99), 9.

Ataji, A., Miura, Y., Toshifumi, I., & Tanaka, H. (2016). A Rotor Current-Based Slip Angle Estimator for Grid-Connected Doubly-Fed Induction Generator Requiring the Stator Inductance Only. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *PP*(99), 1–1.

Calderón, G., Mina, J., Calleja, J. H., & Adolfo, L. (2014). Modelado y simulación de un Sistema de Conversión de Energía Eólica de velocidad variable interconectado a la red eléctrica. In *Congreso Latinoamericano de Control Automático* (p. 6).

Konghirun, M. (2005). Automatic Offset Calibration of Quadrature Encoder Pulse Sensor for Vector Controlled Drive of Permanent Magnet Synchronous Motors. In *TENCON 2005 - 2005 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1–5).

Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. (M. E. El-Hawary, Ed.) (Second). John Wiley and Sons.

Munteanu, I., Cutululis, N.-A., Bratcu, A. I., & Ceangă, E. (2008). *Optimal Control of Wind Energy Systems*. Springer.

Mwinyiwiwa, B., Zhang, Y., Shen, B., & Ooi, B.-T. (2009). Rotor Position Phase-Locked Loop for Decoupled P-Q Control of DFIG for Wind Power Generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *24*(3), 758–765.

Pena, R., Clare, J. C., & Asher, G. M. (1996). Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation. *IEE Proceedings -Electric Power Applications*, *143*(3), 231–241.

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. (2012). *Renewables 2012, Global Status Report, REN21*.

Vidal, J., Abad, G., Arza, J., & Aurtenechea, S. (2013). Single-Phase DC Crowbar Topologies for Low Voltage Ride Through Fulfillment of High-Power Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *28*(3), 13.

Wright, A. D., & Fingersh, L. J. (2008). Advanced Control Design for Wind Turbines Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests. In *Technical Report of National Renewable Energy Laboratory* (p. 98).