

Control de Motores de Inducción Monofásicos por el Método de Orientación del Campo

Guadalupe G. González

Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Rep. de Panamá, guadalupe.gonzalez@utp.ac.pa

Ronald Y. Barazarte

Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá, Rep. de Panamá, ronald.barazarte@utp.ac.pa

ABSTRACT

This paper presents the implementation of both direct and indirect field orientation techniques on single-phase induction motors. First, the generalities of field orientation are discussed and the main differences between direct and indirect control schemes are mentioned. Then, a model for the single-phase induction motor is presented which is later modified to ensure the symmetry needed for the implementation of field oriented control. Finally, both control topologies are implemented in Simulink® and the results for a given set of flux and torque commands are presented.

Keywords: Direct field-oriented control, indirect field-oriented control, single-phase induction machines

RESUMEN

Este trabajo presenta la implementación de ambas técnicas de control por orientación del campo, directa e indirecta, en motores de inducción monofásicos. Primero, se discutirán las generalidades del método de orientación del campo y se mencionarán las principales diferencias entre los esquemas de control directo e indirecto. Luego, se presentará un modelo para el motor de inducción monofásico el cual será modificado para asegurar la simetría necesaria para la implementación del control por orientación del campo. Finalmente, ambas topologías de control serán implementadas en Simulink® y los resultados para un conjunto dado de comandos de flujo y par serán presentados.

Palabras claves: Control directo por orientación de campo, control indirecto por orientación de campo, máquinas de inducción monofásicas

1. INTRODUCCIÓN

Los motores de inducción monofásicos (SPIM, por sus siglas en inglés) son ampliamente utilizados hoy en día en aplicaciones de baja potencia (desde fracciones de hp hasta alrededor de 5 hp). Esto se debe al hecho de que a estas potencias, los SPIM son más económicos que sus contrapartes trifásicas y todavía poseen eficiencias aceptables.

Basados en la experiencia con el control por orientación del campo de máquinas de inducción trifásicas, se han realizado algunos esfuerzos por implementar este tipo de control en sistemas de propulsión eléctricos monofásicos. El propósito detrás de esto es alcanzar un control de alto rendimiento y bajo costo para una máquina bien conocida y robusta como lo es el SPIM.

2. CONTROL POR ORIENTACIÓN DEL CAMPO

El control por orientación del campo se basa en el mecanismo de control del par de las máquinas DC. En las máquinas DC, los ejes de las bobinas del campo y la armadura son ortogonales. Por consiguiente, si ignoramos la

saturación del hierro, las fuerzas magneto motrices (fmm) producidas en estas bobinas no interactúan unas con otras. En otras palabras, las corrientes de ambos circuitos, el de campo y el de armadura pueden ser controladas independientemente sin que se afecten la una a la otra.

Además, debemos recordar que el par electromagnético en las máquinas DC responde a la relación

$$T_{em} = k\phi I_a \quad (1)$$

en donde k es el coeficiente de la máquina, ϕ es el flujo del campo e I_a es la corriente de armadura. Por lo tanto, el par puede ser controlado directamente cambiando I_a mientras que el flujo de la máquina se controla cambiando la corriente del campo I_f .

Un esquema similar de control es utilizado con máquinas de inducción el cual toma en consideración que el ángulo del par varía con la condición de operación de la máquina (en máquinas DC es 90°). Esto requiere de la manipulación de las expresiones generales que representan la operación de las máquinas.

Para lograr esto, expresamos las ecuaciones del modelo de la máquina en el marco de referencia d-q el cual esta fijo al flujo “d” del rotor, de manera tal que la componente “q” del flujo sea cero, entonces la ecuación del par para la máquina trifásica simétrica puede escribirse

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L'_r} \lambda_{dr}^e i_{qs}^e \quad (2)$$

en donde P es el número de pares de polos, L_m es la inductancia de magnetización, L'_r es la inductancia total del rotor referida al estator, λ_{dr}^e es el flujo del rotor en el eje “d” referido al estator en el marco de referencia síncrono e i_{qs}^e es la corriente del estator en el eje “q” en el marco de referencia síncrono. Esta es una de las tres condiciones necesarias para poder orientar el campo de la máquina correctamente, y basado en ella, es que diseñamos el controlador de par para un esquema de este tipo.

Además, en (Ong, 1998) se deriva una relación entre el flujo comandado del rotor y la corriente “d” del estator (i_{ds}^e) para el mismo modelo de la máquina de inducción y se repetirá aquí por conveniencia, donde r'_r es la resistencia del rotor referida al estator y p es el operador diferencial d/dt .

$$\lambda'_{dr} = \frac{r'_r L_m}{r'_r + L'_r p} i_{ds}^e \quad (3)$$

Observe que hemos eliminado el superíndice e y el subíndice d para el flujo del rotor, ya que, bajo las condiciones de orientación del campo, el valor obtenido de (3) representa la magnitud del flujo del rotor y no el valor de la componente “q” o “d” del mismo. Esta relación se utiliza para diseñar el controlador de flujo en esquemas de control por orientación del campo.

Finalmente, la relación del deslizamiento es derivada de las ecuaciones de voltaje del rotor cuando el flujo del rotor se orienta hacia el eje “d” y es constante en magnitud. Esto puede escribirse en la forma

$$\omega_s = \frac{r'_r i_{qs}^e}{L'_r i_{ds}^e} \quad (4)$$

La conservación de esta relación es la clave para la orientación del campo, y los métodos usados para hacerlo son utilizados en la clasificación de los esquemas de control, i.e. control directo e indirecto.

2.1 ORIENTACIÓN DIRECTA DEL CAMPO

La orientación directa del campo debe su nombre al hecho de que el flujo es medido directamente dentro de la máquina utilizando, por ejemplo, sensores de efecto Hall. Entonces, utilizando la amplitud de las componentes del flujo, pueden ser determinadas la posición y la magnitud total del flujo.

Como el ángulo del flujo del rotor es determinado directamente, no hay necesidad de calcular la frecuencia de deslizamiento, y por consiguiente podemos decir que los sistemas de propulsión eléctricos controlados por orientación directa del campo inherentemente cumplen con (4).

2.2 ORIENTACIÓN INDIRECTA DEL CAMPO

En este esquema de control la posición del flujo del rotor es determinada indirectamente basada en la velocidad del rotor y la relación de deslizamiento (4). Entonces, ambas velocidades son añadidas e integradas para obtener la posición real del flujo del rotor. La velocidad del rotor también puede usarse para determinar el par electromagnético desarrollado en la máquina utilizando la relación

$$T_{em} - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

la cual describe el comportamiento mecánico de la máquina y en donde T_L representa el par de la carga, J es la inercia del rotor de la máquina y ω_r representa la velocidad del rotor.

3. MODELO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN MONOFÁSICA

La máquina de inducción monofásica es modelada como una máquina asimétrica de dos fases, la derivación de estas ecuaciones se presenta en (Krause, 1965) y (Krause et al., 1994) y se presentan en diferentes formas en (Krause, 1965) y (Reicy y Vaez-Zadeh, 2005), aquí vamos a utilizarlas como sigue

$$v_{ds}^s = r_{ds} i_{ds}^s + \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} \quad (6)$$

$$v_{qs}^s = r_{qs} i_{qs}^s + \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} \quad (7)$$

$$0 = r_r i_{dr}^s + \frac{d\lambda_{dr}^s}{dt} + \omega_r \lambda_{qr}^s \quad (8)$$

$$0 = r_r i_{qr}^s + \frac{d\lambda_{qr}^s}{dt} + \omega_r \lambda_{dr}^s \quad (9)$$

$$\lambda_{ds}^s = L_{ds} i_{ds}^s + L_{md} i_{dr}^s \quad (10)$$

$$\lambda_{qs}^s = L_{qs} i_{qs}^s + L_{mq} i_{qr}^s \quad (11)$$

$$\lambda_{dr}^s = L_{dr} i_{dr}^s + L_{md} i_{ds}^s \quad (12)$$

$$\lambda_{qr}^s = L_{qr} i_{qr}^s + L_{mq} i_{qs}^s \quad (13)$$

$$T_{em} = P(L_{mq} i_{qs}^s i_{dr}^s - L_{md} i_{ds}^s i_{qr}^s) \quad (14)$$

donde v , i , λ , r , L se refiere a los voltajes, corrientes, flujos, resistencias e inductancias, respectivamente. Como es evidente, las ecuaciones son escritas en el marco de referencia del estator para eliminar los términos dependientes del ángulo mecánico de la posición.

4. CORRECCIÓN DE LA ASIMETRÍA

Se puede observar de la sección anterior, que debido a la naturaleza constructiva de la máquina monofásica, no existe una simetría en las ecuaciones del modelo de la máquina. Esto limitará nuestra capacidad de utilizar este modelo en el control por orientación del campo. Además, podemos notar que (14) producirá un par que contiene una componente alterna, también causada por la asimetría en las ecuaciones.

Ambos problemas son resueltos en (Correa et. al., 1998) insertando una constante k definida como L_{md}/L_{mq} , entonces hacemos una transformación de las corrientes del estator expresándolas como

$$i_{ds}^s = i_{ds1}^s \quad (15)$$

$$i_{qs}^s = k i_{qs1}^s \quad (16)$$

El par electromagnético se puede expresar como función de las corrientes del estator y los flujos del rotor

$$T_{em} = \frac{P}{L_r} (L_{mq} i_{qs}^s \phi_{dr}^s - L_{md} i_{ds}^s \phi_{qr}^s) \quad (17)$$

lo cual es más adecuado para nuestra discusión.

Reemplazando (15) y (16) en (17), obtenemos

$$T_{em} = \frac{P}{L_r} L_{md} (i_{qs1}^s \phi_{dr}^s - i_{ds1}^s \phi_{qr}^s) \quad (18)$$

lo cual produce un par de valor DC.

Similarmente, reemplazando (15) y (16) en (8), (9), (12) y (13) y combinándolas, obtenemos un conjunto de ecuaciones que representan la producción del flujo del rotor y son adecuadas para la orientación del campo.

$$\frac{d\phi_{dr}^s}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} \phi_{dr}^s - \omega_r \phi_{qr}^s + \frac{1}{\tau_r} L_{md} i_{ds1}^s \quad (19)$$

$$\frac{d\phi_{qr}^s}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} \phi_{qr}^s + \omega_r \phi_{dr}^s + \frac{1}{\tau_r} L_{md} i_{qs1}^s \quad (20)$$

La ecuación (18) puede ser expresada en el marco de referencia síncrona para asemejar a (2)

$$T_{em} = P \frac{L_{md}}{L_r} \lambda_r i_{qs1}^e \quad (21)$$

en esta forma podemos alcanzar el control instantáneo del par basado en la componente “q” de la corriente del estator.

5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Ambos esquemas de control, el de orientación directa e indirecta del campo, fueron implementados en Simulink® utilizando los diagramas de bloque presentados en (Novotny y Lipo, 1996) y (Toliyat y Campbell, 2003). El modelo de la máquina de inducción fue construido con (5), (18), (19) y (20) tomando las consideraciones necesarias para desplegar las cantidades más importantes, i.e. corrientes, flujo del rotor, posición y par.

La máquina utilizada para esta simulación tiene los parámetros presentes en la Tabla 1:

Tabla 1

General		Bobina Principal		Bobina Auxiliar	
Parámetros	Valor	Parámetros	Valor	Parámetros	Valor
Número de polos	4	r_s	2.02 ohm	r_s	7.14 ohm
Potencia nominal	¼ HP	r'_r	4.12 ohm	r'_R	5.74 ohm
Voltaje	110 V	X_{ms}	66.8 ohm	X_{mS}	92.9 ohm
Frecuencia	60 Hz	X_{ls}	2.79 ohm	X_{lS}	3.22 ohm
Inercia total (J)	$1.46 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2$	X'_{lr}	2.12 ohm	X'_{lR}	2.95 ohm

5.1 ORIENTACIÓN DIRECTA DEL CAMPO

El esquema de control de orientación directa del campo se muestra en la Figura 1. Note que ambos, el flujo del rotor y el par electromagnético son medidos en la máquina y comparados a los valores de referencia. Utilizamos controladores proporcionales-integrales (PI's) para calcular las corrientes d-q del estator en el marco de referencia síncrono.

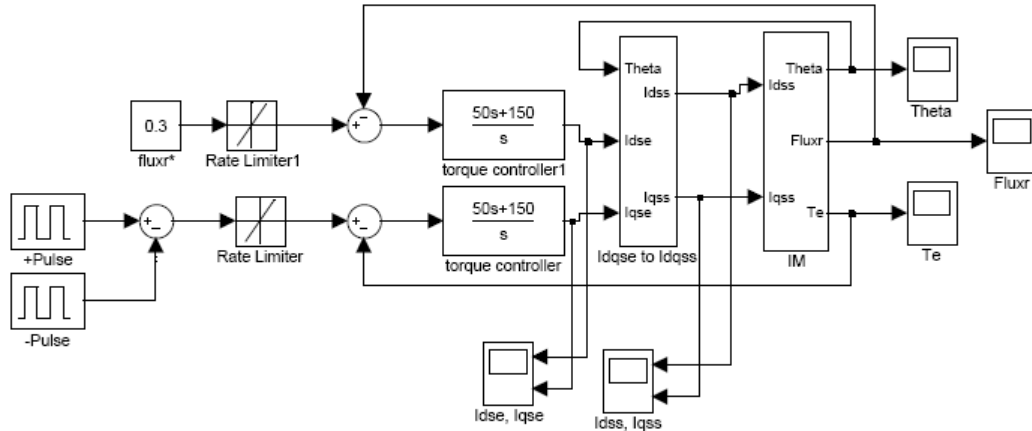


Figura 1: Esquema de control por orientación directa del campo.

La referencia del flujo del rotor ha sido establecida en 0.3 Wb y es comparada con el flujo obtenido del rotor en la Figura 2. El par comandado y el obtenido en la máquina son comparados en la Figura 3.

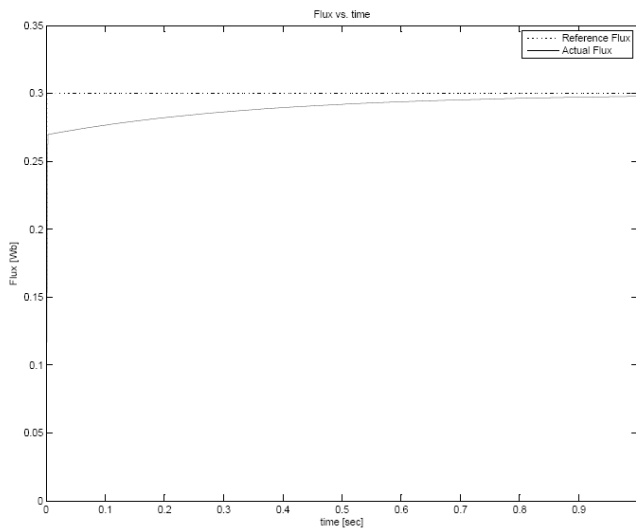


Figura. 2: Flujo del rotor bajo orientación directa del campo.

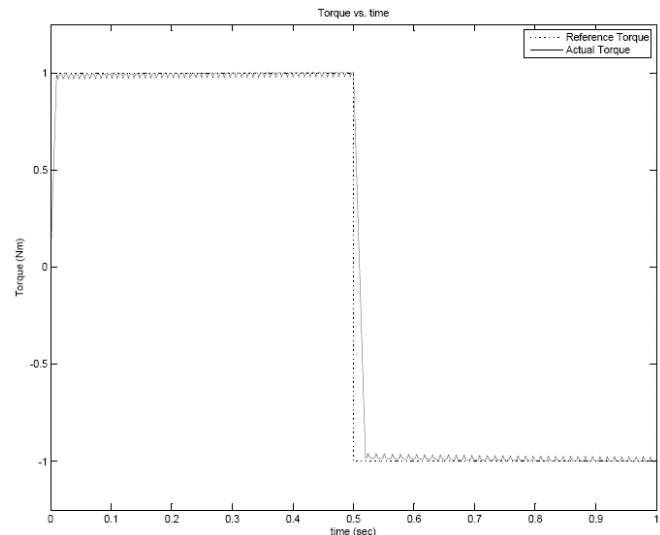


Figura 3: Par comandado y desarrollado bajo orientación directa del campo.

El ángulo del flujo del rotor utilizado en la transformación rotacional de las corrientes del estator es obtenido basado en las componentes del flujo del rotor y calculado dentro del modelo de la máquina. La Figura 4 muestra el ángulo del flujo del rotor. El cambio de dirección debido al cambio en el par comandado también puede ser visto en la figura.

Finalmente, las corrientes del estator de la máquina son presentadas en el marco de referencia d-q del estator en la Figura 5.

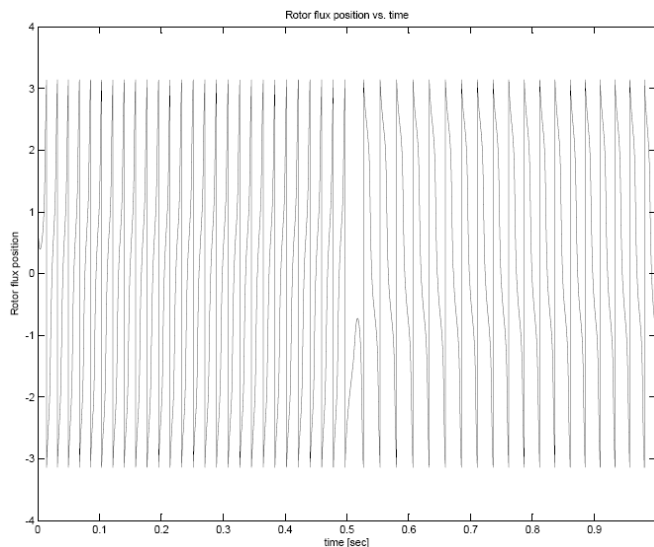


Figura 4: Posición del flujo del rotor bajo orientación directa del campo.

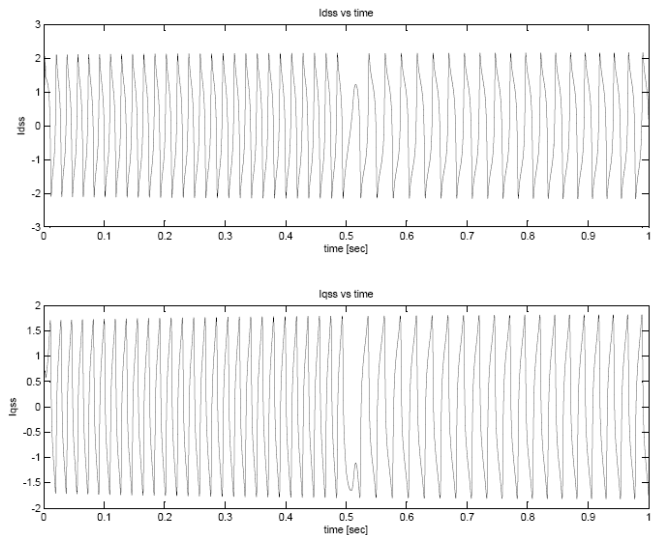


Figura 5: Corrientes “d” y “q” del estator bajo orientación directa del campo.

5.2 ORIENTACIÓN INDIRECTA DEL CAMPO

El modelo para el control de orientación indirecta del campo se muestra en la Figura 6, note que la única cantidad medida en la máquina es la velocidad del rotor. El flujo del rotor es medido únicamente para propósitos de la simulación y es mostrado en la Figura 7.

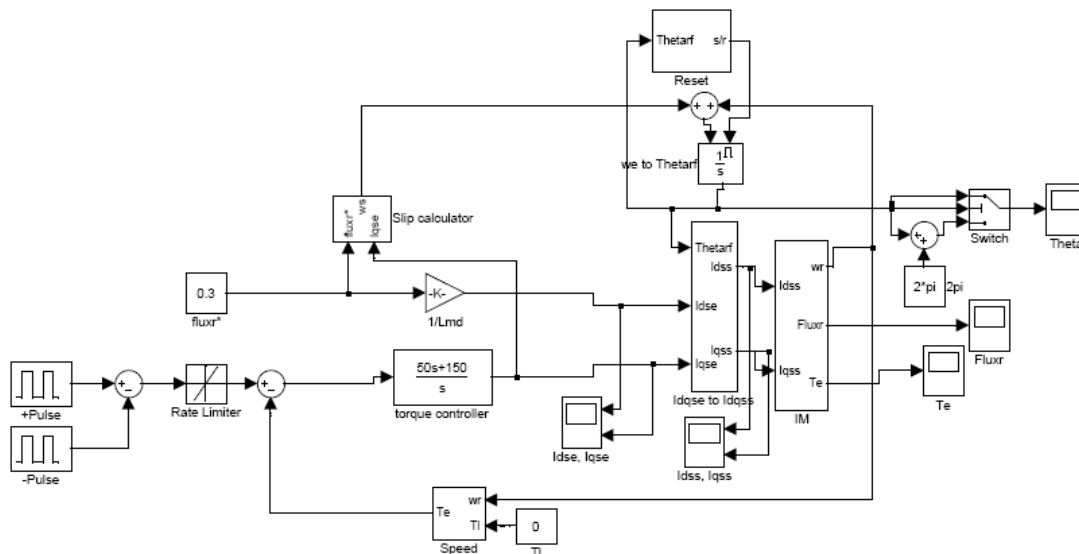


Figura 6: Esquema de control por orientación indirecta del campo.

El par retroalimentado es calculado basado en la velocidad y comparado con el par de referencia para estimar el error en el lazo de par. El par de referencia y el estimado para el sistema con orientación indirecta del campo se muestran en la Figura 8.

A diferencia de la orientación directa del campo, aquí la posición del flujo del rotor es estimada integrando la suma de las velocidades del rotor y de deslizamiento. La velocidad de deslizamiento es calculada usando (4) la cual es modificada para utilizar la referencia del flujo en lugar de la corriente del eje “d”, esto es demostrado en

(Correa et al., 1998) y (Novotny y Lipo, 1996). La posición del flujo del rotor se muestra en la Figura 9.

Las corrientes del estator de la máquina se muestran en la Figura 10, note que las magnitudes de las corrientes son similares en ambos sistemas, el directo y el indirecto.

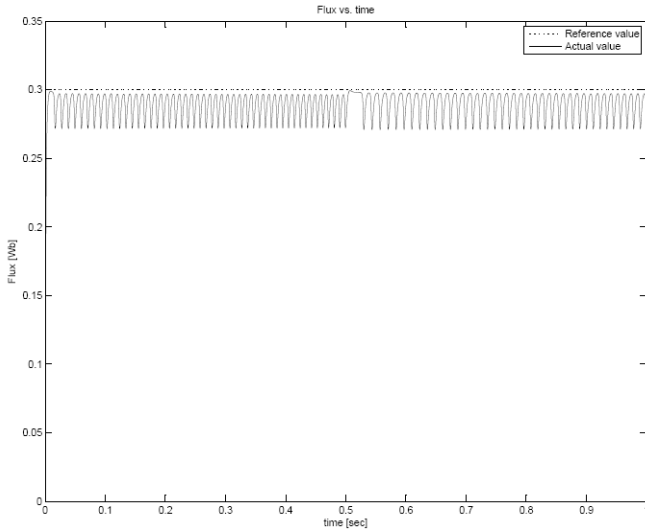


Figura 7: Flujo del rotor bajo orientación indirecta del campo.

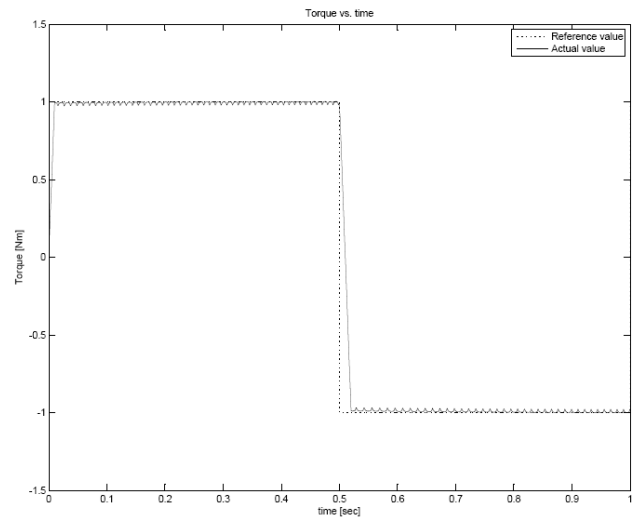


Figura 8: Par comandado y desarrollado bajo orientación indirecta del campo.

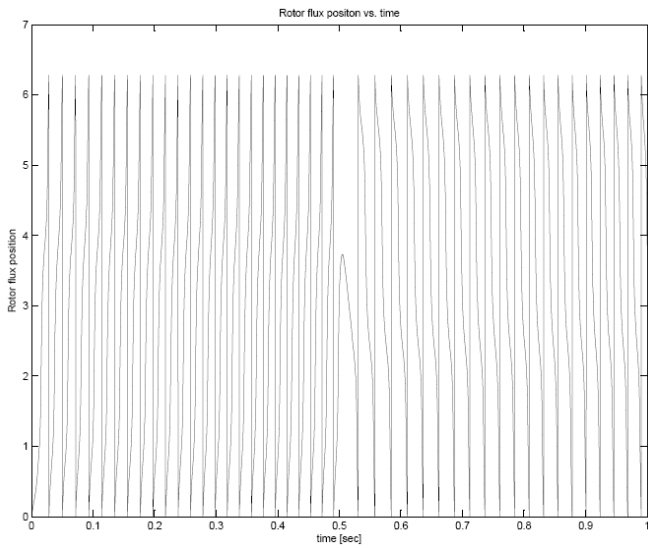


Fig. 9. Posición del flujo del rotor bajo orientación indirecta del campo.

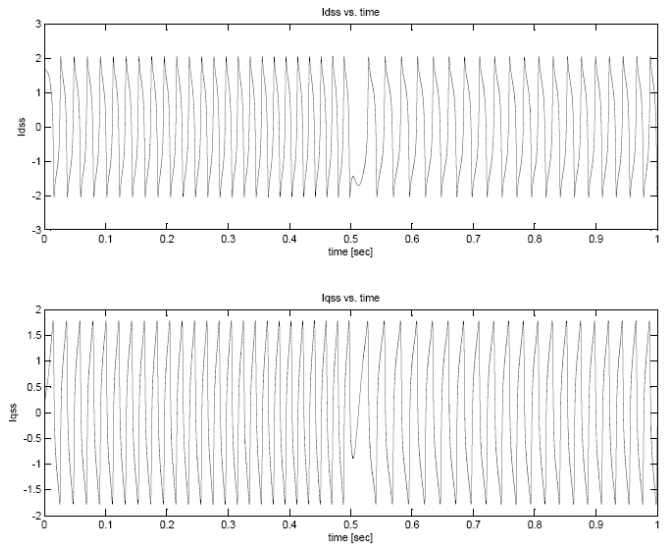


Fig. 10. Corrientes “d” y “q” del estator bajo orientación indirecta del campo.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las simulaciones nos llevan a dar algunas conclusiones. Primero, debemos destacar el hecho que el rendimiento de ambos sistemas fue bien similar. El error asociado con el flujo estuvo en el orden del 8% para el sistema con orientación directa del campo y 5% para el sistema con orientación indirecta del campo, pero para ambos sistemas el error en el par fue de alrededor del 0.3%.

También debemos considerar las dificultades de implementar estos sistemas en aplicaciones reales. Orientación directa del campo no es posible de implementar en sistemas que ya estén en operación, debido a que el motor debe ser equipado con sensores de flujo en su interior. Además, estos sensores reducen la robustez y confiabilidad

del sistema pues son sensibles a la temperatura; son frágiles y como cualquier otro sensor análogo, la precisión es un problema. Pero estos problemas podrían ser resueltos en el futuro con el avance en el diseño de sensores de flujo, y el reemplazo de motores pequeños con nuevos motores que ya tengan instalados los sensores.

Al estudiar la posibilidad del uso de la orientación indirecta del flujo, la perspectiva es diferente. Aun cuando la tecnología necesaria ya existe, i.e. codificadores ópticos y electromagnéticos; el costo de estos equipos comparado con el costo de un motor de inducción monofásico pequeño lo hace económicamente no viable. Esto limitará nuestro uso del control por orientación indirecta del campo en máquinas de inducción monofásicas, ya que el uso de máquinas más grandes (lo cual lo haría económicamente viable) implicaría una reducción sustancial de la eficiencia.

REFERENCIAS

- Correa M.B.R., Jacobina C.B., Lima A.M.N. y Da Silva E.R.C. (1998), “Field Oriented Control of a Single-Phase Induction Motor Drive,” PROC. IEEE PESC Conf., pp. 990–996.
- Krause P.C. (1965), “Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines,” IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-11, pp. 1025–1037.
- Krause P.C., Wasynczuk. O., y Sudhoff S.D. (1994), Analysis of Electric Machinery Piscataway, NJ: IEEE Press, pp. 415-448.
- Novotny D.W. y Lipo T.A. (1996), Vector Control and Dynamics of AC Drives NY: Clarendon Press Oxford, pp. 257-316.
- Reicy Sh. y Vaez-Zadeh S. (2005), “Vector Control of Single-Phase Induction Machine with Maximum Torque Operation,” Proc. IEEE ISIE Conf., pp. 923–928.
- Toliyat H.A. and Campbell S.G. (2003), DSP-Based Electromechanical Motion Control Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 255-266.
- Ong, C.-M (1998), Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, pp. 433-440.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.