

ACTUALIZACIÓN DIFUSA DE LA CONSTANTE DE TIEMPO DEL ROTOR PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DIFUSO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN EN BASE A LA ORIENTACIÓN INDIRECTA DEL CAMPO DEL ROTOR

Ing. Bruno Elio Vargas Tamani

bvargast@unmsm.edu.pe

*Profesor de la Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima- Perú*

Resumen: En este artículo, se continua la presentación de una serie de artículos, que corresponden al control de velocidad de un motor de inducción. En este caso, se presenta una propuesta para corregir la constante de tiempo del rotor usada en el calculador de deslizamiento del algoritmo de control, cuando se presente una desintonía respecto al valor real presente en la máquina. La actualización se realizará en forma difusa, aprovechando el conocimiento que se tiene del efecto de la variación de la constante de tiempo del rotor en el proceso. Así mismo se presenta la influencia de la desintonía de la constante de tiempo del rotor en la orientación de campo del rotor, el actualizador difuso, el desempeño de los controladores aún en presencia de error en la constante de tiempo del rotor usada en el calculador de deslizamiento, así como la corrección de la desorientación de campo del rotor que realiza el actualizador difuso. Nos referiremos a los artículos presentados anteriormente en esta misma revista [Vargas Tamani, 2000], [Vargas Tamani, 2001].

Palabras claves : velocidad, torque, constante de tiempo, actualización, orientación de campo, controladores, corrientes de comando, funciones de membresía, grado de pertenencia, fuzzificación, base de reglas, pérdidas.

I. INTRODUCCIÓN

En la estrategia de control de velocidad de un motor de inducción trifásico, publicado en la Revista Electrónica Nro.07, donde se justifica la condición para que se realice un adecuado control, el cual radica en una correcta orientación de campo del rotor en el eje directo del marco de referencia rotatorio (trabajo publicado en la Revista Electrónica Nro.05). Esta orientación de campo del rotor, que se debe realizar en cada lazo de control, depende del cálculo correcto del deslizamiento de la máquina, para lo cual necesitamos conocer perfectamente la constante de tiempo del rotor real presente en la máquina; esta puede variar por múltiples razones como variación de temperatura y saturación del

material magnético de la máquina [Smolenski Ivanov, 1984]. Los controladores presentados anteriormente para complementar el control difuso de velocidad del motor de inducción, como son el controlador de corriente directa i_{ds}^e y el controlador de corriente en cuadratura i_{qs}^e , anulan el error de estado estacionario entre la velocidad de comando de entrada de lazo cerrado y la velocidad real del rotor de la máquina, aún en el caso se presente desorientación del campo del rotor [Bose B. K, 1986], [Rashid Muhammad, 1993]. Sin embargo el análisis del efecto de dicha desintonía, muestran que las pérdidas de la máquina aumentan considerablemente, presentándose la necesidad por tanto de recuperar la orientación del campo del rotor. Desarrollamos una actualización difusa de la constante de tiempo del rotor y mostramos los resultados obtenidos.

II.- ACTUALIZACIÓN DIFUSA DEL CALCULADOR DE DESLIZAMIENTO

2.1. Desintonía de la orientación del campo del rotor

Para asegurar la condición de orientación del campo del rotor, debemos conocer la posición del marco de referencia rotatorio, en cada lazo del algoritmo de control; para calcular el deslizamiento entre la velocidad del motor medida y la velocidad del marco de referencia rotatorio, se hace uso de la ecuación (2.1) [Vargas Tamani, 2001].

$$\omega_e - \omega_r = \frac{1}{\tau_r} \begin{matrix} i_{qs}^{e*} \\ i_{ds}^{e*} \end{matrix} \quad (2.1)$$

donde, la constante de tiempo del rotor τ_r , esta dada por:

$$\tau_r = \frac{L'_r}{r'_r} \quad (2.2)$$

Según (2.1), el desconocimiento del valor real de la constante de tiempo del rotor τ_r , traerá consigo un error en el deslizamiento según (2.1), en ese caso se desintoniza la orientación del campo del rotor. Si el campo concatenado por el rotor, no está confinado en el eje directo del marco de referencia rotatorio $qd0$, entonces el desacoplo deseado entre el manejo del flujo del rotor y del torque del motor no se cumple.

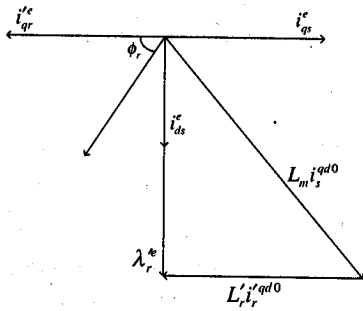


Figura 1. Diagrama fasorial de la orientación del campo del rotor correcta.

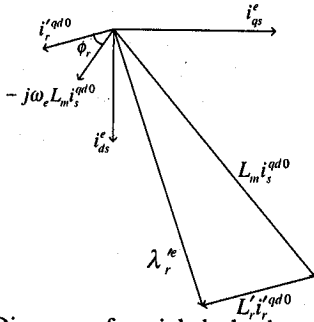


Figura 2. Diagrama fasorial de la desorientación del campo del rotor.

Si suponemos que al calcular el deslizamiento dado por (2.1), se usa el valor correcto de la constante de tiempo del rotor τ_r^* , entonces en estado estacionario, se obtiene una corriente en el rotor i_{qr}^{e*} , en oposición a la corriente i_{qs}^{e*} de comando de torque, obteniéndose además una correcta orientación del campo del rotor, esto se puede observar en el diagrama fasorial de la figura 1.

Si por alguna razón, el valor de la constante de tiempo del rotor τ_r actual del motor, no es idéntico al valor τ_r^* usado en el calculador de deslizamiento de acuerdo a (2.1), se obtiene un valor incorrecto del deslizamiento entre la velocidad del marco de referencia rotatorio y la velocidad medida del rotor.

Si tenemos el caso que τ_r^* , es mayor que el valor actual de la constante de tiempo del rotor τ_r , presentándose el estado

estacionario mostrado en el diagrama fasorial de la figura 2. Allí se muestra que se incrementa la amplitud del flujo del rotor comparado con el que se obtenía en situación de sintonía.

Si tenemos el caso donde τ_r^* es menor que el valor actual de la constante de tiempo del rotor τ_r , resulta, por el contrario, en una amplitud del flujo del rotor menor.

Si los comandos de no corrientes de flujo y torque son constantes, i_{ds}^{e*} e i_{qs}^{e*} respectivamente, entonces el torque del motor con las variables del diagrama fasorial mostrado en la figura 1, se puede calcular de la siguiente manera :

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} |\lambda_r^e| |i_s^{qd0}| \text{sen} \phi_r \quad (2.3)$$

donde:

$$i_s^{qd0} = i_{ds}^e + j i_{qs}^e \quad (2.4)$$

En (2.3) la cantidad $|\lambda_r^e| \text{sen} \phi_r$, corresponde a la componente ortogonal del flujo concatenado en el rotor λ_r^e . Cuando τ_r^* es mayor que τ_r , el decrecimiento de $\text{sen} \phi_r$ es mayor que el aumento de la amplitud de λ_r^e , con lo cual de acuerdo a (2.3), el torque producido por el motor será menor que el necesario.

Si por el contrario τ_r^* es menor que τ_r , la amplitud de λ_r^e , decrece más de lo que aumenta $\text{sen} \phi_r$, por lo cual, el torque producido por el motor también disminuye.

2.2. Variación de la corriente de mando i_{qs}^{e*} por errores en el cálculo del deslizamiento

En el sistema diseñado, que consta de un controlador de velocidad difuso, quien genera de acuerdo al error de velocidad, la corriente de comando i_{qs}^{e*} , que ajusta el valor de torque necesario que requiere el motor para reducir dicho error; se analizará el efecto para el caso que presente un error en el cálculo del deslizamiento de acuerdo a (2.1), ante resultar un cambio en τ_r , que no se ha considerado en τ_r^* . En esta situación, el torque del motor disminuirá, lo que se reflejará en un aumento del error de velocidad; y el controlador de velocidad difuso solicitará un comando de corriente i_{qs}^{e*} mayor para corregir con torque mayor dicho error de velocidad.

Por lo tanto podemos decir, que generalmente un error en el valor de la constante de tiempo del rotor, se refleja en un aumento de la corriente de comando i_{qs}^{e*} , ese cambio no es idéntico para todas las variaciones de τ_r^* respecto a τ_r . La figura 3, muestra el cambio de la corriente i_{qs}^{e*} por errores de τ_r^* en el cálculo del deslizamiento según (2.1).

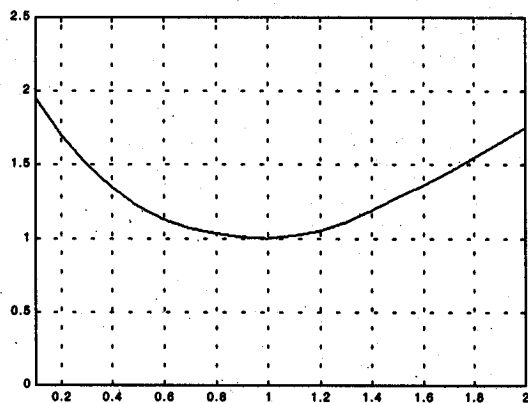


Figura 3. Variación de la corriente I_{qs} estacionaria por efecto de la variación de la constante de tiempo del rotor usado en el calculador del deslizamiento.

El aumento de i_{qs}^{e*} , se refleja en un aumento de las pérdidas de la máquina y como se puede observar, este efecto se produce tanto para $\tau_r/\tau_r^* > 1$ así como para $\tau_r/\tau_r^* < 1$, siendo en esta última situación el peor caso.

Es necesario hacer notar, que en la mayoría de casos, aún teniendo un error en la constante de tiempo del rotor τ_r^* , el sistema de control llevará la velocidad del rotor al valor de la velocidad de consigna de entrada, pero podría hacerlo causando pérdidas adicionales en la máquina, con lo cual disminuye la eficiencia del sistema.

Al verse afectado el valor de la corriente de comando i_{qs}^{e*} por un error en el cálculo del deslizamiento, por un cambio en la constante de tiempo del rotor entonces también se afecta el torque aplicado con lo cual la dinámica esperada en el diseño de los controladores, se verá afectada. Normalmente se traduce en retardos y oscilaciones indeseadas, aunque el controlador difuso disminuye estos efectos.

2.3. Actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor

La actualización del valor a usarse de la constante de tiempo τ_r^* del rotor según (2.1), se realizará cuando el error de velocidad, sea de un valor mínimo, de tal manera que se pueda considerar que la velocidad de salida llegó a su valor de estado estacionario. Cuando se cumpla esa condición, se

intentará cambiar la consigna de corriente i_{qs}^{e*} . Esta operación continuará mientras se reduzca la corriente de comando i_{qs}^{e*} , pero sin variar en forma exagerada el error de velocidad, hasta que el valor de esta corriente de comando se estabilice, situación que se presentará cuando el valor de la constante de tiempo del rotor τ_r^* a llegado al valor de la constante de tiempo del rotor real que presenta la máquina. Esta situación significará para nosotros la recuperación de la sintonía del calculador de deslizamiento y la orientación correcta del campo del rotor, siendo este último confinado al eje directo del marco de referencia rotatorio; el cual al corregirse el error de deslizamiento, girará a la velocidad correcta.

Cuando el cambio del valor de la constante de tiempo τ_r^* del rotor actualizada, disminuya demasiado, esto se reflejará en la corriente i_{qs}^{e*} , produciéndose un aumento del error de velocidad en una u otra dirección. Estas consideraciones nos hacen ver que la actualización del valor la constante de tiempo del rotor τ_r^* depende del error de velocidad entre el valor de la referencia de velocidad y la velocidad de salida real medida y específicamente, como dicho error puede ser positivo o negativo, siempre debe ser pequeño, usaremos el valor absoluto de este error de velocidad, y como este error no se puede aceptar fuera de un rango aceptable, el actualizador de τ_r^* trabajando sólo para un rango pequeño de error de velocidad.

La otra variable de la cual depende la actualización de τ_r^* , es la variación de la corriente de comando i_{qs}^{e*} , la cual cuando se estabilice con errores pequeños de velocidad, significará que el actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor usada en el calculador del deslizamiento, habrá cumplido la función esperada, igualándose ó acercándose bastante al valor real de la constante de tiempo del rotor τ_r actual en la máquina.

2.3.1. Definición de las variables del actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor τ_r^*

Las entradas del actualizador del valor la constante de tiempo del rotor τ_r^* serán : el valor absoluto del error de velocidad y la variación de la corriente del comando de torque i_{qs}^{e*} , debidamente escaladas, es decir, definiremos para el actualizador de la constante de tiempo del rotor, las siguientes entradas :

$$e_{\omega r_r}(k) = K4|\omega_{ref}(k) - \omega(k)| \quad (2.5)$$

$$e_{\Delta i_{qs}^*}(k) = K5\left(\frac{i_{qs}^*(k) - i_{qs}^*(k-1)}{T}\right) \quad (2.6)$$

donde $\omega_{ref}(k)$ es la velocidad de referencia deseada en el instante de muestreo k; $\omega(k)$ es la velocidad de salida medida en ese mismo instante. Las corrientes $i_{qs}^*(k)$ e $i_{qs}^*(k-1)$, son las corrientes de comando de torque en los instantes de k y (k-1), respectivamente, esto es en el instante actual y en el instante anterior justo en un período de muestreo T. Además las constantes K4 y K5, son valores de escala, que deben sintonizarse adecuadamente. La salida del actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor τ_r^* , para el cálculo del deslizamiento; será un valor escalado del incremento de la constante de tiempo del rotor τ_r^* a usarse en dicho calculador; llamaremos $\Delta_e \tau_r^*$, a la salida del actualizador difuso. A la salida de este sistema difuso le daremos una ganancia adecuada K6, para conocer el incremento del valor de la constante de tiempo del rotor τ_r^* del actualizador, llamado $\Delta \tau_r^*$, con lo cual tendremos :

$$\Delta \tau_r^* = K6 \Delta_e \tau_r^* \quad (2.7)$$

Por tanto, luego de aplicársele a este actualizador difuso, las entradas mencionadas y recibir la salida de este, utilizamos (2.7) y después debemos actualizar el valor de la constante de tiempo τ_r^* del rotor, a usarse en el calculador de deslizamiento por (2.1), eso se realizará de acuerdo a una función de integración, de acuerdo con :

$$\tau_r^*(k) = \tau_r^*(k-1) + T \Delta \tau_r^* \quad (2.8)$$

Esta función se muestra en la figura 4.

2.3.2. Conjuntos difusos de entrada y de salida del actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor τ_r^*

Para asegurar que el actualizador de la constante de tiempo del rotor τ_r^* , trabaje cuando el error de velocidad sea pequeño, definimos para la entrada $e_{\omega r_r}$, sólo dos funciones de membresía de signo positivo (por tratarse de una función valor absoluto), denominadas : C (cero) del tipo triangular y PP (positivo pequeño) del tipo trapezoidal.

Para la entrada $e_{\Delta i_{qs}^*}$, se definen siete funciones de membresía [Klir George, Yuan Bo, 1995], todas uniformemente distribuidas, las extremas son del tipo trapezoidal y las internas del tipo triangular, denominadas:

- NG: negativo grande
- NM: negativo medio
- NP: negativo pequeño
- C : cero
- PP: positivo pequeño
- PM: positivo medio
- PG: positivo grande

Definimos las funciones de membresía de entrada $\mu_j(e_{\omega r_r})$ y $\mu_j(e_{\Delta i_{qs}^*})$, donde para la primera j=1,2 y para la segunda j=1,2,...,7.

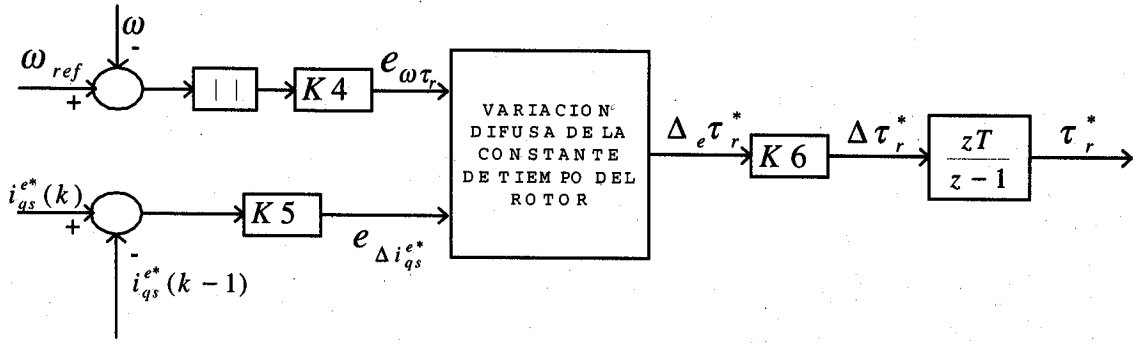


Figura 4. Actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor, a ser usada por el calculador de deslizamiento

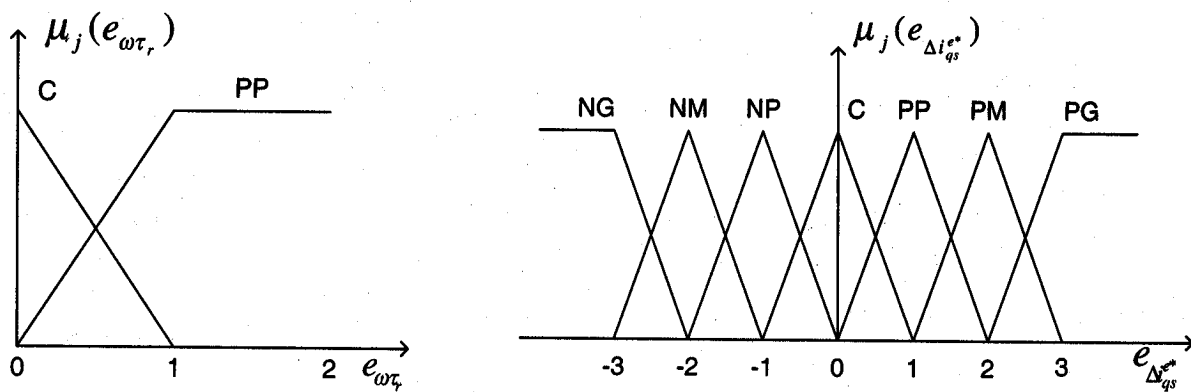


Figura 5. Funciones de membresía para las entradas del actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor a ser usada en el calculador de deslizamiento.

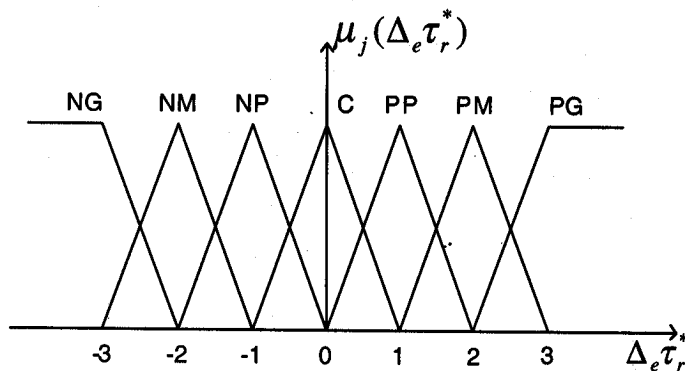


Figura 6. Funciones de membresía para la salida del actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor a ser usada en el calculador de deslizamiento.

Para la salida del actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor τ_r^* , se definen al igual que para $e_{\Delta i_{qs}^*}$, siete funciones de membresía, análogas a la entrada en mención. Las funciones de membresía de salida, se definen como

$$\mu_j(\Delta_e\tau_r^*), \text{ para } j=1,2,\dots,7.$$

La figuras 5 y 6, muestran las funciones de membresía definidas.

2.3.3. Base de reglas para actualizar la constante de tiempo del rotor τ_r^* del calculador de deslizamiento.

La experiencia del efecto del error del cálculo del

deslizamiento de velocidad, explicadas anteriormente, se reflejarán en una base de reglas para nuestro actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor τ_r^* , cuyo valor desintonizado en comparación con el valor real de dicha constante de tiempo en la máquina τ_r , genera el error en el cálculo del deslizamiento, al ejecutarse el

algoritmo de control. La tabla I muestra la base de reglas a implementarse.

III.- RESULTADOS

3.1. Efecto de la variación de la constante de tiempo del rotor

TABLA I. Base de reglas para el actualizador de la constante de tiempo del rotor.

BASE DE REGLAS		$C_{\Delta i_{qs}^*}$						
		NG	NM	NP	C	PP	PM	PG
$C_{e_{\omega\tau_r}}$	C	PG	PM	PP	C	NP	NM	NG
	PP	NP	NP	NP	NM	NM	NM	LNG

A continuación evaluaremos el efecto en la respuesta del sistema de lazo cerrado, al producirse un cambio en la constante de tiempo del rotor por diversas circunstancias. Se inicia el trabajo del motor durante 0.6sg. sin carga, con una referencia de velocidad de entrada de 125rad/sg., después que el sistema de lazo cerrado lleva a la velocidad de salida a igualarse con el valor de entrada, se carga el motor con 5N-mt.; luego que el sistema se recupera de tal perturbación después de 0.5sg., se supone que se produce una variación de la constante de tiempo del rotor de tal manera que disminuye a la mitad, o lo que es lo mismo equivale a aumentar al doble el valor de la constante de tiempo del rotor usada en el calculador de deslizamiento. La figura 7, muestra el comportamiento del controlador de velocidad difuso, del controlador de corriente en cuadratura, del controlador de corriente directa y de la orientación del campo del rotor, cuando se desintoniza el calculador de deslizamiento.

La figura 7, muestra la variación del torque y velocidad de salida en esta operación, como vemos el sistema de lazo cerrado, en condiciones de sintonía lleva la velocidad de salida al valor del comando de referencia de entrada y la mantiene así aún luego de producirse la perturbación de carga. Cuando en $t=1.1\text{sg.}$, se produce un error de la constante de tiempo del rotor usada en el calculador de deslizamiento, se observa que la velocidad de salida no tiene un cambio apreciable y se mantiene en el valor de comando, aún en presencia de ese error. Sin embargo, el torque a partir de ese momento sufre una variación y luego regresa al valor que compensa el de carga.

También se observa, que después de $t=1.1\text{sg.}$ aumenta significativamente el comando de corriente de cuadratura, y el controlador de esa corriente iguala la corriente real de ese eje al nuevo valor de comando, esta situación desorienta la ubicación del campo del rotor y este ya no se encuentra confinado totalmente al eje en cuadratura, lo cual como hemos

visto, exige mayor potencia de entrada para mantener a la misma velocidad el torque de carga. Observe que el controlador de corriente directa, luego de perturbarse por el cambio de comando en el eje q, retorna la corriente real directa al valor deseado de comando.

3.2. Actualización de la constante de tiempo del rotor usada en el calculador de deslizamiento

Ahora probaremos el comportamiento del actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor usada en el calculador de deslizamiento. Luego de observar el efecto de la desintonía del calculador de deslizamiento, ponemos a operar el actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor que se usará en el calculador de deslizamiento. La figura 8, muestra como se realiza la corrección de dicha desintonía por el sistema propuesto.

Luego de 0.4sg. de producirse la desintonía, se pone en operación el actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor del calculador de deslizamiento. En la figura 8, se puede observar, que esto no afecta en nada a la velocidad de salida, la cual permanece en el valor de comando de entrada, sin embargo el torque al inicio levemente varía para iniciar la sintonía.

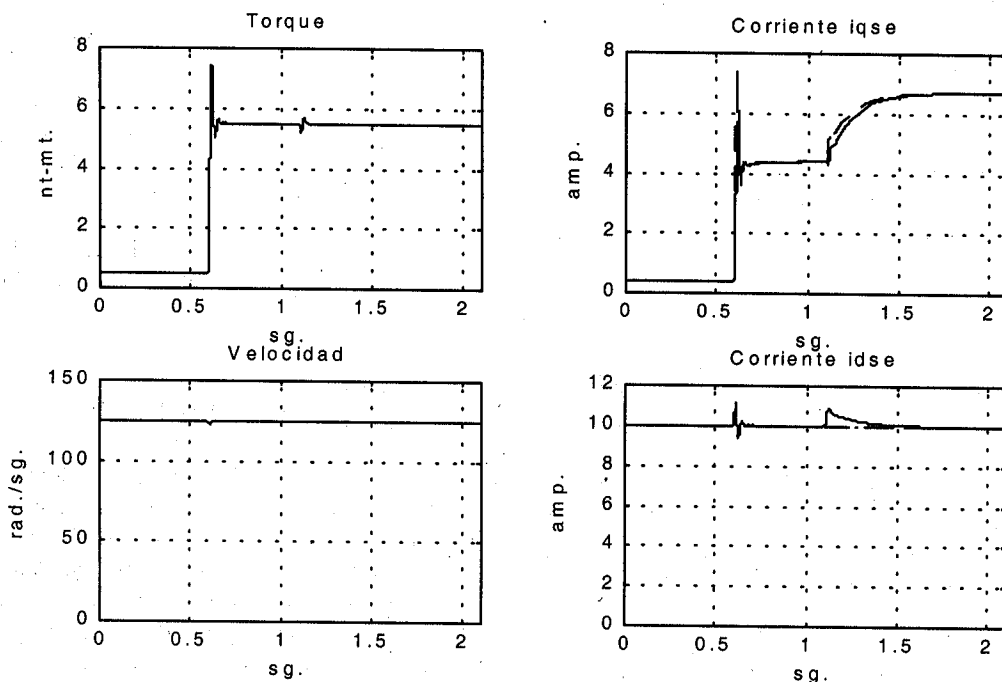


Fig. 7. Resultados de la variación de la constante de tiempo en el calculador de deslizamiento; en $t=1.1\text{sg.}$ se iguala al doble del valor real ($T_{\text{cálculo}}=2T_{\text{real}}$).

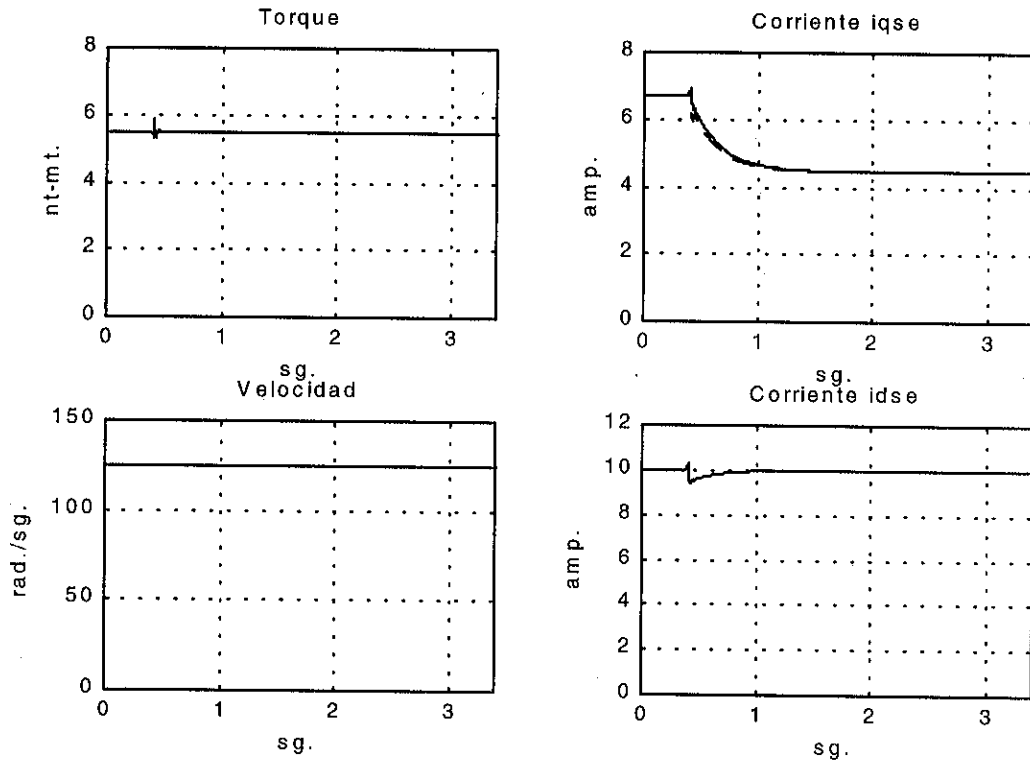


Fig. 8. Resultados de la actualización difusa de la constante de tiempo del calculador de deslizamiento.

Se observa como al irse acercando el valor de la constante de tiempo del rotor usada en el calculador de deslizamiento, al valor real de dicha constante de tiempo del rotor, el comando de corriente de cuadratura va disminuyendo y el controlador de esa corriente logra seguir exactamente a esta variación de comando de corriente, hasta que luego de 1.1sg. aproximadamente, el comando y la corriente real en cuadratura llegan al valor en que se mantenían antes de producirse la desintonía, con lo cual la potencia que ofrece la red se minimiza y las pérdidas debidas a la desintonía desaparecen. El controlador de corriente para el eje directo se ve afectado al inicio, debido al cambio de corriente en cuadratura, pero rápidamente lleva la corriente directa real al valor deseado.

La figura 9, muestra como varía la constante de tiempo del rotor usada en el calculador de deslizamiento, al entrar en funcionamiento el actualizador difuso, observamos como la constante de tiempo disminuye hasta llegar al valor real que presenta la máquina, lo cual permite eliminar las pérdidas por desintonía.

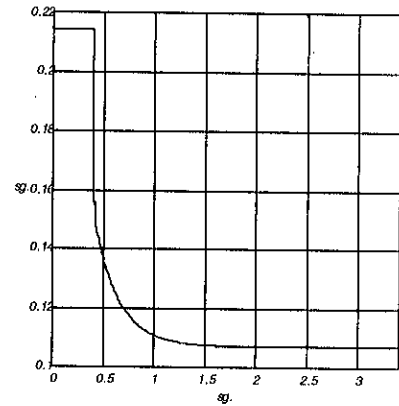


Figura 9. Variación de la constante de tiempo del rotor del calculador de deslizamiento efectuada por actualizador difuso.

IV.- CONCLUSIONES

En la constante de tiempo del rotor, se reflejan con mayor importancia las diferentes variaciones de los parámetros de la máquina posibles. El sistema de lazo cerrado, aún ante estos cambios de parámetros responde correctamente, desde el punto de vista de la velocidad de salida del motor, la cual se mantiene igual al comando de entrada; sin embargo es notorio el aumento de los voltajes y corrientes trifásicas del estator, así como la disminución del desfase entre ellas, esto se

esto se traduce en una mayor potencia de entrada para las mismas condiciones de carga ó lo que es lo mismo un aumento de las pérdidas en la máquina. La no actualización de la constante de tiempo del rotor, usada en el algoritmo de control, produce una desorientación del campo magnético, de tal manera que el campo magnético del rotor ya no estará totalmente confinado en el eje directo del marco de referencia giratorio, esto se refleja en un aumento de la corriente de comando del eje en cuadratura, debido al error en el cálculo del deslizamiento, por usar en él una constante de tiempo del rotor de valor diferente a la que se presenta realmente en la máquina.

El actualizador difuso de la constante de tiempo del rotor, que se usa en el calculador de deslizamiento, adapta este valor convergiendo al real, en base al error de velocidad y al cambio de la corriente en cuadratura. Esta adaptación, se realiza sin un cambio apreciable en la velocidad de salida del motor, la cual permanece igual al comando de velocidad de entrada. Conforme la constante de tiempo del rotor del calculador de deslizamiento, se acerca al valor real que presenta la máquina, la corriente de comando del eje en cuadratura se reduce, así como los voltajes y corrientes trifásicas del estator, es decir, se eliminan las pérdidas en la máquina debidas a la desorientación del campo magnético del rotor.

V.- BIBLIOGRAFÍA

VARGAS TAMANI Bruno, *Modelamiento de la máquina de inducción trifásica*, Revista Electrónica U.N.M.S.M. Nro. 05, 2000.

VARGAS TAMANI Bruno, *Control de velocidad difuso de un motor de inducción en base a la orientación indirecta del campo del rotor*, Revista Electrónica U.N.M.S.M. Nro. 07, 2001.

RASHID Muhammad, *Power Electronics, Circuits, Devices and Applications*, Prentice Hall, 1993.

BOSE B. K., *Power Electronics and AC drives*, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1986.

SMOLENSKI Ivanov, *Máquinas eléctricas*, Editorial Mir-Moscú, 1984.

KLIR George, YUAN Bo, *Fuzzy sets and fuzzy logic*, Prentice Hall, 1995.