



TEORICO-EXPERIMENTALES

COMPARACIÓN, POR MEDIO DE LA SIMULACIÓN, DEL CONTROL VECTORIAL Y EL CONTROL DIRECTO DEL PAR EN MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS

Ing. Javier Muñoz Álvarez
Dr. Ángel A. Costa Montiel

Resumen / Abstract

Este artículo expone las principales características, ventajas y desventajas de los sistemas de Control Vectorial por campo orientado y del Control Directo del par, partiendo de una breve descripción teórica y de los resultados de la simulación en Simulink. Dichos resultados muestran el comportamiento de la velocidad del accionamiento, el error de velocidad, las señales del par electromagnético y las corrientes de fase del motor, ante perturbaciones al sistema tales como variaciones en la señal de comando y del momento de la carga mecánica.

Palabras claves.

Características, Control Vectorial, Control Directo del Par, Simulación, Ventajas, Desventajas.

This article shows the main characteristics, advantages and disadvantages of the Oriented Field Vector Control and Direct Torque Control systems, by means of a brief theoretical description and the Simulink's simulation results. Results show the behavior of drive speed signal, speed error, electromagnetic torque, and phase current under variations of the command signal and the load torque.

Keywords.

Characteristics, Vector Control, Direct Torque

INTRODUCCIÓN.

Los motores de inducción con rotores de jaula de ardilla han sido ampliamente utilizados por más de cien años en accionamientos de velocidad constante, debido a su simplicidad, robustez, alta eficiencia, bajos costos de producción y el poco mantenimiento que necesitan en comparación con las máquinas de corriente directa. El desarrollo reciente alcanzado en la electrónica de potencia, la electrónica digital y los microprocesadores, han hecho posible el empleo a gran escala de accionamientos de corriente alterna de velocidad variable, con excelente comportamiento dinámico y control del par instantáneo de la máquina. Se ha convertido en el accionamiento estándar de la industria actual, el Control Vectorial por campo orientado, desarrollado por Blaschke, Hasse y Leonhard hace ya alrededor de 20 años [1], [2]. Recientemente también, fue desarrollado por Depenbrock, Takahashi y Noguchi [1], [4], [5] el más novedoso de los métodos de control para motores de alterna conocido como Control Directo del Par, el cual ha sido comercializado solamente por ABB. Con el presente artículo se pretende comparar ambos sistemas de control y exponer sus principales características, ventajas y desventajas.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL VECTORIAL POR CAMPO ORIENTADO.

La estructura del control de los motores de inducción resulta complicada partiendo del hecho de que el campo magnético de la máquina es rotatorio, y de que las corrientes y el flujo del rotor en los motores de jaula, no pueden ser directamente sensadas.

Los mecanismos de producción de momento en las máquinas de corriente directa son similares a los de las máquinas de alterna, pero desafortunadamente esta importante similitud no fue aprovechada hasta principios de los años 80. Es sencillo demostrar con el uso de principios físicos y la teoría del vector espacial, que de la misma forma en que ocurre en un motor de corriente directa de excitación independiente, el momento electromagnético instantáneo en un motor de inducción puede ser expresado como el producto de las corrientes que producen flujo y momento.

En los últimos años y debido principalmente al avance tecnológico en el campo de la informática y la electrónica, este simple hecho ha sido reconocido y utilizado en la sustitución de mecanismos accionados por motores de corriente directa por similares de corriente alterna, utilizando el denominado Control Vectorial.

En la utilización del control vectorial, las corrientes del estator expresadas en un sistema de referencia que está fijo al mismo, deberán ser transformadas a un nuevo sistema de referencia que rota junto al vector espacial de flujo de la máquina.

Existen, en general, tres sistemas de referencias rotatorios que pueden ser utilizados. Estos son:

1. El vector espacial de concatenaciones de flujo del estator.
2. El vector espacial de concatenaciones de flujo del rotor.
3. El vector espacial de concatenaciones de flujo de magnetización.

Para cada uno de estos tres casos el momento electromagnético instantáneo puede ser expresado de la siguiente forma.

$$1. t_e = C_{1s} \left| \overline{\Psi}_s \right| i_{SY}^s \quad (1)$$

$$2. t_e = C_{1r} \left| \overline{\Psi}_r \right| i_{SY}^r \quad (2)$$

$$3. t_e = C_{1m} \left| \overline{\Psi}_m \right| i_{SY}^m \quad (3)$$

Estas expresiones son similares a la que define matemáticamente el momento electromagnético en un motor de corriente directa de excitación independiente. Para condiciones magnéticas lineales, C_{1s} , C_{1r} y C_{1m} son constantes y $\left| \overline{\Psi}_s \right|$, $\left| \overline{\Psi}_r \right|$ y $\left| \overline{\Psi}_m \right|$ son los módulos de las concatenaciones de flujo respectivamente. Además, las corrientes que producen momento son denotadas como i_{SY}^s , i_{SY}^r , i_{SY}^m donde el superíndice indica el sistema de referencia que se está usando. Estas co-

rrientes que producen momento juegan el mismo papel de la corriente de armadura en los motores de directa.

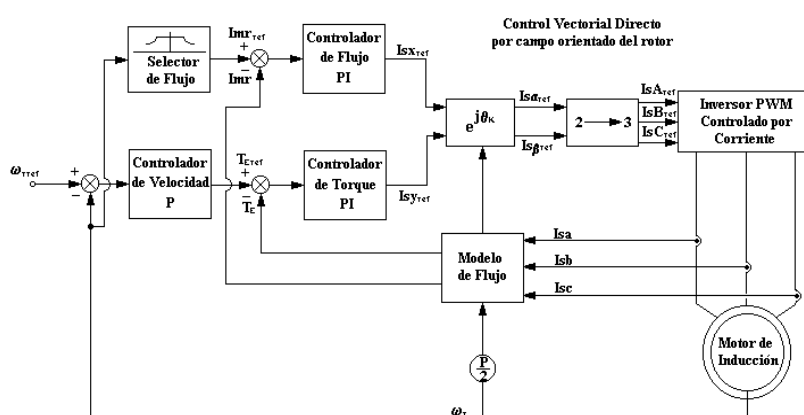
Se puede apreciar, a partir de la expresión (1), que cuando el módulo de las concatenaciones de flujo del estator permanece constante y se produce una variación rápida en la corriente que produce el momento, se obtienen rápidas variaciones del par electromagnético y es esta consideración la base fundamental del Control Vectorial por campo orientado. Se puede observar también que en los accionamientos de Control Vectorial se hace necesario realizar transformaciones de coordenadas.

Es un elemento en común a todos estos accionamientos el control del módulo y el ángulo de fase de la excitación de corriente alterna, e implementar el control de estas cantidades requiere obviamente del conocimiento preciso de las mismas.

Cuando se selecciona para el control el sistema de referencia fijo al flujo del estator, éste puede ser obtenido partiendo de las corrientes y las tensiones en los terminales del motor como se puede apreciar en la expresión (4) a continuación,

$$\overline{\Psi}_s = \int (\overline{u}_s - R_s \overline{i}_s) dt \quad (4)$$

donde $\overline{\Psi}_s$, \overline{u}_s e \overline{i}_s son los vectores espaciales de concatenaciones de flujo, tensión y corriente del estator expresados en un sistema de coordenadas fijo al estator. La utilización de esta técnica introduce problemas en la exactitud del control ya que para frecuencias muy bajas el voltaje del estator se torna muy pequeño y la caída de tensión en la resistencia dominante. Es por esta razón que se hace necesario además un conocimiento preciso de la resistencia del estator y un método de integración óptimo.



Hay que considerar, además, que la resistencia del estator puede variar debido a los cambios de temperatura, efecto que debe tenerse en cuenta en un modelo térmico de la máquina.

Cuando para el control es seleccionado el sistema de referencia fijo al flujo del rotor, este puede ser obtenido a partir de la expresión (5) que se muestra a continuación,

$$\overline{\Psi}_r' = (L_r / L_m)(\overline{\Psi}_s - L_s' \overline{i}_s) \quad (5)$$

donde L_r , L_m y L_s' son las inductancias transitorias del estator, del rotor y de magnetización. En este caso el flujo del estator se obtiene también, aplicando la expresión (4).

Existen básicamente dos técnicas diferentes de control vectorial; estas son: directa e indirecta. El control vectorial directo se implementa a partir de la medición directa del módulo y la posición del vector espacial de flujo que se seleccione como referencia, mientras que el método indirecto hace uso de un modelo de la máquina que depende de sus parámetros, los que a su vez dependen de parámetros tales como la temperatura, la frecuencia y la saturación. En la figura 1 se puede observar un esquema típico de Control Vectorial Directo por campo orientado del Rotor y su modelo de flujo

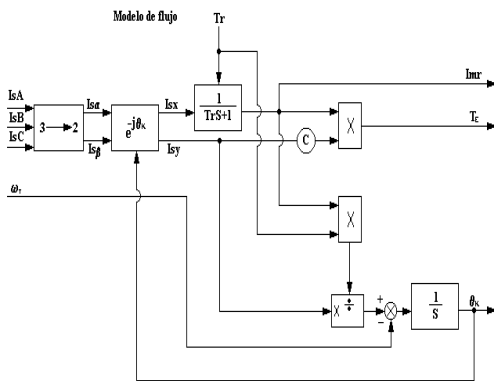


Figura 1. a) Control Vectorial Directo por campo orientado del rotor, b) Modelo de Flujo.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DIRECTO DEL PAR.

No son sólo los sistemas de Control Vectorial los que ofrecen la posibilidad de un control óptimo del momento electromagnético de las máquinas de inducción. El empleo del Control Directo del Par es muy eficiente también en este sentido. Este método de control no fue desarrollado teóricamente hasta mediados de los años ochenta y en la actualidad solamente existe en el mercado el sistema desarrollado por ABB [1], [4], [5].

En los accionamientos con Control Directo del Par, el momento electromagnético de la máquina y el flujo son controlados directa e independientemente de la misma forma en que ocurre en un motor de directa de excitación independiente. Esto se consigue de forma sencilla por medio de la selección óptima de la conmutación del inversor. La selección del estado de conmutación óptimo del inversor tiene el objetivo de restringir los errores de momento electromagnético y de flujo, lo que se consigue con el uso de comparadores histerésicos de flujo y momento, y la denominada tabla de selección del vector de tensión óptimo. Los comparadores histerésicos se definen de la siguiente forma:

1. Comparador de flujo.

$$d\Psi = 1 \quad \text{si} \quad |\overline{\Psi}_s| \leq |\overline{\Psi}_{Sref}| - |\Delta\Psi_s| \quad (6)$$

$$d\Psi = 0 \quad \text{si} \quad |\overline{\Psi}_s| \geq |\overline{\Psi}_{Sref}| + |\Delta\Psi_s| \quad (7)$$

2. Comparador de momento para sentido de giro en contra de las manecillas del reloj

$$dT_e = 1 \quad \text{si} \quad |T_e| \leq |T_{eref}| - |\Delta T_e| \quad (8)$$

$$dT_e = 0 \quad \text{si} \quad T_e \geq T_{eref} \quad (9)$$

3. Comparador de momento para sentido de giro a favor de las manecillas del reloj

$$dT_e = -1 \text{ si } |T_e| \geq |T_{eref}| + |\Delta T_e| \quad (10)$$

$$dT_e = 0 \text{ si } T_e \leq T_{eref} \quad (11)$$

La tabla de selección del vector de tensión óptimo puede ser obtenida sencillamente a partir de consideraciones físicas muy simples, en las que se ven involucrados la posición del flujo del estator, los ocho vectores de tensión posibles y los requerimientos de flujo y momento. Las salidas de los comparadores histerésicos de flujo y par son utilizadas en la tabla de conmutación óptima junto con la información acerca de la posición del flujo del estator. Debe notarse que, a diferencia del Control Vectorial, en estos sistemas sólo es necesario determinar en cual de los seis sectores definidos se encuentra el flujo de la máquina, lo que se logra también partiendo de una tabla conformada a partir de los signos de las componentes de flujo en los sistemas de coordenadas. A continuación se muestran dichas tablas y los seis vectores trifásicos no nulos

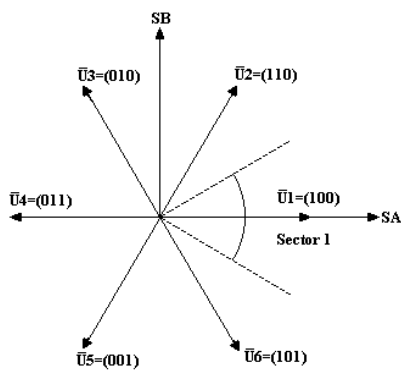


Figura 2. Vectores Trifásicos no Nulos.

Sector	Φ_{Sa}	Φ_{Sb}	Φ_{Sb}
1	+	- ó -	-
2	+	+	+
3	-	-	-
4	-	- ó -	-
5	-	-	-
6	+	-	-

dψ	dM _c	Sector					
		1	2	3	4	5	6
1	1	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U ₁
	0	U ₇	U ₈	U ₇	U ₈	U ₇	U ₈
	-1	U ₆	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅
0	1	U ₃	U ₇	U ₅	U ₆	U ₁	U ₂
	0	U ₈	U ₇	U ₈	U ₇	U ₈	U ₇
	-1	U ₅	U ₆	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄

Tabla 1. a) Identificador del sector. b) Tabla de conmutación óptima.

Se debe notar además que estos sistemas requieren, como mismo ocurre en los esquemas de Control Vectorial, un modelo similar para estimar el flujo y el momento con las dificultades que como se ha visto, esto introduce. En la figura que aparece a continuación se puede observar un sistema de control de velocidad a partir de un esquema típico de Control Directo del Par [1].

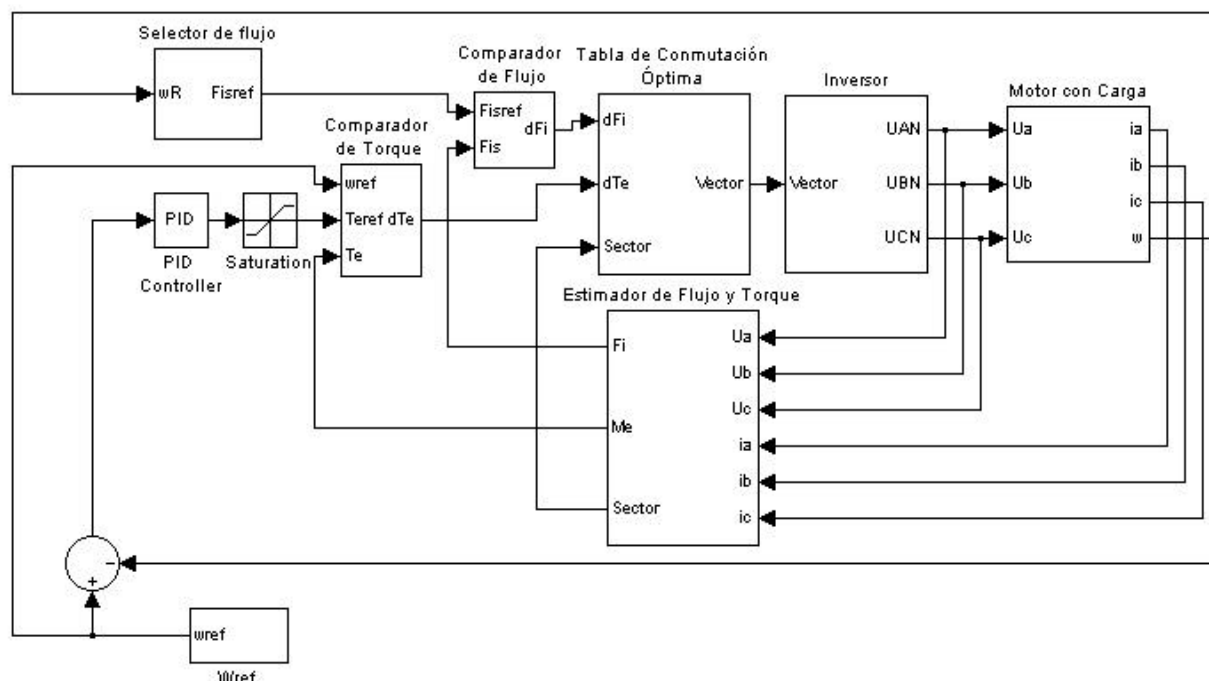


Figura 5. Modelo para la simulación del Control Directo del Par

En ambos modelos se controla la velocidad de un motor asincrónico con carga de fricción viscosa. Los datos del motor y de la carga se relacionan a continuación.

El motor comienza a operar accionando una carga en la que varía su momento proporcionalmente a la velocidad como se aprecia en la siguiente tabla. A los dos segundos de operación el momento de la carga experimenta un aumento en forma de escalón de $140 \text{ N}^*\text{m}$.

Datos de catálogo del Motor			
Pn (kw)	75	Mn (N*m)	241
Wn (RPM)	2970	Marr	1.9
η (%)	94.7	Iarr	7
f.p.	0.9	Mmax	2.7
In (A)	128	Jm (kg*m²)	0.79

Tabla 2. Datos de catálogo del Motor

Característica de la carga mecánica.		
M (N*m)	0	100
W (RPM)	0	310

Tabla 3. Característica de la carga mecánica.

P.	$W_1(\text{rad/s})$	$m_1(\text{rad/s}^2)$	$W_2(\text{rad/s})$	$m_2(\text{rad/s}^2)$
1	300	300	0	300
2	250	250	50	250
3	150	150	100	50

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.

Los resultados de las simulaciones de ambos esquemas serán mostrados en las siguientes figuras. En ellas se podrán apreciar, de forma simultánea, las variaciones de la velocidad del motor dependiendo de la señal de referencia que sea aplicada a la entrada. Se observarán también los errores de velocidad en estado estable y transitorio para ambos sistemas en los procesos de variación de velocidad entre 0 y 300 radianes por segundo, y el efecto en éstos del incremento de la carga en escalón.

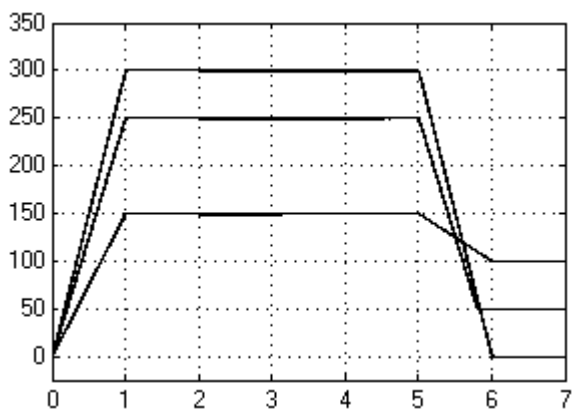
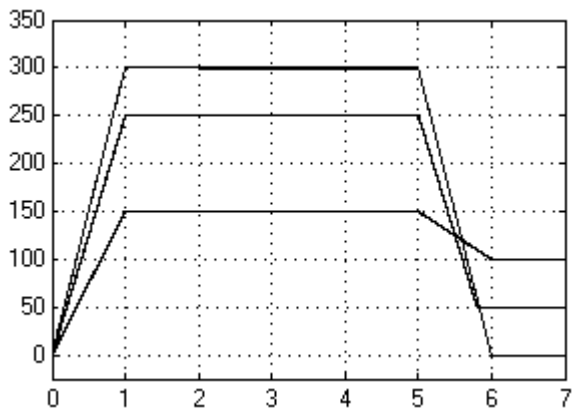


Figura 6. Señales de referencia de velocidad y velocidad del motor para 3 procesos. a) Control Vectorial Directo, b) Control Directo del Par.

En las figuras 6 a) y b) han quedado superpuestas las señales de referencia y velocidad para tres procesos en los que se deseaba que las velocidades variaran como aparece en la tabla 4.

Tabla 4. Variaciones de la Velocidad deseadas en los tres procesos.

En cada una de estas gráficas se puede apreciar a simple vista que la desviación de la variable a controlar (en este caso la velocidad del motor) con respecto a la señal de comando es muy pequeña, lo que se cuantificará a continuación a partir del análisis de las señales de error de velocidad en la figura 7.

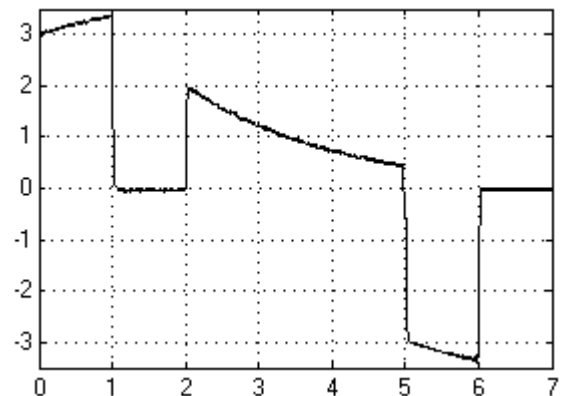
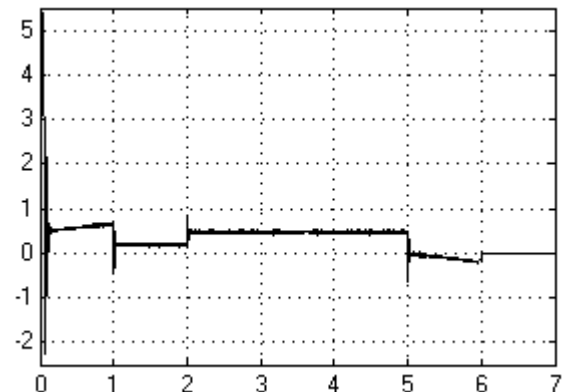


Figura 7. Señales de error de velocidad para el proceso 1. a) Control Vectorial Directo, b) Control Directo del Par

Al observar las dos gráficas anteriores podemos determinar que durante el proceso transitorio de arranque y aumento de la velocidad en ambos sistemas, la desviación de ésta con respecto a la señal de referencia no sobrepasa los 5 rad/seg, lo que equivale a errores menores de un 2 %. Durante la segunda etapa del proceso comprendida entre $t = 1$ seg y hasta 2 seg, los errores se encuentran alrededor del 0.1 % lo que satisface los requisitos de precisión del 95 % de las aplicaciones industriales.

En la tercera etapa del proceso que se simuló, ocurre un aumento en forma de escalón de la carga mecánica que acciona el motor, llevando el valor del momento de carga hasta los 240 Nm. Ante esta perturbación aparece en el esquema del Control Vectorial un error constante menor de un 0.2 % y un error máximo para el Control Directo del Par menor de un 0.7 %, que disminuye en un período de 3 seg hasta un 0.17 % y con tendencia a seguir disminuyendo.

A los 5 seg. de proceso transcurrido comienza a variar la velocidad del accionamiento hasta llegar un valor de 0 rad/seg, con un error nulo.

En las figuras 8 y 9, que aparecen a continuación, se muestran las características de las corrientes de fase A del Motor y del par electromagnético para ambos sistemas.

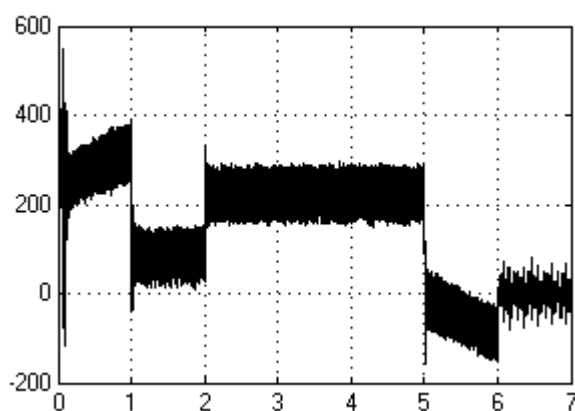
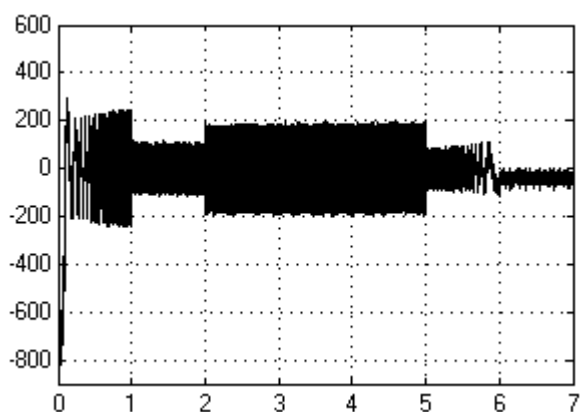


Figura 8. a) Corriente de fase A y b) Momento Electromagnético para el proceso 1 con Control Vectorial Directo.

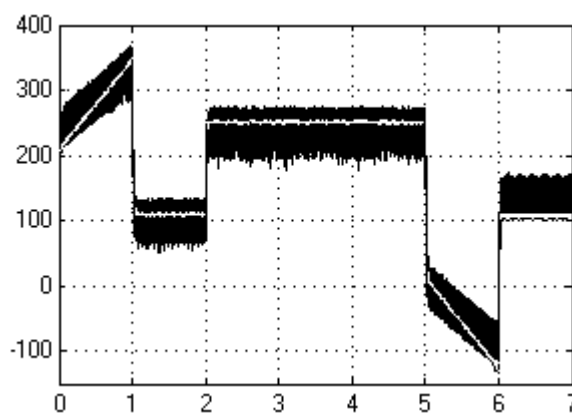
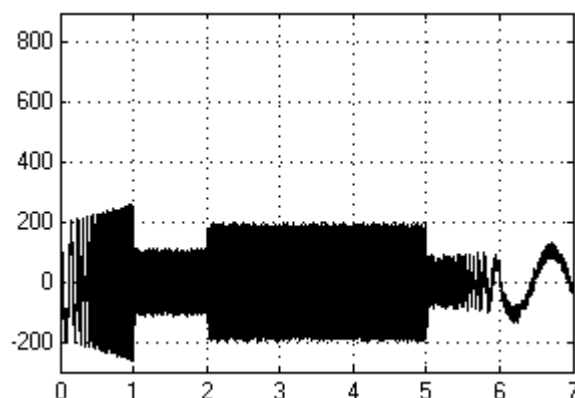


Figura 9. a) Corriente de fase A, b) Momento Electromagnético y referencia de Momento para el proceso 1 con Control Directo del Par.

En estas gráficas se pueden observar claramente las variaciones de estas señales en los procesos de arranque y aumento de la velocidad, la operación en estado estable, el aumento de la carga mecánica y la disminución de la velocidad hasta su valor de 0 rad/seg. Analizando las gráficas de momento electromagnético de la máquina para ambos sistemas, se aprecia que para el Control Directo del Par las oscilaciones del momento disminuyen considerablemente con respecto al Control Vectorial

CONCLUSIONES.

Este trabajo consistió en la simulación y la comparación de un sistema típico de Control Vectorial por campo orientado con el más simple de los sistemas de Control Directo del Par, que se halla descrito en la literatura consultada. Las gráficas de las simulaciones arrojan como resultado que ambos sistemas se comportan acorde a las exigencias de alrededor del 95 % de las aplicaciones industriales. Ambos presentan errores en estado estable menores que un 0.17 %, y ante perturbaciones en el sistema tales como variaciones en la señal de comando, éstos no sobrepasan al 2 %.

Ante las variaciones de la carga en forma de escalón, el error de velocidad aumenta en ambos casos siendo menor (0.2 %) y constante para el caso del Control Vectorial. Ante esta perturbación el sistema basado en el Control Directo del Par experimenta un error ligeramente superior (0.7 %) y que es corregido, aunque de forma lenta. Esto se debe a que en el esquema simulado los vectores de tensión seleccionados para grandes errores de par son los mismos que para los pequeños, y por tanto el esquema no distingue estas diferencias respondiendo en algunos casos de forma lenta. Se han desarrollado esquemas más avanzados de selección del vector óptimo que prevén esta dificultad [1].

Partiendo de la descripción realizada de ambos sistemas y de los resultados de la simulación se pueden verificar las siguientes ventajas y desventajas descritas en la literatura afín, [1] que presentan los sistemas basados en el Control Directo del Par con respecto a los que se basan en la técnica del Control Vectorial.

Ventajas

- No se utilizan en los esquemas con Control Directo del Par las transformaciones de coordenadas, re-

queridas en la mayor parte de los sistemas con Control Vectorial.

- Se reducen las oscilaciones del momento electromagnético de la máquina.
- No se requiere de bloques de modulación de tensión.
- No se necesita de esquemas de desacoplamiento requeridos en los accionamientos de Control Vectorial alimentados con fuentes de tensión.
- A diferencia de gran parte de los esquemas basados en el Control Vectorial no requiere de muchos reguladores.
- Solo se necesita determinar en que sector está ubicado el vector espacial de flujo.

Desventajas.

- Posibles dificultades durante el arranque y los cambios en la referencia de par.
- Frecuencia de conmutación variable.

Referencias.

1. Vas, Peter. 1998. Sensor less, Vector and Direct Torque Control. Oxford Science Publications.
2. Vas, Peter. 1990. Vector control of a.c. machines. Oxford University Press.
3. Briz del Blanco, Fernando. 1995. Control Vectorial del motor de inducción con identificación y adaptación a los parámetros de la carga. Universidad de Oviedo.
4. Takahashi, I and Noguchi, T. 1984. Quick torque response control of an induction motor using a new concept. IEEE.
5. Takahashi, I and Noguchi, T. 1984. A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor. IEEE.

Autores.

Ing. Javier Muñoz Álvarez.

Dr. Angel Costa Montiel.

Centro de Investigaciones y Pruebas Eléctricas

Instituto Superior Politécnico

“José A. Echeverría”