

EVALUACIÓN DE CONTROLADORES PREDICTIVOS EN ACCIONAMIENTOS DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN USANDO AMBIENTE SIMULINK

Nelson Aros Oñate

Rafael Gómez Gutierrez

Norma Donoso Menares

Universidad de la Frontera (Chile)

Abstract

Control theory and computing power of microprocessors enables new control strategies for electrical machines drives. The strategy of model-based predictive control (MPC) has the advantages: good dynamic response, and the nonlinearities and system constraints can be easily included. The discrete nature of the converters facilitates the implementation of the optimization problem being able to evaluate all possible states. In this paper we assess the development of MPC for an induction machine 5 [Hp] through a three-phase inverter with two levels. A predictive model of the machine lets you know how to control variables: stator flux and electric torque. These variables are predicted for each possible switching state of the converter. Function is defined by the distance as the error between the controlled variables and the desired behavior of these, and is used as a criterion for selecting the optimal state. The switching state, which minimizes the quality function is selected, is applied during each sampling period. This control strategy is evaluated by simulations using the environment Simulink/Matlab, resulting in a different approach that allows controlling effectively the engine drives.

Keywords: *predictive control, electric drives, induction machine*

Resumen

La teoría de control y la potencia de cálculo de los microprocesadores posibilitan nuevas estrategias de control para accionamientos de máquinas eléctricas. La estrategia del control predictivo basado en modelos (MPC) tiene como ventajas: buena respuesta dinámica, y las no linealidades y restricciones del sistema pueden ser fácilmente incluidas. La naturaleza discreta de los convertidores facilita la implementación del problema de optimización pudiéndose evaluar todos los estados posibles. En este trabajo se evalúa el desarrollo de MPC para una máquina de inducción de 5 [Hp] a través de un inversor trifásico de dos niveles. Un modelo predictivo de la máquina permite conocer el comportamiento de las variables a controlar: flujo del estator y torque eléctrico. Estas variables se predicen para cada estado de conmutación posible del convertidor. Se define la función de calidad mediante la distancia del error entre las variables controladas y el comportamiento deseado de éstas, y se usa como criterio de selección del estado óptimo. El estado de conmutación, que minimiza la función de calidad seleccionada, se aplica durante cada periodo de muestreo. Esta estrategia de control se evalúa mediante simulaciones usando el ambiente Simulink/Matlab, donde se muestra el buen desempeño del sistema de control.

Palabras clave: *control predictivo; accionamientos eléctricos; máquina de inducción*

1. Introducción

La necesidad cada vez mayor por mejorar los accionamientos de velocidad variable ha alentado a la ingeniería a desarrollar nuevas estrategias de control para cumplir con estos requerimientos. Así, durante las últimas décadas, el control de las máquinas de inducción utilizando las transformaciones a vectores espaciales y el concepto del campo orientado, han sido las técnicas más importantes para lograr un alto rendimiento dinámico en éstas. Con estas técnicas, los accionamientos de velocidad variable han reproducido, en buena manera, el comportamiento dinámico de los accionamientos utilizando máquinas de corriente continua.

Durante años las máquinas de inducción han proporcionado los accionamientos más comunes en las industrias, debido a esto y a la necesidad de mejorar su respuesta dinámica, se han desarrollado nuevas técnicas de control y en la literatura se presenta el control predictivo como una alternativa de mejorar dinámicamente la respuesta de estos accionamientos. En la actualidad, esta metodología de diseño de control, en máquinas eléctricas, se lleva a cabo en investigaciones al interior de las universidades y no existe en la industria una implementación de ella. Así, este trabajo presenta un análisis teórico y contractual de un accionamiento de la máquina de inducción vía simulación, utilizando las herramientas de Simulink/Matlab. Los aspectos relevantes de esta estrategia de control son: (i) El comportamiento de torque y flujo se predice para todos los vectores de tensión generados por el inversor, y (ii) El estado de conmutación –del inversor- que minimiza simultáneamente el error de torque y flujo es seleccionado a través de una función de calidad.

1.1 Estado del arte

Inicialmente el uso de motores de inducción se limitaba principalmente a aplicaciones en modo de función libre, es decir sin control sobre su velocidad, posición o par. Posteriormente, las aplicaciones que requerían control de velocidad utilizaban técnicas básicas como: cambio de polo, variación de la resistencia del rotor, control por alimentación, etc. Esto requería en ocasiones características especiales del diseño del motor y presentaba una respuesta pobre de control (Chapman, 2004; Aller, 2007).

Conforme se fueron haciendo evidentes las ventajas del motor de inducción –como baja mantención y costo- comparado con otros tipos de motores eléctricos, se vio la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de control con el fin de expandir su campo de aplicación. Sin embargo, dos aspectos limitaban el desarrollo de actuadores para máquinas de inducción: (i) La máquina de inducción es un sistema dinámico no lineal y los modelos matemáticos que le representaban hacían difícil la implementación de un sistema de control, y (ii) Los dispositivos de electrónica de potencia y de procesamiento de señales aun no alcanzaban el desarrollo conveniente para implementar dicho controladores.

Con los primeros avances en la electrónica de potencia fue posible desarrollar actuadores de uso industrial, específicamente en accionamientos con máquinas asincrónicas se implementó la técnicas de control escalar, sin embargo ésta no permitía un control sobre el par desarrollado por la máquina y presentaba una respuesta pobre en condiciones de baja velocidad.

Luego, se desarrolla el control vectorial -que permite trabajar con las variables de flujo y torque- técnica que se basa en reescribir las ecuaciones dinámicas de la máquina de inducción en un marco de referencia que rota con el vector de flujo de rotor (Bose, 2002). El comportamiento de este control logra una respuesta dinámica similar al obtenido con una máquina de corriente continua.

Actualmente, el control predictivo basado en modelo se define como una estrategia de control que se basa en la utilización de forma explícita de un modelo matemático del motor; el cual utiliza para predecir la evolución de las variables a controlar a lo largo de un horizonte temporal de predicción específico, de este modo se calcula las variables manipuladas futuras para lograr que en dicho horizonte, las variables controladas converjan en sus respectivos valores de referencia (Camacho & Bordons, 2004). El estado de conmutación óptimo se aplica durante el periodo de muestreo siguiente (Rodríguez et al., 2004a, Rodríguez et al., 2004b; Cortes et al., 2009).

2. Objetivos

Evaluar y comprobar el desempeño –vía simulación- el diseño un controlador predictivo en un accionamiento con máquina asincrónica.

Específicamente:

- Determinar un modelo dinámico de la máquina de inducción para propósitos de control.
- Desarrollar un simulador en Ambiente Simulink/Matlab -del conjunto convertidor AC/DC/AC y máquina asíncrona.
- Diseñar un controlador predictivo a la máquina de inducción alimentada por un inversor de 2 niveles.
- Determinar el desempeño dinámico, vía simulación, del sistema de control propuesto y comparar con otra estrategia de control convencional.

3. Caso de estudio

En esta sección se realiza un breve estudio del modelo de la máquina de inducción y del convertidor AC/DC/AC, obteniéndose las ecuaciones expresadas en forma de vectores espaciales que son útiles para la implementación del sistema de control; además presenta las estrategias de control: DTC (control directo de torque) y MPC (control predictivo basado en modelo), mostrando las características de cada uno de ellos.

3.1 Modelo de la máquina de inducción

Las máquinas de inducción empleadas comúnmente en sistemas pequeños y medianos, para desarrollar accionamientos con mejores desempeño necesitan establecer modelos que determinen su comportamiento en régimen transitorio. Así, el avance de la electrónica de potencia ha posibilitado desarrollar control más robusto de esta máquina con requerimientos de modelos dinámicos.

Supuestos básicos:

La máquina de inducción, a estudiar, se conforma por un estator que contiene tres enrollados de fases, cuyos ejes magnéticos están desplazados en 120° en el espacio uno de otro, y un rotor tipo jaula cortocircuitado. Para la elaboración del modelo se consideran las siguientes hipótesis simplificadoras:

- Las fuerzas magnetomotrices -debidas a los enrollados del estator- siguen una distribución sinusoidal espacial a lo largo del entrehierro, es decir se desprecian las armónicas espaciales.
- El rotor se considera como un devanado trifásico equilibrado desfasado en 120° .

- Se desprecian los efectos producidos por el ranurado -del estator y el rotor- en el valor de las inductancias propias y mutuas de los distintos enrollados.
- Magnéticamente se consideran una máquina lineal, es decir se desprecian los efectos de saturación e histéresis.

Con estas hipótesis simplificadoras, la máquina de inducción queda representada esquemáticamente por seis enrollados.

Modelo vectorial de la máquina:

Asumiendo una simetría rotacional de la máquina asincrónica, se definen vectores espaciales en un plano perpendicular al eje del motor, para las variables de interés: corriente, enlace de flujo y voltaje, en función de las variables trifásicas, como sigue:

$$\vec{i}_s^{(s)} = \frac{2}{3}(i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c) \quad (1)$$

$$\vec{\psi}_s^{(s)} = \frac{2}{3}(\psi_a + \alpha \psi_b + \alpha^2 \psi_c) \quad (2)$$

$$\vec{v}_s^{(s)} = \frac{2}{3}(v_a + \alpha v_b + \alpha^2 v_c) \quad (3)$$

donde $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, y el subíndice (s) indica las variables en el marco de referencia del estator.

De este modo, las ecuaciones eléctricas del estator y rotor en coordenadas fijas de estator, además los enlaces flujos del estator y del rotor están relacionados con las corrientes del estator y rotor, respectivamente, por las siguientes ecuaciones:

$$\vec{v}_s^{(s)} = R_s \vec{i}_s^{(s)} + \frac{d\vec{\psi}_s^{(s)}}{dt} \quad (4)$$

$$\vec{v}_r^{(s)} = R_r \vec{i}_r^{(s)} + \frac{d\vec{\psi}_r^{(s)}}{dt} - j\omega \vec{\psi}_r^{(s)} \quad (5)$$

$$\vec{\psi}_s^{(s)} = L_s \vec{i}_s^{(s)} + L_m \vec{i}_r^{(s)} \quad (6)$$

$$\vec{\psi}_r^{(s)} = L_m \vec{i}_s^{(s)} + L_r \vec{i}_r^{(s)} \quad (7)$$

donde R_s y R_r son las resistencias de estator y rotor; la variable ω es la frecuencia angular del rotor; además L_s y L_r son las inductancias propias y L_m la inductancia mutua.

Otra representación de los acoplamientos inductivos, donde se asocia toda la dispersión al estator se representa por la siguiente ecuación:

$$\vec{\psi}_s^{(s)} = \sigma L_s \vec{i}_s^{(s)} + \frac{L_m}{L_r} \vec{\psi}_r^{(s)} \quad (8)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (9)$$

donde σ es el factor de dispersión.

La ecuación mecánica y el par desarrollado por la máquina expresado en términos de corriente de estator y flujo de estator, se tienen:

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_r \quad (10)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \operatorname{Im}(\vec{\psi}_s^{(p)} \vec{i}_s^{(p)}) \quad (11)$$

donde J momento de inercia total y p es el número de pares de polo; T_e corresponde al par de carga.

3.2 Modelo del convertidor AC/DC/AC

El convertidor AC/DC/AC se compone: (i) Un puente rectificador, que toma la señal en alterna dejándola en continua; (ii) El enlace continuo con filtro pasivo (inductor y condensador); (iii) Un inversor trifásico de dos niveles (ver Figura 1).

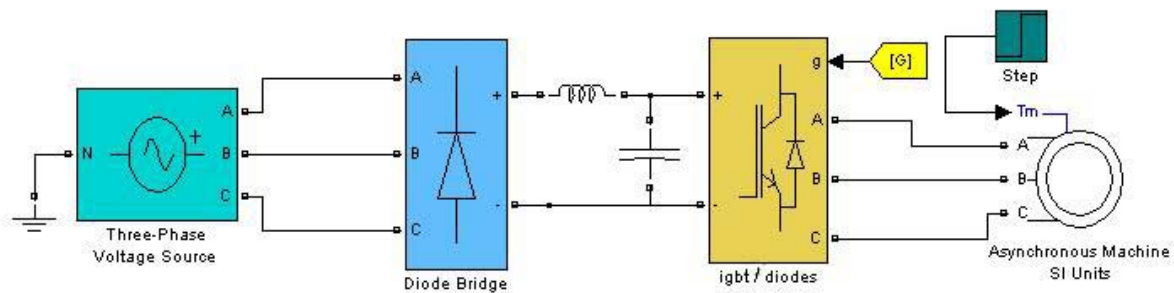


Figura 1. Esquema básico del convertidor AC/DC/AC

Modelo del inversor trifásico

El inversor de dos niveles se muestra en la Figura 2. Los estados de conmutación del inversor son determinados por las señales de compuerta S_a , S_b y S_c de la siguiente manera:

$$S_a = \begin{cases} 1, & \text{si } S_1 \text{ on y } S_4 \text{ off} \\ 0, & \text{si } S_1 \text{ off y } S_4 \text{ on} \end{cases} \quad (11)$$

$$S_b = \begin{cases} 1, & \text{si } S_2 \text{ on y } S_5 \text{ off} \\ 0, & \text{si } S_2 \text{ off y } S_5 \text{ on} \end{cases} \quad (12)$$

$$S_c = \begin{cases} 1, & \text{si } S_3 \text{ on y } S_6 \text{ off} \\ 0, & \text{si } S_3 \text{ off y } S_6 \text{ on} \end{cases} \quad (13)$$

y puede ser expresada en forma vectorial por:

$$\vec{S} = \frac{2}{3} (S_a + \alpha S_b + \alpha^2 S_c) \quad (14)$$

El vector espacial de voltaje generado por el inversor puede definirse como:

$$\vec{v} = \frac{2}{3} (v_{aN} + \alpha v_{bN} + \alpha^2 v_{cN}) \quad (15)$$

donde v_{aN} , v_{bN} y v_{cN} son voltajes fase a neutro del inversor. Entonces el vector de voltaje de la máquina está relacionado con los estados de conmutación del inversor $\vec{S}$.

$$\vec{v}_t = v_{dc} \vec{S}_t \quad (16)$$

donde v_{dc} es el voltaje en el enlace de continua. Considerando todas las posibles combinaciones generados por el inversor, se tiene ocho estados de conmutación posibles,

siendo 7 vectores de voltaje distintos, con $\vec{v}_0 = \vec{v}_7$.

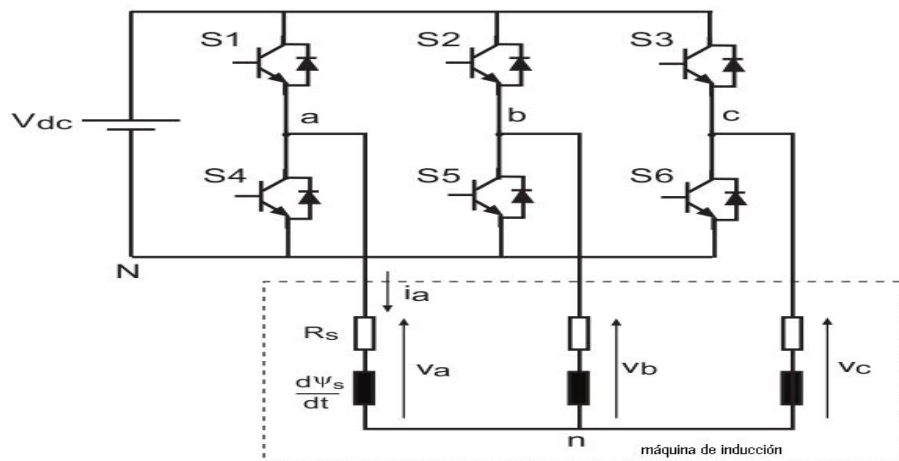


Figura 2. Modelo del inversor trifásico

3.3 Estrategias de control

Las máquinas de inducción alimentadas por una fuente de tensión y frecuencia variable, pueden ser controladas para desarrollar accionamientos con velocidad mecánica variable. Hoy en día, los dispositivos electrónicos de potencia ofrecen una gran variedad de fuentes reguladas, lo que ha permitido que esta máquina sea una alternativa importante para el accionamiento de cargas mecánicas a velocidad variable.

3.3.1 Control directo de torque (DTC)

Este sistema se fundamenta en el control del par eléctrico de la máquina y del enlace de flujo en el estator, a través de la selección del vector espacial de tensión más apropiado obtenido de una tabla, que permite seguir la referencia de estas señales, ver Figura 3. La información de activación de las componentes del inversor para cada vector espacial de tensión está contenida en la tabla de conmutación. Las variables controladas se obtienen del modelo de inferencia de la máquina, requiriéndose las medidas instantáneas de tensión y corriente obtenidas en los terminales eléctricos de la máquina. Los controladores son no-lineales del tipo todo y nada con histéresis.

Modelo de inferencia: Cálculo de flujo y torque

El vector espacial del flujo del estator y el torque eléctrico, se pueden obtener mediante las siguientes relaciones:

$$\vec{\psi}_s = \int (\vec{v}_s - R_s \vec{i}_s) dt \quad (17)$$

$$\vec{v}_s = \frac{2}{3} v_{dc} (S_a + \alpha S_b + \alpha^2 S_c) \quad (18)$$

$$\vec{i}_s^{(2)} = \frac{2}{3} (i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c) \quad (19)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \psi_s \psi_r \sin \theta_{sr} \quad (20)$$

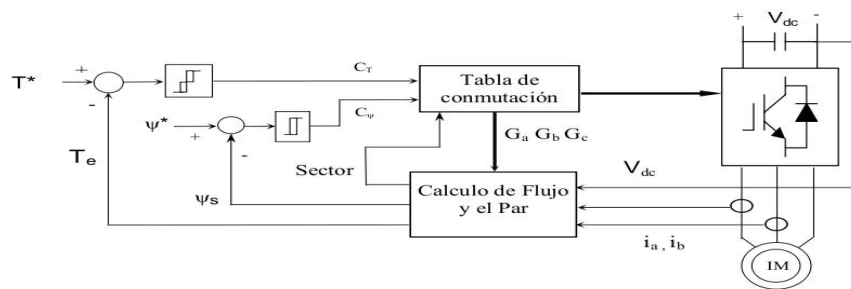


Figura 3. Diagrama de bloques del controlador DTC

Matriz de conmutación

En la Tabla 1 se muestra la Matriz de conmutación; la cual es alimentada por las salidas de los controladores no lineales y el sector actual del vector de tensión. La entrada a los controladores corresponden a los errores del torque y del flujo (diferencia entre los valores inferidos y sus referencias) y sus salidas son señales lógicas de valores discretos [1,0]. Aquí se elige uno de los ocho estados de posibles del vector espacial de tensión, ver Figura 4.

Tabla 1. Matriz de conmutación

$\lambda_s^{(s)}$	T_e	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6
Incrementa	Incrementa	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1
Incrementa	Dentro del limite	v_7	v_0	v_7	v_0	v_7	v_0
Incrementa	Disminuye	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
Disminuye	Incrementa	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1	v_2
Disminuye	Dentro del limite	v_0	v_7	v_0	v_7	v_0	v_7
Disminuye	Disminuye	v_5	v_6	v_1	v_2	v_3	v_4

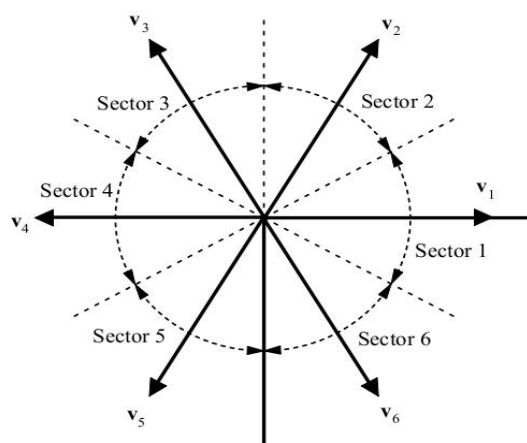


Figura 4. Diagrama de sector para el método de control DTC

3.3.2 Control predictivo (MPC)

El esquema de control de la propuesta se muestra en la Figura 5. Así, el método propuesto –control de torque y flujo– requiere de las referencias de: (i) El torque T_e^* , que se obtiene de

la salida del controlador PI de velocidad; y (ii) El flujo de estator ψ_s^* , que es un valor constante entregado por el usuario. Además, el flujo de rotor y estator se obtienen de un modelo de inferencia a partir de las medidas de corriente y voltajes de estator. La estrategia de control se basa en la minimización de una función de calidad dada por:

$$g = |T_e^* - T_e| + A |\psi_s^* - \psi_s| \quad (21)$$

donde A es un factor de ponderación para la señal de flujo, y el torque y flujo son predicciones a un paso. Como el inversor es un elemento no lineal con siete vectores de voltaje, se calculan todas las predicciones para el torque y flujo. La selección del vector óptimo se obtiene minimizando la función de calidad g y aplicando durante el siguiente período de muestreo.

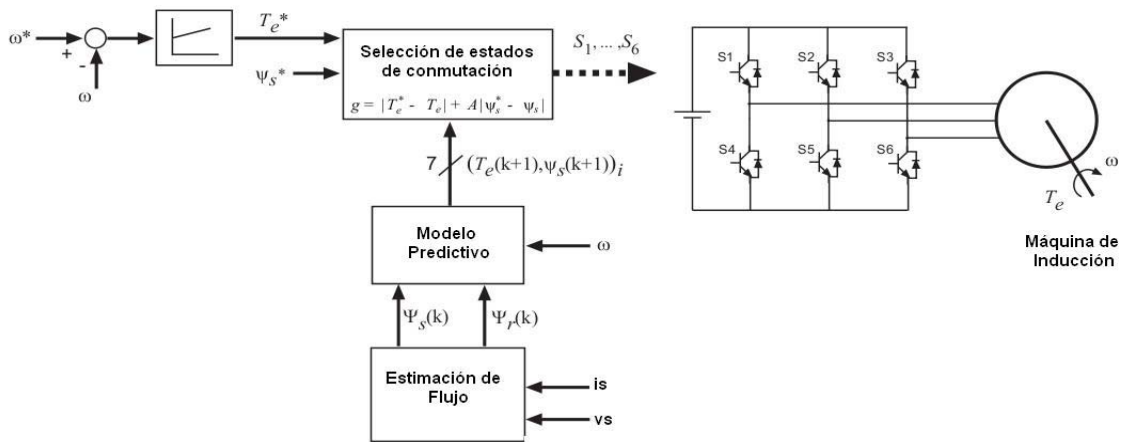


Figura 5. Diagrama de bloque del control predictivo

Modelo predictivo de la máquina

El flujo de rotor y flujo de estator pueden ser estimados a partir de las mediciones de los terminales de la máquina.

$$\psi_s^{(s)}(k) = \psi_s^{(s)}(k-1) + T_s v_t - R_s T_s i_s^{(s)}(k) \quad (22)$$

$$\psi_r^{(s)}(k) = \frac{L_r}{L_m} \psi_s^{(s)}(k) + \left(L_m - \frac{L_r L_s}{L_m} \right) i_s^{(s)}(k) \quad (23)$$

Para la predicción del flujo se utiliza la ecuación (2.21):

$$\psi_s^{(s)}(k+1) = \psi_s^{(s)}(k) + T_s v_t - R_s T_s i_s^{(s)}(k) \quad (24)$$

La ecuación de corriente es la siguiente:

$$i_s^{(s)}(k+1) = \left(1 - \frac{T_s r_\sigma}{L_s \sigma} \right) i_s^{(s)}(k) + \frac{T_s}{L_s \sigma} \left(\psi_r^{(s)} \left(\frac{R_r}{\tau_r} - K_r f \omega \right) + v_t \right) \quad (25)$$

donde $K_r = \frac{L_m}{L_r}$; $K_s = \frac{L_m}{L_s}$; $\sigma = 1 - K_r K_s$; $r_\sigma = R_s + R_r K_r^2$; y $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$.

y ω es la velocidad del rotor. Los vectores de voltaje v_t están relacionados con los estados de conmutación del inversor. El torque eléctrico puede ser calculado con las predicciones de flujo y corriente a través de la siguiente ecuación.

$$T_e = \frac{3}{2} p \Im m[\psi_s^{(s)*}(k+1) i_s^{(s)}(k+1)] \quad (26)$$

4. Resultados

Para la implementación del sistema, la máquina de inducción se obtiene de la biblioteca de Simulink/Matlab con los parámetros de la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de la máquina utilizada

Parámetro	Valores
Potencia	5 [Hp]
Voltaje	460 [v]
Velocidad	1750 [rpm]
Frecuencia	60 [Hz]
L_m	203.7 [mH]
L_s	209.67 [mH]
L_r	209.67 [mH]
R_s	1.115 [Ω]
R_r	1.083 [Ω]

4.1 Control DTC

El siguiente apartado tiene por finalidad mostrar el comportamiento del sistema controlado de la máquina en una partida con carga mecánica. El controlador DTC utilizado se encuentra en la librería de Simulink/Matlab, llamado DTC Induction Motor Drive (AC4).

La Figura 6 muestra las gráficas de velocidad, torque eléctrico y corrientes trifásicas durante la maniobra de arranque. Para esta simulación el controlador tiene una referencia de 500 [rpm], y un torque mecánico de 20 [Nm]. El comportamiento del accionamiento dinámicamente es bueno, ya que la velocidad no presenta sobreimpulso y crece linealmente debido a que el torque eléctrico se mantiene dentro de un rango máximo permitido.

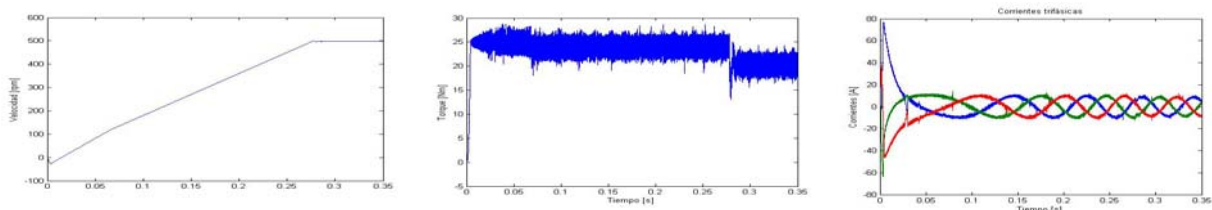


Figura 6. Arranque de máquina con controlador DTC

4.2 Control Predictivo (MPC)

El controlador predictivo se implementó en el bloque “Embedded Matlab Function”. Y con el fin de comprobar el buen desempeño del controlado predictivo se realizaron las siguientes maniobras gruesas: partida de la máquina, inversión de marcha y frenado; y maniobras finas: cambio de referencia de velocidad y aplicación de torque mecánico.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento de la máquina a arranque en vacío, inversión de marcha y frenado. Esta simulación se desarrolló para un tiempo de muestreo de 10 [μ s], velocidad entre 500 y -500 [rpm] y torque de 25 [Nm].

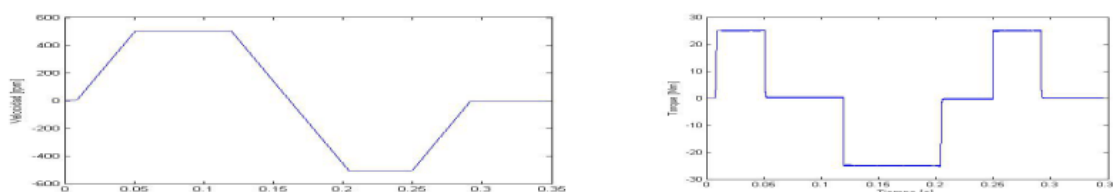


Figura 7. Simulación arranque, inversión de marcha y frenado

Se puede apreciar que durante el arranque de la máquina, el torque eléctrico aplicado es máximo (limitado a 25 [Nm]) y la velocidad crece linealmente. Cuando la velocidad alcanza la velocidad de referencia (500 [rpm]), el torque disminuye a cero. Durante la inversión de marcha, el torque eléctrico satura en -25 [Nm] y la velocidad disminuye linealmente hasta alcanzar su nuevo estado. Finalmente, el frenado de la máquina se produce exigiendo una velocidad de referencia cero, en este caso el torque aumenta nuevamente a 25 [Nm] y luego cae a cero para mantener la máquina trancada. Durante estas maniobras la máquina presenta un vector de flujo de módulo constante dado por la referencia en el sistema de control, ver Figura 8 (referencia del flujo: 1 [Wb]).

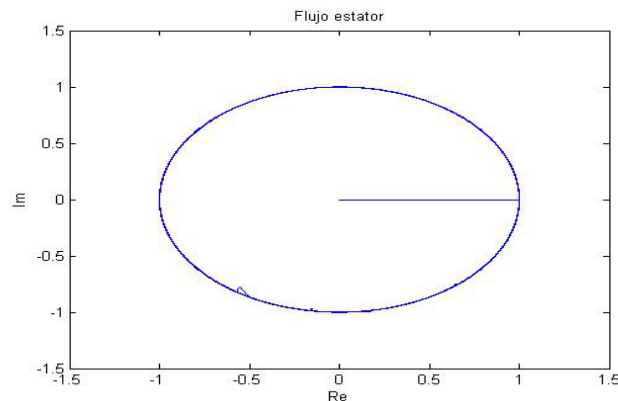


Figura 8. Vector espacial de flujo estator

La Figura 9 muestra una parte del voltaje que alimenta a la máquina en una fase y corrientes trifásicas que alimentan a ésta durante las maniobras gruesas.

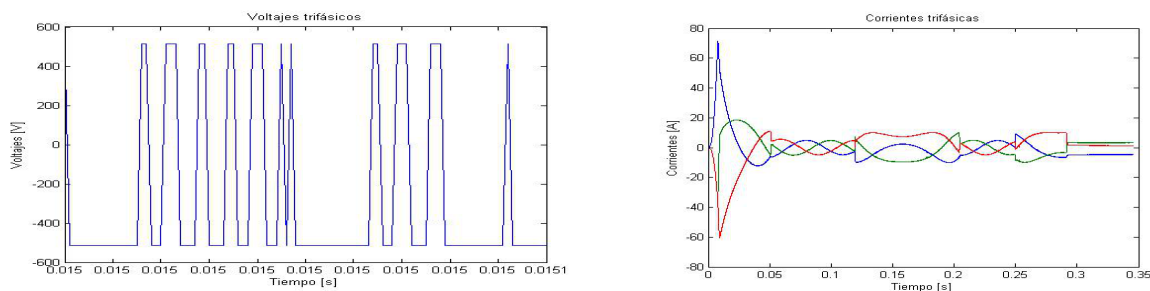


Figura 9. Voltajes y corrientes trifásicas de la máquina

Por otro lado, Las maniobras finas tienen por finalidad, mostrar como el controlador es capaz de realizar seguimiento de velocidad y rechazo a perturbaciones, por ejemplo aumento del torque de carga.

En la Figura 10 se muestra el comportamiento de la velocidad y del torque eléctrico desarrollado. Inicialmente la máquina se lleva a una velocidad de 500 [rpm], luego a los 0.12 [s] realiza un cambio de velocidad de 500 a 600 [rpm], donde se aprecia que este sistema de control responde satisfactoriamente sin presentar sobreimpulso. Luego, a los 0.15 [s] se vuelve al estado anterior, es decir la velocidad llega a los 500 [rpm]. Y, finalmente, a los 0.20 [s] se carga la máquina con 20 [Nm], como respuesta del sistema mantuvo la vel

ocidad en los 500 [rpm] de la referencia.

También es importante destacar el comportamiento de la máquina ante el buen seguimiento del flujo de referencia, ver figura 11, se refleja que el controlador está realizando un buen control sobre éste (su referencia es 1 [Wb]).

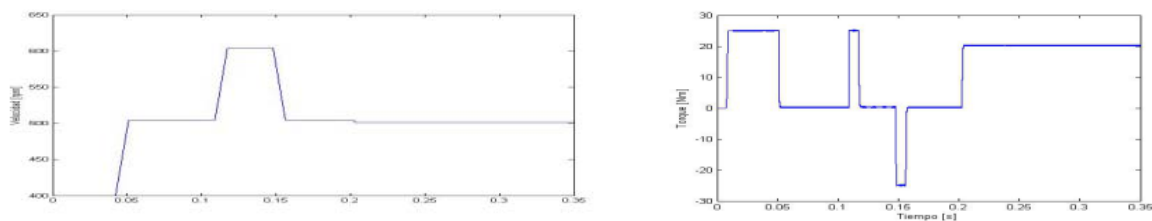


Figura 10. Cambios de referencia de velocidad y torque mecánico

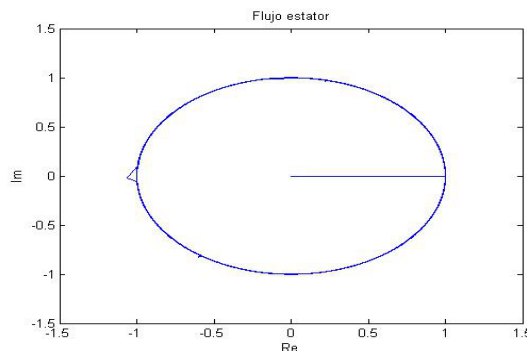


Figura 11. Flujo de estator para maniobras finas

Resumiendo

El sistema de control predictivo, en comparación con la estrategia DTC, tiene un buen comportamiento dinámico en maniobra gruesa. Se destaca el seguimiento de la variable de flujo de la máquina, la cual mantiene dentro de su referencia ante cambio de estado de ésta. Además, el torque eléctrico se presenta menos ruidoso en el sistema MPC que con el DTC, por ende la máquina llega a cambiar de estado con aceleración constante.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Con el desarrollo de la electrónica de potencia y a los microprocesadores ha sido posible ampliar el rango de aplicación de la máquina de inducción en la industria, debido a la disponibilidad de fuentes de alimentación de frecuencias variables, así la operación de estos convertidores permiten un accionamiento de velocidad variable, limitando las corrientes de alimentación y permitiendo altos pares eléctricos.

Los controladores de velocidad por regulación tensión-frecuencia, campo orientado y control directo de torque son soluciones utilizadas actualmente en la industria, sin embargo la estrategia de control predictivo resulta ser una solución para los accionamientos modernos, donde su estrategia considera del sistema su condición de discreta (sistema híbrido).

La principal ventaja de esta estrategia de control es la facilidad con que se incluyen las no linealidades del sistema, además de controlar diferentes variables (caso multivariable), en este caso el par eléctrico y flujo magnético de la máquina, a través de una función de calidad, la inclusión de estas dos variables adecuadamente escalable mediante un factor de ponderación. Esta estrategia permite la posibilidad a extensiones, tanto de variables como de restricciones del sistema.

Sin embargo, su principal desventaja es la utilización del modelo predictivo, ya que requiere de una estimación paramétrica adecuada. Queda por consiguiente realizar un análisis de sensibilidad paramétrica. Otro estudio pendiente es el análisis de estabilidad del sistema.

El desarrollo de esta estrategia de control se encuentra en este momento en un vertiginoso aumento.

6. Referencias

- Aller, J.M. (2007). *Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General*. Equinoccio, Venezuela.
- Bose, B.K. (2002). *Modern power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR.
- Camacho F., & Bordons, C. (2004). *Control Predictivo Pasado Presente Futuro*. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- Chapman, S.J. (2004). *Máquinas Eléctricas*. 3ª Ed., McGraw HILL Higher Education.
- Rodriguez, J., Pontt, J., Silva, C., Rees, S., Ammann, U., Lezana, P., Huerta, R., & Cortes, P. (2004a, April). Predictive control of a three-phase inverter. *IEEE Electronics Letters*, vol 40, no. 9, pp 561-562.
- Rodriguez, J., Pontt, J., Silva, C., Cortes, P., Rees, S., & Ammann, U. (2004b, September). Predictive direct Torque Control of an Induction Machine. *11th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE- PEMC 2004*, Riga Latvia.
- Cortes, P., Rodriguez, J., Miranda, H., & Yuz, J.I. (2009, June). Predictive Torque Control of Induction Machines Based on State-Space Models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nelson Aros Oñate
Universidad de la Frontera (Chile).
Phone: +56 (45) 325520
E-mail: naros@ufro.cl