



Comité Nacional Venezolano

III CONGRESO VENEZOLANO DE REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Marzo 2012

B4-51

Comparación de Técnicas DTC Predictivas en Convertidores Convencionales y Multinivel Aplicadas al Control de Motores de Inducción

Johnny Rengifo⁽¹⁾ José Aller⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Simón Bolívar

Departamento de Conversión y Transporte de Energía

RESUMEN

El control de velocidad para motores eléctricos es requerido y ampliamente utilizado en diversos procesos. La estrategia más utilizada para motores de inducción es el Control Directo de Par (DTC) propuesto por Takahashi y Noguchi en 1986, el cual se fundamenta en la selección del estado de conexión del puente inversor, que permite seguir en la máquina la referencia de par electromagnético y enlace de flujo.

Para aumentar los niveles de tensión y potencia de los convertidores, se están desarrollando esquemas que utilizan puentes multinivel que disponen de un mayor número de estados de conectividad. Estos estados adicionales permiten mejorar los controladores sin utilizar técnicas de modulación, con lo cual se reduce el número de conmutaciones.

En este trabajo se presenta una revisión y comparación de las principales estrategias DTC predictivas aplicadas al control de máquinas de inducción sin utilizar técnicas de modulación, tanto para convertidores convencionales como multinivel. Las comparaciones se realizaron a partir de resultados obtenidos en simulaciones. Los resultados del estudio comparativo indican como conclusión más relevante que las técnicas DTC predictivas pueden mejorar las prestaciones del esquema clásico, tanto en los convertidores convencionales como en los multinivel. En estos últimos, se obtienen mejores resultados en los niveles de rizado, contenido armónico, así como una importante reducción del dv/dt sobre las componentes.

PALABRAS CLAVE

DTC, Control predictivo, Convertidores multinivel, motores de inducción, control vectorial

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la máquina de inducción es ampliamente utilizada en la industria. Este convertidor ofrece como principales ventajas su robustez ante condiciones poco favorables de operación, bajo nivel de mantenimiento, tasas de falla reducidas y sencillez constructiva.

Las estrategias de control más utilizadas para la máquina de inducción se dividen en dos grandes grupos, por campo orientado (FOC) y control directo de par (DTC). A partir de [1] se desarrollaron las estrategias tipo FOC, pero estas presentaron grandes inconvenientes ante la variación de los parámetros durante la operación de la máquina de inducción. Por otro lado, el control DTC presentado por [2], ha demostrado ser una solución fiable para el control de par y flujo.

El control predictivo utiliza un modelo explícito para predecir la respuesta futura del proceso bajo control. En cada intervalo, el algoritmo determina la secuencia de variables de entrada ajustables, que optimizan el comportamiento futuro de la planta, luego la primera entrada se le aplica a la planta y todo el proceso se repite nuevamente [3].

Distintos autores han propuesto algoritmos basados en control predictivo. En [4] se logra una mejor representación de los sistemas no lineales y se aprovecha la información disponible del estado previo del sistema.

La utilización de estrategias predictivas para mejorar las prestaciones del DTC, han sido planteadas en diversos trabajos tales como [5–7]. En ellos los algoritmos determinan el vector de tensión requerido para cumplir la consigna, y este se genera utilizando técnicas de modulación en el puente inversor. Existen otras propuestas, donde solo se consideran los vectores de tensión disponibles en el puente [8–11].

En este trabajo se plantea un análisis comparativo entre diversos algoritmos de DTC predictivos presentados en la literatura, sin técnicas de modulación utilizando puentes inversores convencionales y multinivel. Los algoritmos estudiados son [8–11], en los cuales se consideran aplicaciones en puentes convencionales y multinivel. Con la finalidad de tener un punto de comparación se presentan resultados del DTC clásico [2].

II. MÁQUINA DE INDUCCIÓN

El modelo en variables de estado de la máquina de inducción con referencia estacionaria se describe en las ecuaciones (1):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_e & M_{er} \\ M_{er} & L_r \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \vec{v}_e \\ \vec{v}_r \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} - j\omega_m \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M_{er} & L_r \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(n_p M_{er} \Im m \left(\vec{i}_e \left(\vec{i}_r \right)^* \right) - T_m \right)$$

donde,

\vec{i}_e, \vec{i}_r	Vectores de corriente estática y rotórica	L_e, L_r, M_{er}	Inductancias propia y mutuas
\vec{v}_e, \vec{v}_r	Vectores de tensión estática y rotórica	R_e, R_r	Resistencias del estator y rotor
ω_m	Velocidad mecánica en el eje	J	Inercia
		n_p	Núm. pares de polos

Para mayor información sobre el modelo y sus parámetros consultar [12]

III. PUENTES INVERSORES

Los puentes inversores utilizados para el control de máquinas de corriente alterna se pueden entender como fuentes de tensión que disponen de un número finito de vectores disponibles, según la topología del mismo. La diferencia principal entre el convertidor convencional y los puentes multinivel radica en el número de vectores disponibles para aplicar en los terminales de la máquina. En la Fig. 1 se muestran los vectores de tensión disponibles para convertidores de dos y tres niveles respectivamente.

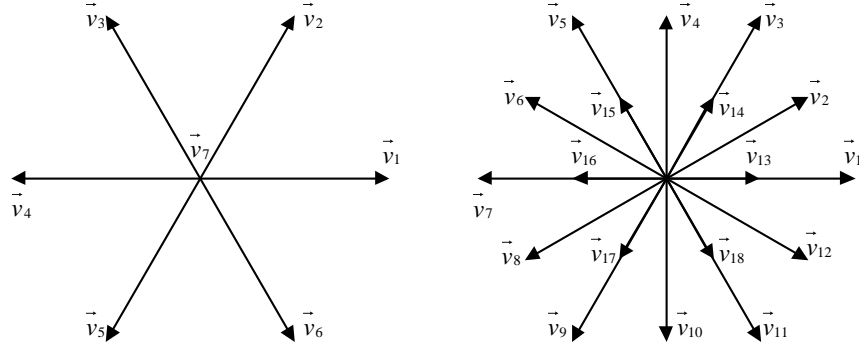


Fig. 1: Vectores de tensión para un puente inversor convencional (izquierda) y de tres niveles (derecha)

IV. ALGORITMOS DE CONTROL DTC

A. DTC Clásico

Este algoritmo fue introducido en [2], se caracteriza por ser sencillo y robusto. Entre sus principales ventajas se tiene que no requiere de un modelo preciso ni transformación de coordenadas para llevar a cabo el control.

En la estructura de control directo par se establecen como variables controladas la magnitud del enlace de flujo del estator y el par eléctrico entregado por el accionamiento. Para seguir las referencias de las variables controladas se determinan los errores de par (e_{T_e}) y flujo (e_{λ_e}) como:

$$e_{T_e} = T_{ref} - T_{e_k} \quad ; \quad e_{\lambda_e} = \lambda_{ref} - \lambda_e \quad (2)$$

En cada instante de control se requiere estimar el valor de cada una de las variables controladas, éstas no son sencillas de medir directamente, sobre todo en aplicaciones industriales. Por esta razón se utilizan estimadores, para el enlace de flujo se utiliza la ley de Faraday (3), donde la tensión en terminales del motor (\vec{v}_e) se conoce a través de la conectividad del puente y la corriente (\vec{i}_e) es una variable medida directamente.

$$\vec{\lambda}_e = \int \vec{v}_e - R_e \vec{i}_e dt \quad (3)$$

Por su parte el Par se estima a partir del enlace de flujo y la corriente a través de la ecuación (4).

$$T_e = n_p (\vec{\lambda}_e \times \vec{i}_e) \quad (4)$$

Finalmente, la selección del vector de tensión se realiza a través de una tabla, en función de los errores de par y flujo [2].

B. Algoritmos DTC predictivos

1. Puentes convencionales

a) DTC Escobar

En el artículo [8] se propone una familia de estrategias DTC para el control de máquinas de inducción, con prestaciones similares entre ellas. Para el estudio comparativo se consideró el “Controlador Cuadrático”¹. En líneas generales se plantea una función de costo cuadrática simplificada, que considera los errores de par y flujo en el instante siguiente de tiempo, para determinar el valor futuro de las variables controladas se utiliza la derivada de cada una de ellas y se aplica el método de Euler. Es interesante resaltar que las derivadas de las variables controladas son función de la tensión en terminales, como se observa en la ecuación (6).

La función de costo es:

¹ En el trabajo se utiliza el término “Quadratic controller”

$$f = \omega_1 \left(e_r + \frac{T_s}{2} pT_e \right) pT_e + \omega_2 \left(e_{\lambda_e} + \frac{T_s}{2} p\lambda_e \right) p\lambda_e \quad (5)$$

Donde, el operador $p = d/dt$, T_s es tiempo entre dos acciones de control, ω_1 y ω_2 son pesos para dar prioridad al par o al flujo dentro del control. Las derivadas de par y flujo se tienen en la ecuación (6). Donde $D = M_{er}^2 - L_e L_r$.

$$pT_e = n_p \left(\left(i_{e_\beta} + \frac{L_r}{D} \lambda_{e_\beta} \right) v_{e_a} - \left(i_{e_a} + \frac{L_r}{D} \lambda_{e_a} \right) v_{e_\beta} + \frac{R_r L_e + R_e L_r}{n_p D} T_e + \omega_m \left(i_{e_a} \lambda_{e_a} + i_{e_\beta} \lambda_{e_\beta} \right) + \frac{\omega_m L_r}{D} \lambda_e^2 \right) \quad (6)$$

$$p\vec{\lambda}_e = \vec{v}_e - R_e \vec{i}_e$$

Para determinar el vector de tensión a aplicar en cada instante de tiempo k en los terminales de la máquina se elige aquel que minimice la función de costos (5).

$$\vec{v}_k = \min_{\{v_1, \dots, v_7\}} \{f\} \quad (7)$$

2. Puentes multinivel

a) ORS

En el artículo [9], los autores proponen un algoritmo que utiliza el convertidor de tres niveles y la función de costo (5). Para determinar el vector de tensión que satisfaga los requerimientos del control, en lugar de probar todas las alternativas, se utiliza el concepto de Sub-espacios para regulación de las salidas (ORS²).

El ORS consiste determinar el conjunto de vectores de tensión que producen aumento o disminución de cada una de las variables controladas $y_1 = T_e$ e $y_2 = |\vec{\lambda}_e|$, a través del valor de la derivada con respecto al tiempo de cada una de ellas dy_i/dt . Para determinar las derivadas se utiliza un modelo simplificado del sistema. Luego se interceptan ambos conjuntos de vectores y se evalúa cuál vector del conjunto resultante minimiza la función de costo (5). En [13] se presenta una definición detallada de los ORS.

b) Modelo predictivo de Control Directo de Par

En los trabajos [10] y [11] se plantea el algoritmo Modelo Predictivo de Control Directo de Par (MPDTC), donde se utiliza con un convertidor de tres niveles para el control de una máquina de inducción. Para este estudio comparativo se implementó esta estrategia para convertidores convencionales de dos niveles.

Este caso plantea la utilización de un horizonte de predicción ($N=2$), que consiste en determinar el valor de las variables controladas a lo largo del horizonte. La predicción se realiza con el modelo de la máquina (1), pero sustituyendo las corrientes por los enlaces de flujo estáticos y rotóricos.

El algoritmo determina un conjunto de secuencias de entradas posibles en el horizonte de predicción $U^i(k) = [u^i(k), \dots, u^i(k+1)]$, donde $i \in \Gamma$. Para ello se establece que solo puede conmutar una rama del puente en cada acción de control debido a limitaciones físicas. Cada una de las secuencias U^i se aplica al modelo de predicción para determinar el valor del flujo y par a lo largo del horizonte de predicción. Luego se encuentran cuáles trayectorias son factibles, entendiendo por factibles que el par y flujo estén dentro de una banda de tolerancia al final del horizonte de predicción o se acerquen a dicha banda progresivamente. Para cada secuencia de vectores de tensión candidato, se extrapola la trayectoria de cada una de las salidas linealmente, con la finalidad de determinar en cuantos instantes de control n_i las variables abandonan la banda de tolerancia, se selecciona el menor n_i . El número de conmutaciones durante una secuencia de vectores de tensión se determina a través de la ecuación (8):

² Siglas de "Output Regulation Subspaces"

$$s_i = \sum_{l=k}^{k+N-1} \|u(l) - u_i(l-1)\|_1 \quad (8)$$

Finalmente, se evalúa la función de costo (9), donde $c_i = s_i / ni$.

$$i = \arg \min_{i \in \Gamma} c_i \quad (9)$$

En [11] se demuestra que hay instantes de tiempo donde no existe vector de tensión que sea capaz de satisfacer los requerimientos del control, para ello se desarrolla una estrategia de salida ante los estados no factibles. La idea es seleccionar el vector de tensión que produzca el menor error relativo en todas las variables.

V. ANÁLISIS COMPARATIVO

A. Caso de Estudio

El análisis comparativo entre las estrategias se realizó a través de un caso de estudio común, afín de evaluar las prestaciones del control sobre: el seguimiento de las consignas del control, el rizado en las variables controladas, el contenido armónico de tensión y corriente en los terminales del motor. El caso de estudio se describe a continuación: La referencia de velocidad es una rampa que alcanza velocidad nominal en 2 s, luego se mantiene constante; la referencia de par se consigue a través de un controlador proporcional-integral con $k_p=100$ y $k_i=10$; al flujo se le coloca una referencia constante de 1 pu; finalmente a los 2,5 s ocurre un escalón de par mecánico de 0,75 pu. Todas las simulaciones se realizaron en el sistema adimensional de unidades, los parámetros del modelo se presentan en la Tabla 1. Parámetros del modelo.

Tabla 1. Parámetros del modelo

R_e (pu)	R_r (pu)	L_e (pu)	L_r (pu)	M_{er} (pu)	H (s)	V_{DC} (pu)
0,0176	0,0197	1,6707	1,6587	1,5850	0,6922	1,5

B. Resultados

En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos al utilizar DTC Clásico sobre el caso de estudio. La velocidad cumple con la consigna planteada. La Fig. 2.a muestra el lugar geométrico del flujo, un círculo donde el radio oscila sobre la banda de histéresis. El arranque del motor ocurre a par constante (Fig. 2.b), siguiendo la referencia establecida por el PI. El rizado durante el régimen permanente en el par (0,5 pu) es cerca del 67% de la referencia. Al ocurrir el escalón de carga la máquina reacciona de manera casi instantánea ante la nueva demanda del sistema, manteniendo la velocidad y demostrando buena respuesta dinámica. El contenido armónico de la corriente de fase en régimen permanente (Fig. 2.d), se observa entre los -20 dB y -40 dB, con mayor peso en frecuencias menores a 1 kHz. Mientras para las tensiones (Fig. 2.e), oscila entre -30 dB y -40 dB en todo el rango de frecuencia estudiado.

Las estrategias DTC predictivas mejoran de forma significativa el rizado del par eléctrico, tal como se observa en la (Fig. 4). El rizado se reduce desde un 0,5 pu a un 0,3 pu para los inversores de dos niveles, mientras para los multinivel tenemos entre 0,25 pu y 0,2 pu. Es claro que está es una mejora muy importante con respecto al esquema tradicional, dado que el rizado de par se traduce en vibraciones en el motor, que debe evitarse o disminuirse cuando se desea aumentar la potencia de trabajo.

En el caso del flujo, se mantiene constante con todas las estrategias (Fig. 3), reduciendo el rizado al utilizar convertidores multinivel, debido a la reducción de los dv/dt .

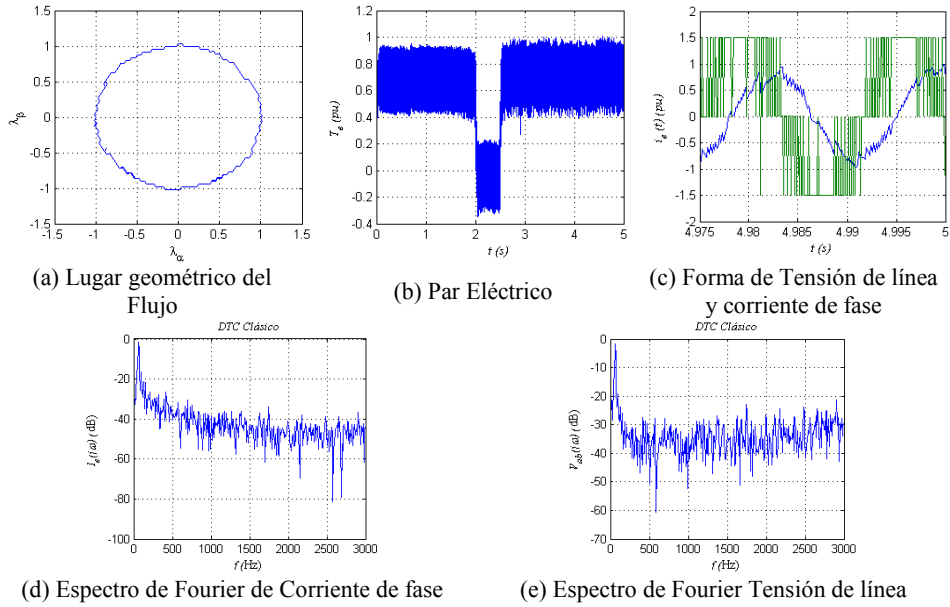


Fig. 2: Resultados del DTC Clásico.

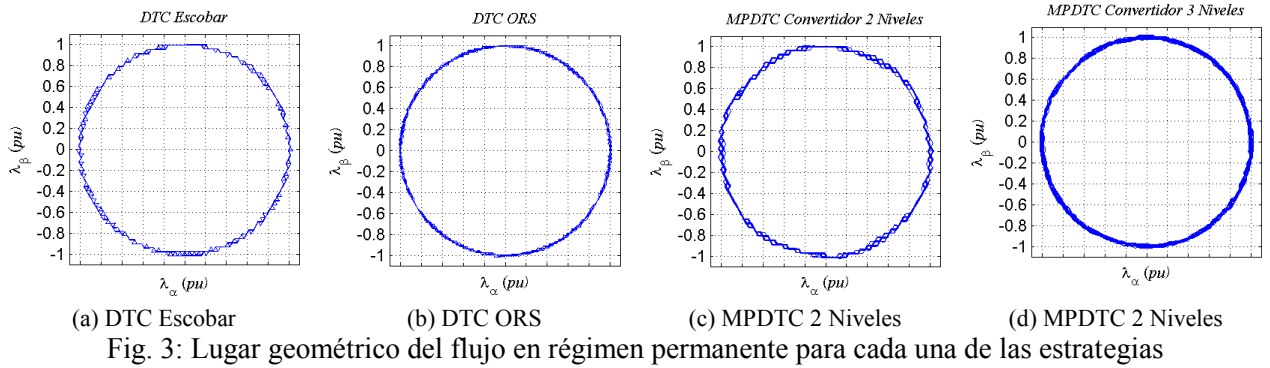


Fig. 3: Lugar geométrico del flujo en régimen permanente para cada una de las estrategias

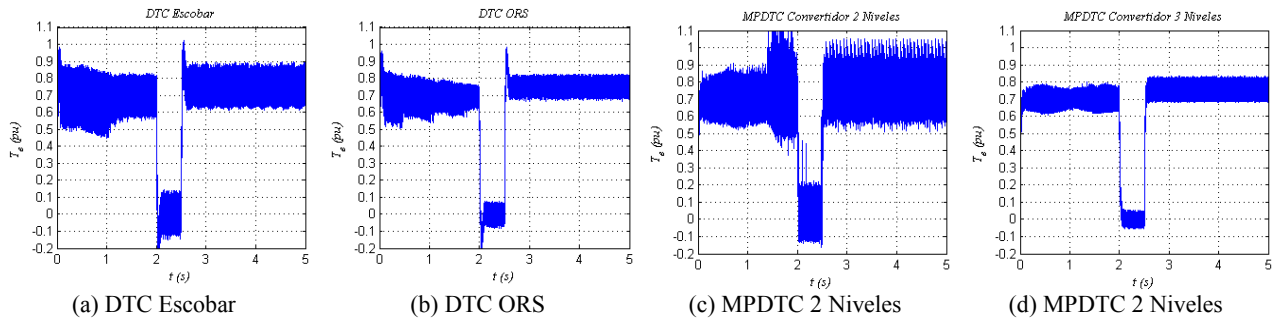


Fig. 4: Par eléctrico para cada una de las estrategias

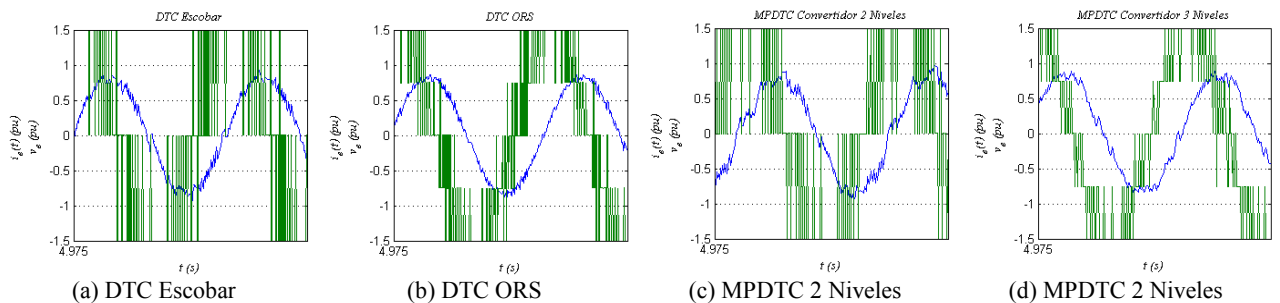


Fig. 5: Formas de onda de corriente de fase y tensión de línea

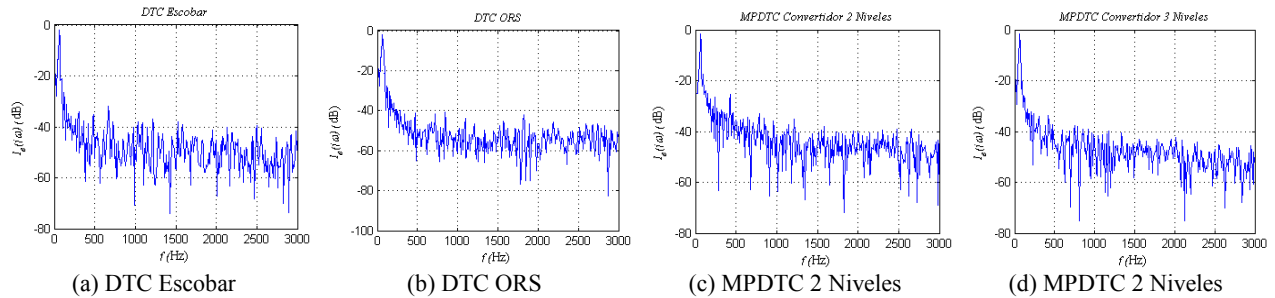


Fig. 6: Espectro de Fourier de las corrientes de fase

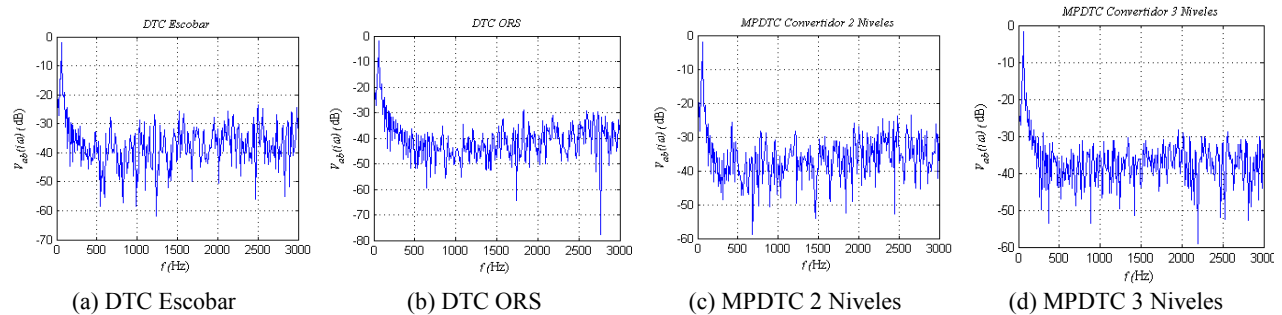


Fig. 7: Espectro de Fourier de tensiones

El contenido armónico de las corrientes de fase mejora al utilizar estrategias predictivas para el control, en la (Fig. 6) se muestra como en todos los casos se alcanza menos de -40 dB antes de los 1 kHz , mejorando al DTC Clásico, es decir, las estrategias predictivas introducen menor contenido armónico de alta frecuencia. Existe una mayor atenuación al utilizar convertidores multinivel, especialmente el caso DTC ORS (Fig. 6.c).

El espectro armónico de las tensiones (Fig. 7) mejora con la utilización del puente de tres niveles, este hecho es previsible, conociendo las formas de onda involucradas (Fig. 5b y Fig. 5d). Adicionalmente es interesante resaltar como el algoritmo MPDTC de 3 niveles impone menos conmutaciones que DTC ORS, debido a las limitaciones impuestas en el algoritmo, esto redundará en menores pérdidas.

VI. CONCLUSIONES

La aplicación de estrategias predictivas para el DTC sin utilizar técnicas de modulación en máquinas de inducción permite mejorar las prestaciones del control con respecto al DTC Clásico. De esta manera se reducen los rizados de par y flujo, además del contenido armónico de las corrientes.

Los convertidores multinivel son una alternativa factible para aumentar el nivel de tensión y/o potencia de los accionamientos con máquinas de inducción mejorando las prestaciones del control, disminuyendo los esfuerzos dieléctricos del aislamiento (dv/dt).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Blaschke "The principle of field orientation as applied to the new TRANSVEKTOR close-loop control system for rotating-field machines" (Siemens Review, 1972, pages 217-220)
- [2] I. Takahashi y T. Noguchi "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor" (IEEE Transactions on Industry Applications, September 1986, vol. 22, n°. 5, pages 820-827)
- [3] D. M. Cannon y P. B. Kouvaritakis "Non-Linear Predictive Control: Theory & Practice" (1o ed. The Institution of Engineering and Technology, 2001)
- [4] R. Kennel y A. Linder "Predictive control of inverter supplied electrical drives" (Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual, vol. 2, pages 761-766)

- [5] T. G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli, y L. M. Tolbert "Direct torque control of induction machines using space vector modulation" (IEEE Transactions on Industry Applications, October 1992, vol. 28, n^o. 5, pages 1045-1053)
- [6] Yongdong Li, Hu Hu, Jie Chen, y Jixiong Wu "Predictive control of torque and flux of induction motor with an improved stator flux estimator" (Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual, 2001, vol. 3, pages 1464-1469)
- [7] G. Abad, M. A. Rodriguez, y J. Poza "Two-Level VSC Based Predictive Direct Torque Control of the Doubly Fed Induction Machine With Reduced Torque and Flux Ripples at Low Constant Switching Frequency" (IEEE Transactions on Power Electronics, May 2008, vol. 23, n^o. 3, pages 1050-1061)
- [8] G. Escobar, A. M. Stankovic, E. Galvan, J. M. Carrasco, y R. Ortega "A family of switching control strategies for the reduction of torque ripple in DTC" (IEEE Transactions on Control Systems Technology, November 2003, vol. 11, n^o. 6, pages 933-939)
- [9] M. A. Prats, G. Escobar, E. Galvan, J. M. Carrasco, y R. Portillo "A switching control strategy based on output regulation subspaces for the control of induction motors using a three-level inverter" (IEEE Power Electronics Letters, June 2003, vol. 1, n^o. 2, pages 29-32)
- [10] T. Geyer, G. Papafotiou, y M. Morari "Model Predictive Direct Torque Control-Part I: Concept, Algorithm, and Analysis" (IEEE Transactions on Industrial Electronics, June 2009, vol. 56, n^o. 6, pages 1894-1905)
- [11] G. Papafotiou, J. Kley, K. G. Papadopoulos, P. Bohren, y M. Morari "Model Predictive Direct Torque Control—Part II: Implementation and Experimental Evaluation" (IEEE Transactions on Industrial Electronics, Jun. 2009, vol. 56, n^o. 6, pages. 1906-1915)
- [12] A. José M. "Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General" (1o ed. Sartenejas, Baruta: Equinoccio, 2008)
- [13] R. Ortega, N. Barabanov, G. Escobar, y E. Valderrama "Direct torque control of induction motors: stability analysis and performance improvement" (IEEE Transactions on Automatic Control, August. 2001 vol. 46, n^o. 8, pages 1209-1222)