



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i6.2314>

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

Analysis of V / f control with SVM on a variable speed drive

Análise de controle V / f com SVM em uma unidade de velocidade variável

Rogger Andrade-Cedeno ^I
randrade1623@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-5280-4575>

Jesús Alberto Perez-Rodriguez ^{II}
jesus.perez@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1578-2565>

Correspondencia:rogger.andrade@gmail.com

***Recibido:** 25 de agosto 2021 ***Aceptado:** 15 de septiembre de 2021 * **Publicado:** 06 de octubre de 2021

- I. Maestría en Electricidad, Universidad Técnica de Manabí.
- II. Departamento de Electricidad y Electrónica, Universidad Técnica de Manabí.

Resumen

Los accionamientos de velocidad variable son ampliamente utilizados para resolver necesidades de control de movimiento en diferentes aplicaciones industriales y no industriales, donde las exigencias dinámicas de la aplicación determinarán las especificaciones del accionador. En el presente trabajo se revisaron los modelos del motor de inducción, variador de velocidad, control escalar con relación V/f constante y la modulación por vector espacial (SVM), utilizando el bloque “Drive AC2” de la biblioteca Specialized Power System de Simulink. Se realizaron varias simulaciones ante diferentes escenarios operativos para analizar el desempeño. Las rampas provistas por el variador de velocidad reducen la corriente de arranque frente al método de arranque directo. La operación en lazo abierto presenta error en la velocidad y tiene un desempeño más bajo que la operación en lazo cerrado, donde se debe implementar una compensación del deslizamiento, requiriéndose un tacogenerador para la retroalimentación de la velocidad. En algunas aplicaciones de torque constante puede ser requerido compensación de voltaje en bajas velocidades. El variador de velocidad produce armónicos tanto en el lado de la red como del motor, pero esto puede ser corregido con la implementación de filtros de armónicos. Este tipo de accionamiento es suficiente para aplicaciones con requerimientos dinámicos poco exigentes, como bombas, compresores y ventiladores.

Palabras claves: Accionamiento de velocidad variable; motor de inducción; variador de velocidad; control escalar; control V/f; modulación de vector espacial; Simulink.

Abstract

Variable speed drives are widely used to solve motion control needs in different industrial and non-industrial applications, where the dynamic demands of the application will determine the actuator specifications. In the present work, the models of the induction motor, variable speed drive, scalar control with constant V / f ratio and space vector modulation (SVM) were reviewed, using the “Drive AC2” block from Simulink's Specialized Power System library . Several simulations were carried out under different operating scenarios to analyze performance. The ramps provided by the variable speed drive reduce the starting current compared to the direct starting method. Open-loop operation presents speed error and has a lower performance than closed-loop operation, where slip compensation must be implemented, requiring a tachogenerator for speed feedback. In some constant torque applications, voltage compensation may be required at low speeds. The variable speed drive produces harmonics

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

on both the mains and motor sides, but this can be corrected with the implementation of harmonic filters. This type of drive is sufficient for applications with less demanding dynamic requirements, such as pumps, compressors and fans.

Keywords: Variable speed drive; induction motor; speed variator; scalar control; V / f control; space vector modulation; Simulink.

Resumo

Drives de velocidade variável são amplamente utilizados para resolver as necessidades de controle de movimento em diferentes aplicações industriais e não industriais, onde as demandas dinâmicas da aplicação determinarão as especificações do atuador. No presente trabalho foram revisados os modelos do motor de indução, acionamento de velocidade variável, controle escalar com relação V / f constante e modulação vetorial espacial (SVM), utilizando o bloco “Drive AC2” da biblioteca Specialized Power System da Simulink. Diversas simulações foram realizadas em diferentes cenários operacionais para analisar o desempenho. As rampas fornecidas pelo acionamento de velocidade variável reduzem a corrente de partida em comparação com o método de partida direta. A operação em malha aberta apresenta erro de velocidade e tem desempenho inferior à operação em malha fechada, onde a compensação de escorregamento deve ser implementada, exigindo um tacogerador para realimentação de velocidade. Em algumas aplicações de torque constante, a compensação de tensão pode ser necessária em velocidades baixas. O acionamento de velocidade variável produz harmônicos nos lados da rede e do motor, mas isso pode ser corrigido com a implementação de filtros de harmônicos. Este tipo de acionamento é suficiente para aplicações com requisitos dinâmicos menos exigentes, como bombas, compressores e ventiladores.

Palavras-chave: Variable speed drive; motor de indução; variador de velocidade; controle escalar; Controle V / f; modulação do vetor espacial; Simulink.

Introducción

Una de las máquinas eléctricas más estudiadas es el motor de inducción, por ser ampliamente utilizado en diferentes aplicaciones domésticas, comerciales e industriales, debido a las múltiples ventajas que presenta frente a otras máquinas eléctricas (Arnanz, García, & Miguel, 2016; Bharti, Kumar, & Prasad, 2019; Moreano Peña & Vásquez Díaz, 2016; Nasser & Szemes, 2018). Se estima que más de

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

la mitad de la energía eléctrica en todo el mundo es consumida por motores de inducción (Tigade & Sreejeth, 2018).

El acelerado avance de la electrónica de potencia y los microprocesadores ha permitido posicionar a los variadores de velocidad como la principal tecnología para el control de movimiento en aplicaciones accionadas por motor de inducción (Anjum & Sharma, 2018; Hartono, Sudjoko, & Iswahyudi, 2019). Algunas de las aplicaciones más comunes son: bombas, compresores, ventiladores y pequeñas máquinas, que requieren un control simple, de precisión moderada y de bajo procesamiento computacional, donde la estrategia de control escalar con relación V/f constante es la más factible para estos casos (Arun Shankar, Umashankar, Padmanaban, Bhaskar, & Almakhles, 2019; Elan & Aishwarya, 2014). El control V/f no opera solo, sino que envía las señales de referencia al modulador de ancho de pulsos (PWM), siendo este último el que controla la conmutación de los semiconductores de potencia que alimentan al motor. Utilizar la técnica PWM adecuada trae consigo ciertas ventajas, por ejemplo se puede reducir la distorsión armónica total (THD), usar efectivamente el voltaje en el link DC, reducir las interferencias electromagnéticas (EMI), reducir las pérdidas en la conmutación y mejorar la distribución de armónicos dentro del espectro (Kumar, Michael, John, & Kumar, 2010). El control escalar también puede combinarse con el tradicional controlador PID en aplicaciones donde existe retroalimentación, por ejemplo en un control de velocidad en lazo cerrado, con lo cual se logra mejorar el desempeño (Anjum & Sharma, 2018; Bharti et al., 2019; Hartono et al., 2019; Moreano Peña & Vásquez Díaz, 2016; Nasser & Szemes, 2018)

En la presente investigación se estudian los modelos de los componentes de un sistema de accionamiento de velocidad variable, así como también los conceptos detrás de la estrategia de control escalar con relación V/f constante, y de la técnica de modulación de vector espacial (SVM). El objeto es modelar y simular un sistema de accionamiento variable en Simulink, para analizar su funcionamiento, sus características dinámicas, y determinar sus potencialidades y limitaciones.

Métodos y materiales

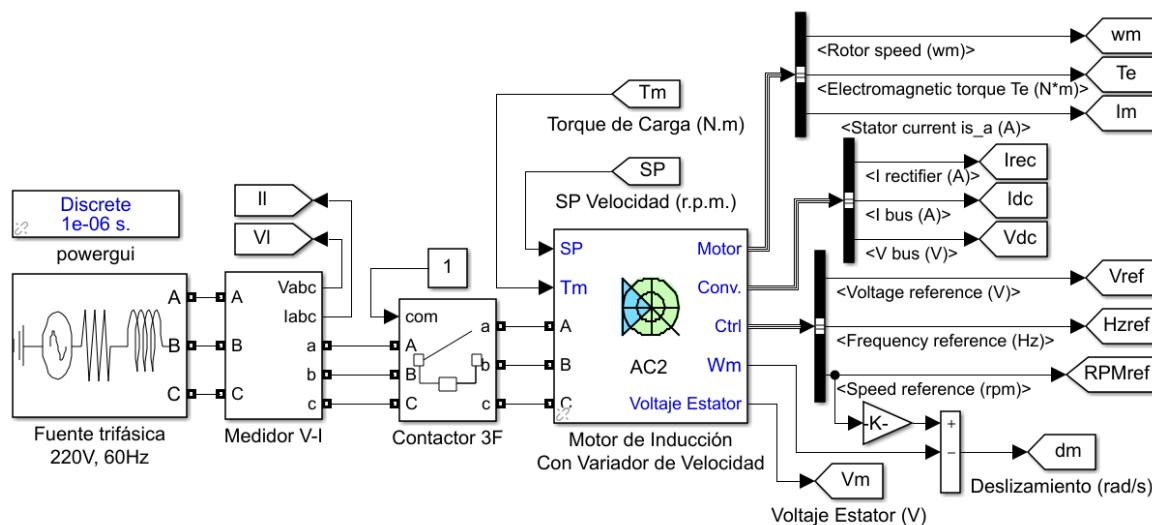
Para analizar el control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable, se acude a la modelación y simulación de sistemas. Los modelos corresponden a componentes de la biblioteca Specialized Power Systems, Simscape Electrical de Simulink, en la versión 2019b de Matlab. En la

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

Figura 1 se muestra el diagrama de bloques del accionamiento de velocidad variable a ser estudiado, con su fuente de alimentación, elemento de maniobra y medidores.

Figura 1.

Diagrama de bloques del accionamiento de velocidad variable

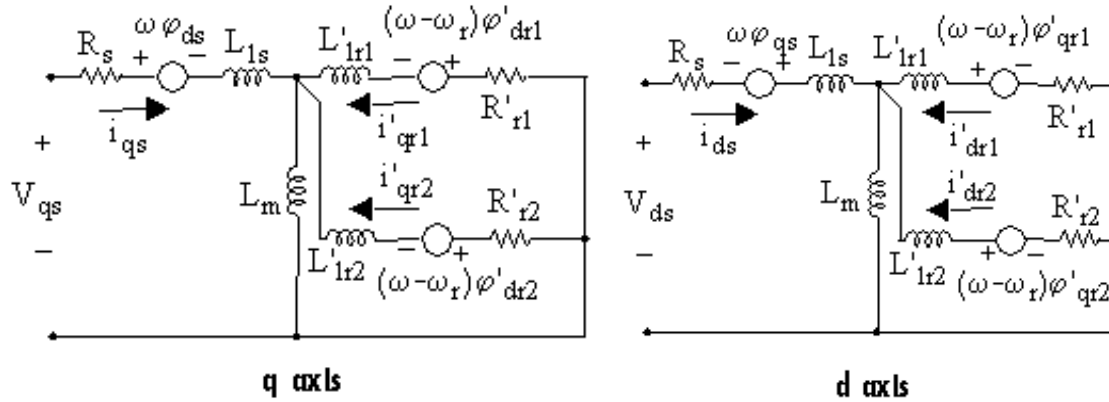


Modelo del motor de inducción trifásico de doble jaula de ardilla

El bloque de máquina asincrónica de la librería Simscape Specialized Power Systems, permite modelar motores de inducción trifásicos del tipo rotor bobinado, jaula de ardilla o doble jaula de ardilla. Los bobinados del estator y del rotor están conectados en Y con neutro interno. El componente eléctrico de la máquina está representado por un modelo de espacio de estados de cuarto orden (o de sexto orden para el caso de la máquina de doble jaula de ardilla), y la parte mecánica por un sistema de segundo orden. Todas las variables y parámetros eléctricos están referidos al estator, además, las cantidades del estator y el rotor están en un marco de referencia arbitrario de dos ejes (MathWorks, 2021a). El marco de referencia de dos ejes, conocido como marco de referencia dq, es la resultante de la aplicación de las transformadas de Clarke y Park (MathWorks, 2021d). En la Figura 2 se muestra el circuito equivalente del motor de inducción de doble jaula, bajo el marco de referencia dq.

Figura 2.

Circuito equivalente para la máquina de inducción de doble jaula.



Nota: Marco de referencia dq

El componente eléctrico de la máquina se rige con las Ecuaciones (1) a la (16).

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\varphi_{qs}/dt + \omega \varphi_{ds} \quad (1)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\varphi_{ds}/dt - \omega \varphi_{qs} \quad (2)$$

$$0 = R'_{r1} i'_{qr} + d\varphi'_{qr1}/dt + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr1} \quad (3)$$

$$0 = R'_{r1} i'_{dr1} + d\varphi'_{dr1}/dt - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr1} \quad (4)$$

$$0 = R'_{r2} i'_{qr2} + d\varphi'_{qr2}/dt + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr2} \quad (5)$$

$$0 = R'_{r2} i'_{dr2} + d\varphi'_{dr2}/dt - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr2} \quad (6)$$

$$T_e = 1,5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (7)$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (8)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (9)$$

$$\varphi'_{qr1} = L'_{r1} i'_{qr1} + L_m i_{qs} \quad (10)$$

$$\varphi'_{dr1} = L'_{r1} i'_{dr1} + L_m i_{ds} \quad (11)$$

$$\varphi'_{qr2} = L'_{r2} i'_{qr2} + L_m i_{qs} \quad (12)$$

$$\varphi'_{dr2} = L'_{r2} i'_{dr2} + L_m i_{ds} \quad (13)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (14)$$

$$L'_{r1} = L'_{lr1} + L_m \quad (15)$$

$$L'_{r2} = L'_{lr2} + L_m \quad (16)$$

Para el componente mecánico rigen las Ecuaciones (17) y (18)

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m) \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \Theta_m = \omega_m \quad (18)$$

Donde, R_s, L_{ls} son la resistencia e inductancia de fuga del estator. L_m es la inductancia de magnetización. L_s es la inductancia total del estator. V_{qs}, i_{qs} son el voltaje y corriente del estator, referidos al eje q. V_{ds}, i_{ds} son el voltaje y corriente del estator, referidos al eje d. $\varphi_{qs}, \varphi_{ds}$ son los flujos del estator referidos al eje q y al eje d. R'_{r1}, L'_{lr1} son la resistencia e inductancia de fuga de la jaula 1 del rotor. R'_{r2}, L'_{lr2} son la resistencia e inductancia de fuga de la jaula 2 del rotor. L'_{r1}, L'_{r2} son las inductancias totales de las jaulas 1 y 2 del rotor. i'_{qr1}, i'_{qr2} son las corrientes de las jaulas 1 y 2 del rotor, referidos al eje q. i'_{dr1}, i'_{dr2} son las corrientes de las jaulas 1 y 2 del rotor, referidos al eje d. $\varphi'_{qr1}, \varphi'_{dr1}$ son los flujos de la jaula 1 del rotor referidos a los ejes q y d. $\varphi'_{qr2}, \varphi'_{dr2}$ son los flujos de la jaula 2 del rotor referidos a los ejes q y d. ω_m es la velocidad angular del rotor. Θ_m es la posición angular del rotor. p es el número de pares de polos. ω_r es la velocidad angular eléctrica ($\omega_m * p$). Θ_r es la posición angular del rotor eléctrica ($\Theta_m * p$). T_e es el torque electromagnético. T_m es el torque mecánico en el eje. J es el coeficiente de inercia del conjunto rotor/carga, el cual se ajusta en infinito para simular el rotor bloqueado. H es la constante inercia del conjunto rotor/carga, el cual se ajusta en infinito para simular el rotor bloqueado. F es el coeficiente de fricción viscoso de conjunto rotor/carga (MathWorks, 2021a).

Modelo del Accionamiento de Velocidad Variable

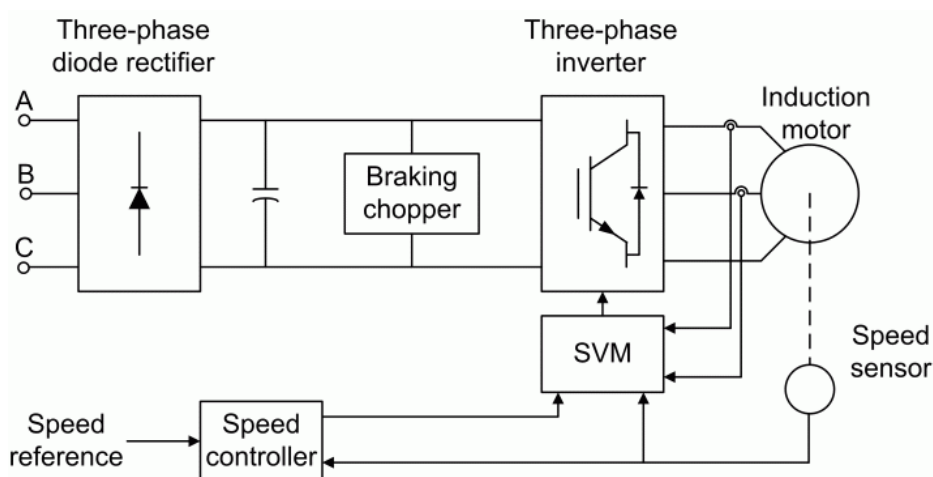
Simscape Specialized Power Systems contiene varios modelos de accionamientos de velocidad variable, con diferentes tipos de máquinas eléctricas, técnicas de control y modulación de ancho de pulso. En esta investigación se trabaja con el bloque “Drive AC2”, el cual es una máscara que contiene en su interior el bloque de máquina asincrónica (motor de inducción), y otros elementos que cumplen

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

la función de variador de velocidad (accionamiento o drive). El diagrama de bloques de la máscara “Drive AC2” se muestra en la Figura 3.

Figura 3.

Diagrama de bloques de la máscara Drive AC2 de Simulink.



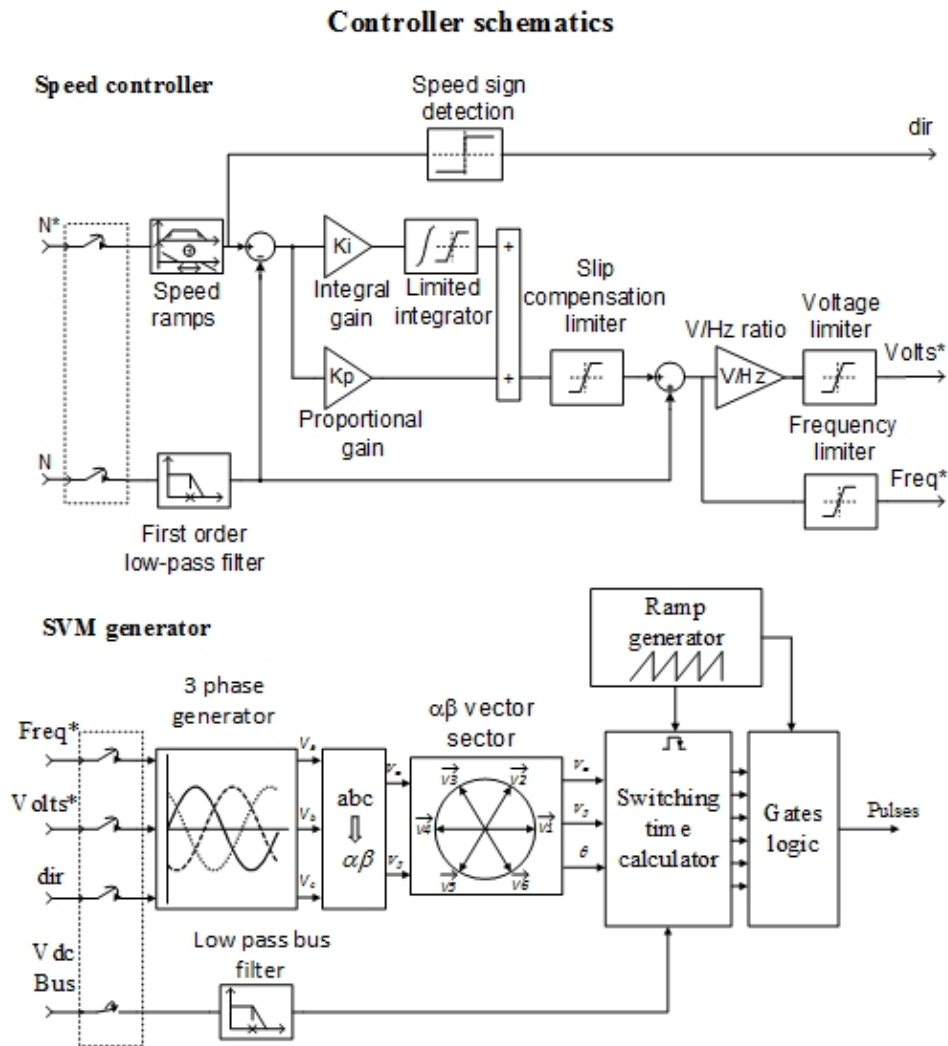
El motor de inducción se modela en base a lo descrito en el punto anterior. Entre los elementos de potencia del variador de velocidad (drive), se tiene: rectificador trifásico, enlace DC e inversor trifásico, mientras que el sistema de control está conformado por controlador de velocidad y modulador de ancho de pulsos (PWM). La topología del rectificador es la de un puente trifásico no controlado conformado por diodos de potencia, y el inversor comprende un puente trifásico controlado formado por IGBTs (con su respectiva red snubber). En este caso el enlace DC corresponde con un chopper de frenado, en cuyo interior se encuentra el capacitor de potencia (característico en variadores PWM-VSI), y el chopper de frenado en sí mismo, formado por un IGBT y una resistencia de frenado dinámico. En lo que respecta al sistema de control, el “Drive AC2” tiene un control de velocidad en lazo cerrado, conformado por el clásico “control escalar de relación V/f constante”, más un “compensador del deslizamiento”. El lazo de control de velocidad emite la referencia de deslizamiento para el motor de inducción, la cual es sumada a la velocidad del rotor medida con un tacómetro, para luego obtener la frecuencia de referencia. La referencia para el voltaje del estator se obtiene de la relación V/f, con la condición de flujo constante. Las referencias de voltaje y frecuencia del estator se utilizan luego para obtener las señales PWM requeridas para el inversor,

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

siguiendo la técnica de modulación por vector espacial (SVM) (MathWorks, 2021c). Los diagramas de bloques del control escalar V/f, y la modulación SVM se aprecian en la Figura 4.

Figura 4.

Diagrama de bloques del sistema de control de la máscara Drive AC2.



Nota: Arriba, control escalar con técnica V/f constante. Abajo, generador de señal PWM con técnica de vector espacial (SVM).

Técnica de control escalar con relación V/f constante

Cuando el motor de inducción opera en estado estable, la velocidad sincrónica de inducción, n_s , y la frecuencia de la fuente de alimentación a dicho motor, f , se relacionan de acuerdo a lo mostrado en la Ecuación (19) (Chapman, 2012).

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad (19)$$

Donde, p es el número de polos. Por otro lado, la Ecuación (20) representa la relación entre el flujo del entrehierro, Φ_m , y el voltaje en el entrehierro del motor, E_m ; el cual es aproximadamente igual al voltaje de la fuente de alimentación, V_s , cuando el motor opera a condiciones nominales (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009).

$$V_s \approx E_m = K * \Phi_m * f \quad (20)$$

Con la Ecuación (19) se deduce que la velocidad de un motor de inducción se puede controlar variando la frecuencia de la fuente de alimentación, pero la Ecuación (20) también nos dice que si el voltaje permanece constante, y se reduce la frecuencia bajo el valor nominal, el flujo se incrementa. Una operación con flujo por arriba del valor nominal, implica incremento de las pérdidas en el cobre y alta corriente de magnetización debido al indeseable alto nivel de saturación magnética (Chapman, 2012). Para mantener una adecuada operación con densidad de flujo nominal, es necesario variar el voltaje V_s de la fuente de manera proporcional con la variación de la frecuencia f , de manera que la relación entre estas dos variables permanezca constante.

$$\frac{V_s}{f} = Constante \quad (21)$$

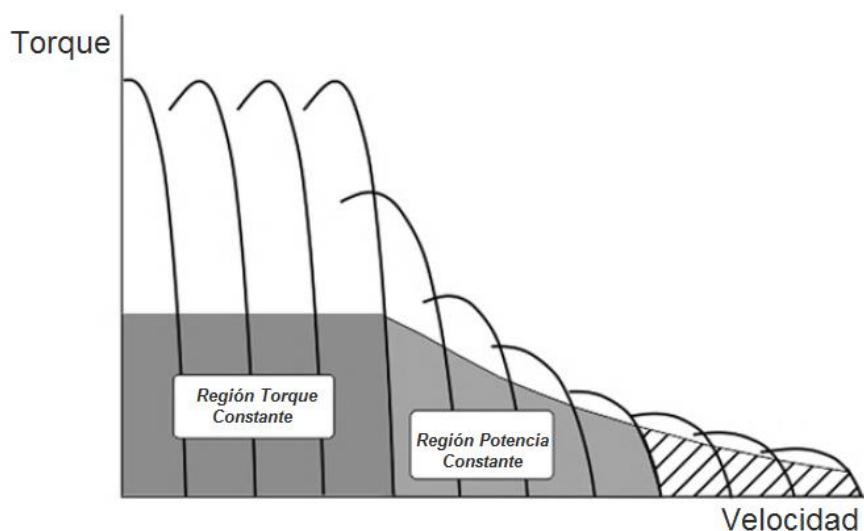
Cuando el voltaje es ajustado de manera que la relación V/f se mantiene constante hasta la velocidad nominal, se obtienen las curvas características de torque versus velocidad mostradas en la Figura 5.. Si la relación V/f se mantiene constante, se observa que hasta la velocidad nominal el torque se

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

mantiene constante, sobre la velocidad nominal la potencia se mantiene constante y el torque se reduce a medida que se incrementa la velocidad (Hughes, 2013).

Figura 5.

Regiones de torque constante y potencia constante en el control de velocidad de un motor de inducción



Nota. Adaptado de “Limitations imposed by the inverter – constant power and constant torque regions” por Hughes, 2013, *Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications*, p. 212. Derechos Reservados 2010 por Pearson Educación, S.A

La técnica de control escalar con relación V/f constante puede ser implementada tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. El control V/f en lazo abierto es adecuado para controlar el estado estable de aplicaciones simples, como ocurre con bombas, compresores y ventiladores, donde los cambios ocurren de manera no tan severa. Esta técnica no es muy recomendada en procesos donde ocurre lo siguiente (Rinkevičienė & Batkauskas, 2009):

- Aplicaciones donde se desea operar en bajas velocidades (menos de 10 Hz), debido a que el torque en bajas velocidades es pobre porque la caída de voltaje en el estator afecta significativamente la corriente generadora de flujo. Es por esto que muchos variadores de velocidad incluyen la opción de “compensador de voltaje” para potenciar la relación V/f en el arranque, mejorando así el flujo y consecuentemente el torque de arranque.
- Aplicaciones que requieren un desempeño dinámico superior.
- Aplicaciones que requieren un control directo del torque, más que la frecuencia.

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

Cuando se desea tener una mayor precisión en el control de la velocidad, se puede implementar el control V/f en lazo cerrado mediante un “compensador del deslizamiento”. La principal desventaja del control escalar en lazo abierto es que no logra controlar el torque, por lo que si el torque de la carga cambia, la velocidad del motor también cambia (Habbi, Ajeel, & Ali, 2016).

Modulación por vector espacial (SVM)

Existen varias técnicas PWM, y en inversores del tipo PWM-VSI las dos técnicas más utilizadas son: Modulación de Ancho de Pulso Senoidal (Sinusoidal PWM, SPWM), y Modulación por Vector Espacial (Space Vector Modulation, SVM) (Kumar et al., 2010; Shayaa & Tawfik, 2014). La SVM, la cual también es conocida como Modulación de Ancho de Pulso por Vector Espacial (Space Vector Pulse With Modulation, SVPWM), presenta algunas ventajas frente a la SPWM, las cuales se describen a continuación:

- Mejor utilización del voltaje del enlace DC, ya que la técnica SVM puede usar hasta un 15% más del voltaje del enlace DC frente a la técnica SPWM. (Mudassir, Ismail.B, Khan, & Azam, 2015; Thorat, Waware, Shingade, & Matre, 2014).
- Menor distorsión armónica total (THD) (Ahmed & Ali, 2013; Ojha, Pandey, & Systems, 2016; Sharma & Garg, 2014).
- Mayor factor de potencia (Ahmed & Ali, 2013; Mudassir et al., 2015).
- Menores pérdidas en la conmutación (Biabani & Ali, 2016; Sharma & Garg, 2014).

La Figura 6 muestra el concepto de la SVM para el sistema de control de un inversor trifásico conectado a un motor de inducción, conformado por de seis elementos conmutadores. Existen 8 configuraciones válidas de conmutación, y cada configuración produce una tensión específica en los terminales de la máquina. Estas tensiones son vectores espaciales básicos, y están representados en magnitud y dirección en un hexágono de vectores espaciales, tal como se muestra en la Figura 7. Los estados de conmutación que corresponden a los vectores básicos (para la dirección) y a los vectores nulos (para la magnitud), se combinan para aproximar un vector de tensión de cualquier magnitud, en cualquier posición, dentro del hexágono de vectores espaciales. Por ejemplo, por cada periodo PWM el vector de referencia de tensión V_{ref} se promedia usando una secuencia de conmutación de dos vectores espaciales adyacentes (V_3 y V_4) por un periodo de tiempo especificado, y un vector nulo (V_7 o V_8) durante el resto del periodo (MathWorks, 2021b).

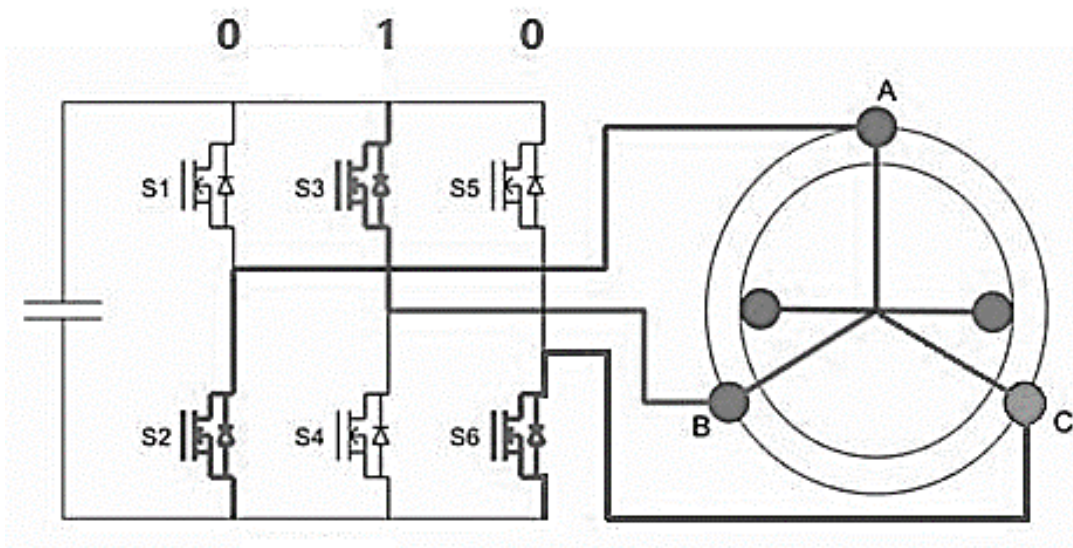
Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

Controlando la secuencia de conmutación, y por consiguiente el tiempo de activación de los pulsos, se puede obtener cualquier vector de tensión con magnitud y dirección variantes para cada periodo de PWM. El objeto de la técnica SVM es generar secuencias de conmutación que correspondan con el vector de tensión de referencia para todos los periodos de PWM, y de esta forma obtener un vector espacial en rotación continua (MathWorks, 2021b). Por cada periodo de PWM, con el vector de tensión como referencia de entrada, el algoritmo SVM realiza lo siguiente:

- Calcula los tiempos de activación y desactivación basándose en el vector de tensión de referencia.
- Utiliza tiempos de compuerta para generar las formas de onda de modulación de doble cresta.
- Utiliza tiempos de compuerta para generar pulsos de compuerta adecuados para los conmutadores del inversor.

Figura 6.

Concepto de la modulación SVM en inversor trifásico conectado a motor.

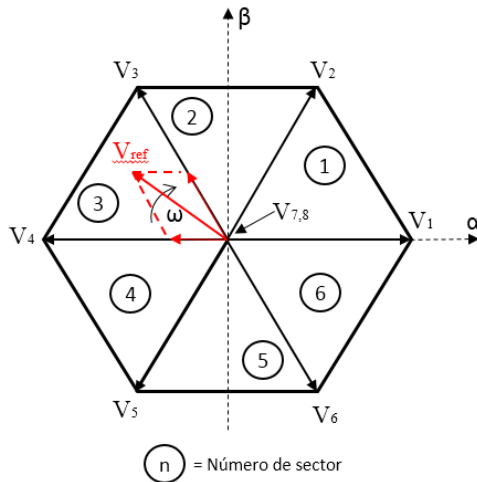


Nota. Los estados de los conmutadores S2, S4 y S6 son complementarios a S1, S3 y S5. Adaptado de “Modulación de vector espacial (SVM) para sistemas de control de motores” por MathWorks (2021b)

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

Figura 7.

Hexágono de vectores espaciales de la técnica SVM.

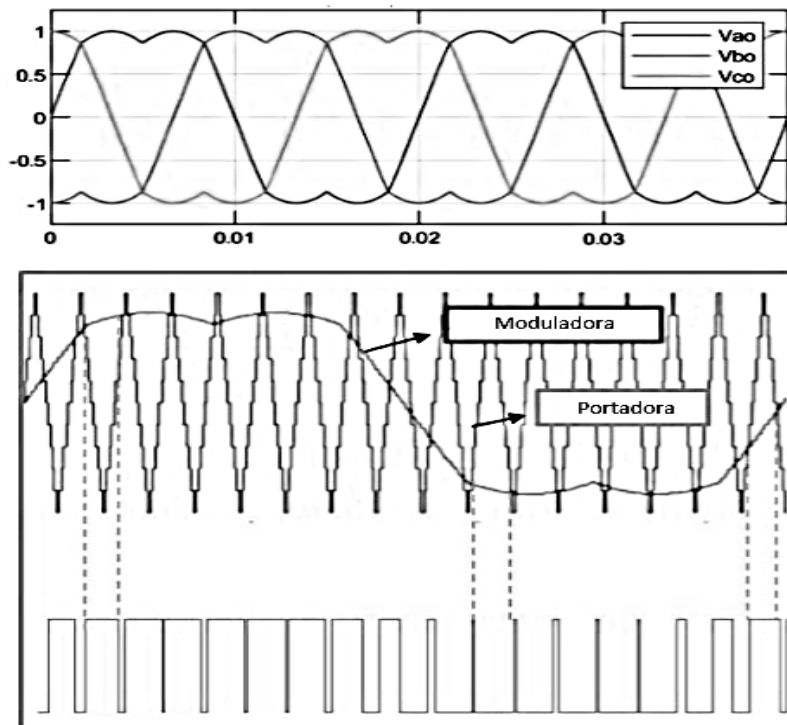


Vector Espacial	S1	S3	S5
V1	1	0	0
V2	1	1	0
V3	0	1	0
V4	0	1	1
V5	0	0	1
V6	1	0	1
V7	0	0	0
V8	1	1	1

Nota. Hexágono de vectores espaciales con vectores básicos V1-V6 y vectores nulos V7 –V8. Adaptado de “Modulación de vector espacial (SVM) para sistemas de control de motores” por MathWorks (2021b)

Figura 8.

Funcionamiento del algoritmo SVM.



Nota. Arriba, señales de tensión de referencia con SVM. Abajo, Generación de pulsos de compuerta como resultado de comparar la onda moduladora con la onda portadora. Adaptado de “Modulación de vector espacial (SVM) para sistemas de control de motores” por MathWorks (2021b)

La onda de tensión generada con una doble cresta mostrada en la Figura 8, maximiza la utilización de la tensión del enlace DC disponible. Esto proporciona una mejor salida de tensión nominal si se compara con la técnica SPWM (MathWorks, 2021b). Finalmente las señales de compuerta generadas son aplicadas a los conmutadores del inversor trifásico para el accionamiento del motor a la velocidad o par deseado.

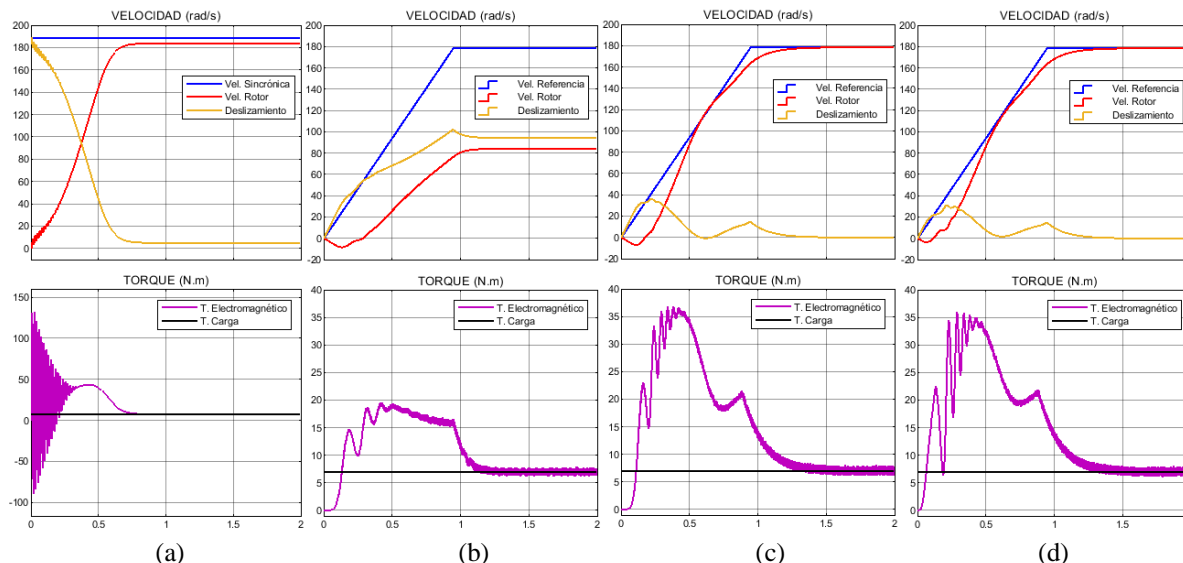
Análisis y discusión de resultados

Para las simulaciones se consideró un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla, con valores nominales de 3 HP, 220 Vrms, 60 Hz y 1725 r.p.m. En la Figura 9 se presenta la respuesta dinámica de la velocidad y el torque, para una carga nominal de 7 N.m. constante.

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

Figura 9.

Respuesta dinámica de la velocidad y el torque para carga de 7 N.m. constante



Nota: (a) conexión directa a la red (velocidad nominal fija). (b) variador de velocidad sin compensación del deslizamiento (lazo abierto). (c) variador de velocidad con compensación del deslizamiento (lazo cerrado). (d) variador de velocidad con compensación del deslizamiento y compensación de voltaje en bajas velocidades del 7%. Para los casos de variador de velocidad el set-point se fijó en 1700 r.p.m. (178 rad/s)

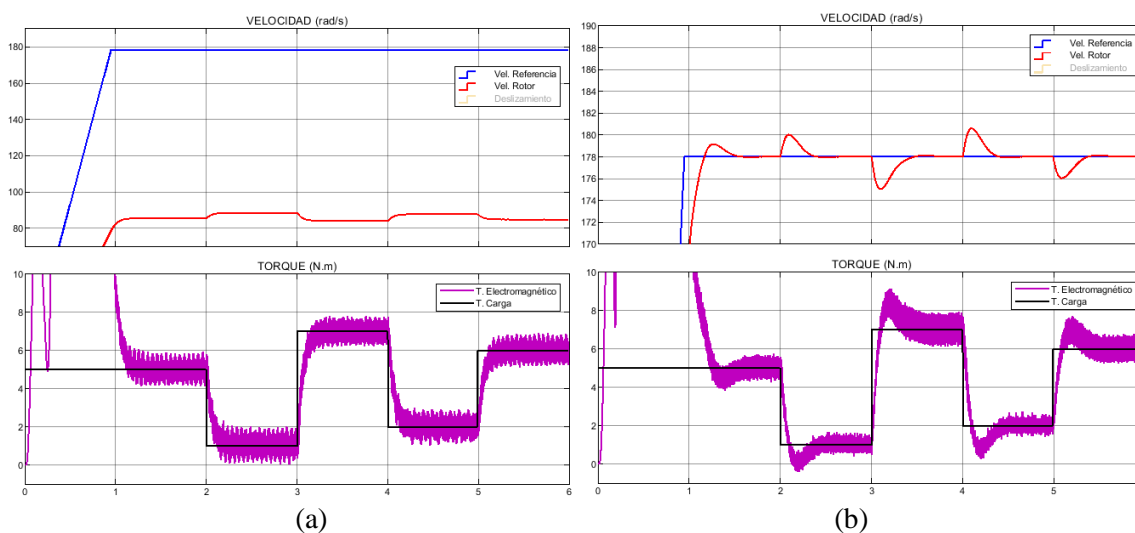
La Figura 9a corresponde con el motor de inducción operando a condiciones nominales, con conexión directa a la red mediante arranque directo. Aquí se aprecia el deslizamiento característico de las máquinas asíncronas. En Figura 9b ya se opera con variador de velocidad con rampa de aceleración/desaceleración de 1800 rpm/s, con un set-point de velocidad de 1700 rpm (178 rad/s), y el sistema de control en lazo abierto, razón por la que se observa un considerable error de velocidad, y por lo tanto gran deslizamiento. En la Figura 9c se cierra el lazo de control mediante el compensador de deslizamiento (controlador PI), con esto se logra corregir el error de velocidad. En los dos casos anteriores se aprecia que en los primeros 200 milisegundos la velocidad toma valores negativos, producto del insuficiente torque en velocidades menores a 10 Hz (debido a la relación V/f constante). En la Figura 9d se corrige el problema anterior, configurando un 7% de compensación de voltaje para bajas velocidades. Se observó que si el torque de la carga aumenta, y no se realiza compensación de voltaje para bajas velocidades, el torque del motor no logra cubrir el torque de la carga y no se produce velocidad.

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

En la Figura 10 se aprecia la respuesta dinámica del sistema para una carga de torque variable, entre 1 y 7 N.m, con referencia de velocidad en 1700 rpm (178 rad/s). Cuando se opera en lazo abierto, a mayor torque de carga mayor deslizamiento y mayor error de velocidad. Cuando se cierra el lazo de control el error de velocidad en estado estable es cero.

Figura 10.

Respuesta dinámica de la velocidad y el torque para carga entre 1 y 7 N.m.

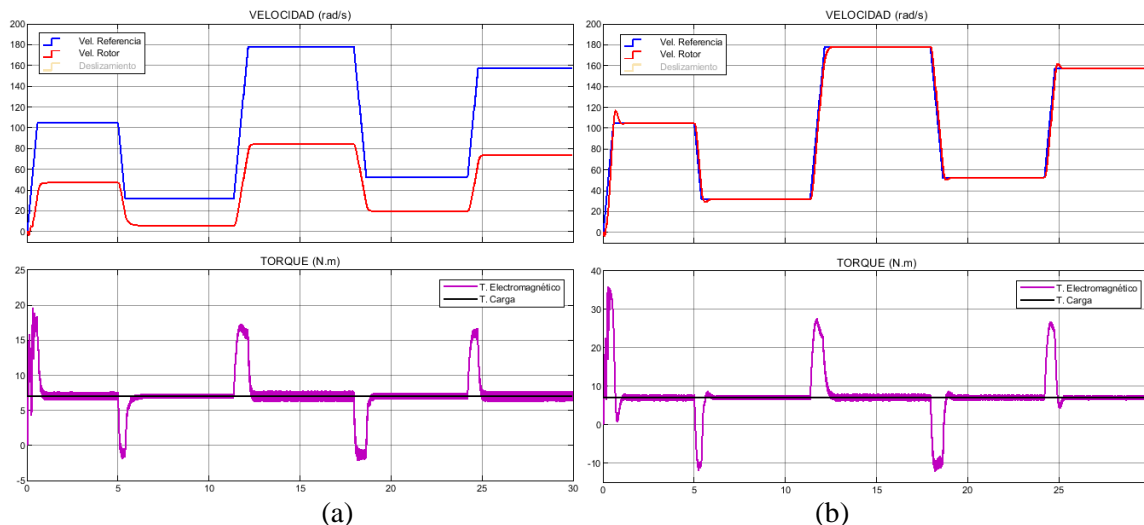


Nota: (a) operación en lazo abierto. (b) operación en lazo cerrado (con compensación del deslizamiento).
Para ambos casos una compensación de voltaje para bajas velocidades del 7%.

En la Figura 11 se presenta la operación continua a varias velocidades, para un torque de carga constante de 7 N.m.

Figura 11.

Respuesta dinámica de la velocidad y el torque para diferentes velocidades



Nota: (a) operación en lazo abierto. (b) operación en lazo cerrado (con compensación del deslizamiento).
Para ambos casos una compensación de voltaje para bajas velocidades del 7%.

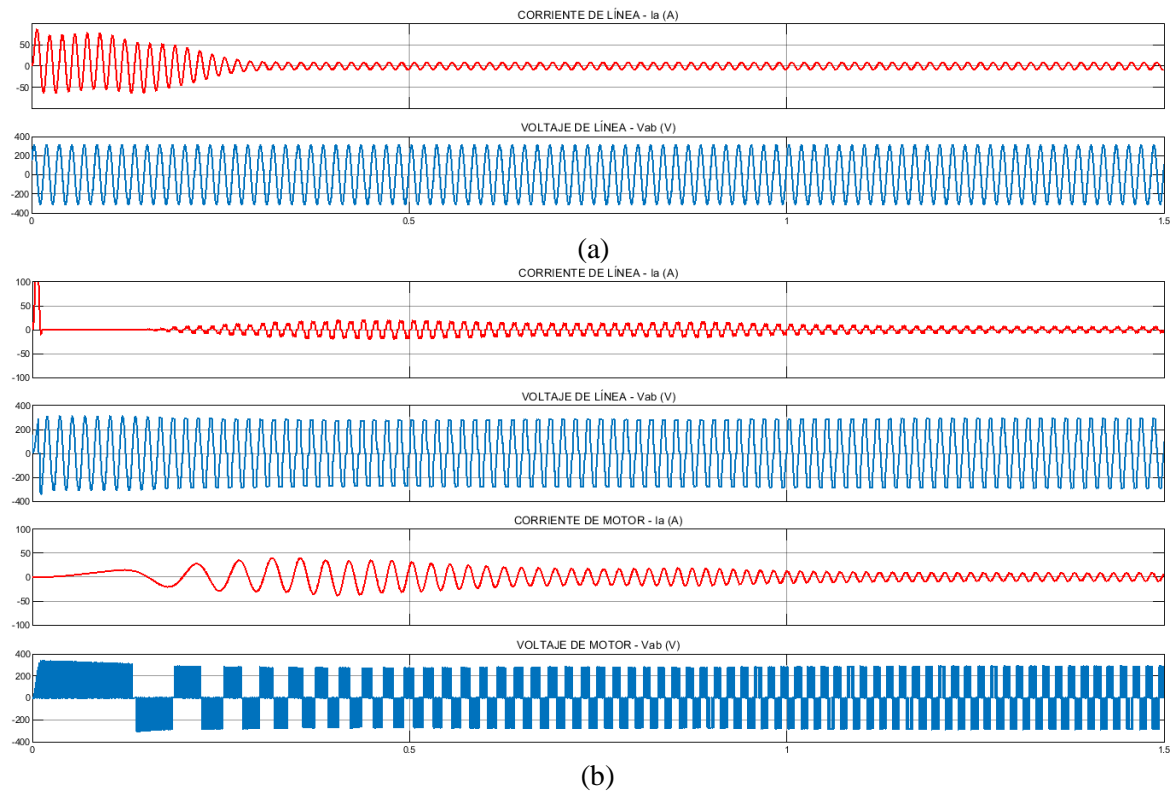
En la Figura 12 se aprecian las formas de onda de las corrientes y los voltajes durante el proceso de arranque del motor de inducción. La Figura 12a corresponde con el arranque directo mediante conexión directa a la red, proceso que dura aproximadamente 250 ms (15 ciclos). Se observa que la corriente de arranque es aproximadamente 10 veces la corriente en estado estable. Por otro lado, la Figura 12b muestra el proceso de arranque mediante rampa de aceleración de 1800 rpm/s, provista por el variador de velocidad. En este segundo caso se observa que la corriente de arranque se reduce algo más de la mitad, comparado con el método de arranque directo.

Las formas de onda de los voltajes y las corrientes en estado estable, tanto en la entrada del variador como del motor, son como se muestran en la Figura 13, donde se puede apreciar claramente la distorsión armónica.

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

Figura 12.

Corrientes y voltajes en el arranque

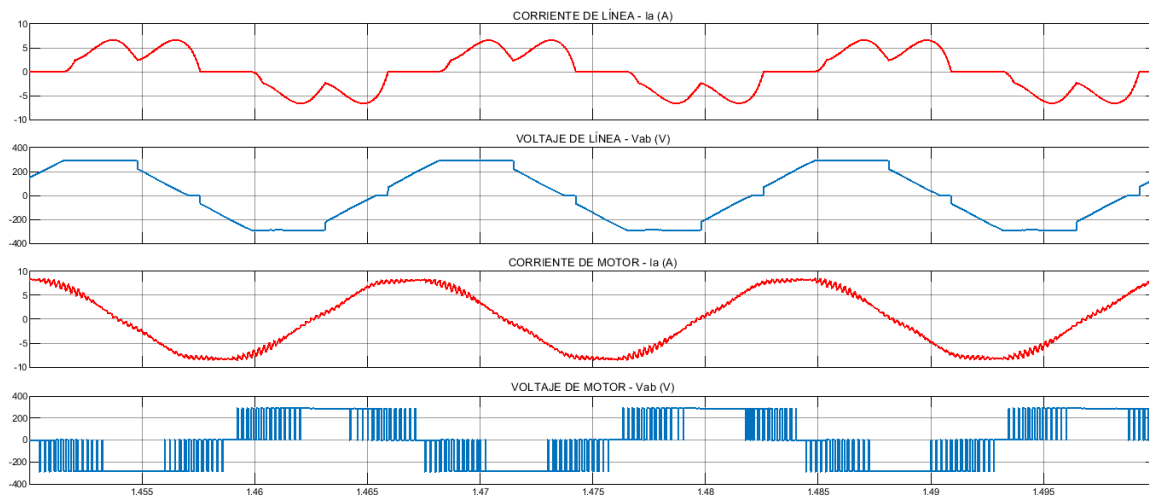


Nota: a) arranque directo, carga nominal de 7 N.m constante (b) arranque con variador de velocidad, carga nominal de 7 N.m constante, set-point de velocidad en 1700 rpm, rampa de aceleración de 1800 rpm/, con compensación del deslizamiento y del voltaje en bajas velocidades.

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

Figura 13.

Corrientes y voltajes en estado estable cuando se opera con variador de velocidad



Nota: Carga nominal de 7 N.m, y velocidad de 1700 rpm.

La Tabla 1 presenta los indicadores de la distorsión armónica total (THD), el cual puede ser obtenido mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), herramienta que forma parte del bloque especializado “powergui” de Simulink.

Tabla 1

Distorsión Armónica Total (THD)

THD de Corriente		THD de Voltaje	
Línea	Motor	Línea	Motor
38,72	23,93	8,39	55,11

Nota. Valores expresados en %

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

La operación con variador de velocidad afecta la calidad de la energía tanto del lado de la red eléctrica, como del motor de inducción. La solución para reducir las armónicas es la implementación de filtros a la entrada y la salida del variador de velocidad.

Conclusiones

En el presente trabajo se estudiaron los modelos de los componentes de potencia y control de un accionamiento de velocidad variable, conformado por motor de inducción trifásico y variador de velocidad, comandados por el control escalar con relación V/f constante combinado con la técnica de modulación de vector espacial (SVM). Los modelos fueron obtenidos del bloque “Drive AC2” de la biblioteca Specialized Power System de Simulink, Matlab. Se simularon varios escenarios operativos para el análisis del desempeño. Una ventaja de operar con variador de velocidad es que la rampa de aceleración reduce notablemente la corriente de arranque, frente al arranque directo. Se observó que la operación en lazo cerrado con compensación del deslizamiento tiene un mejor desempeño que la operación en lazo abierto, logrando corregir el error de velocidad, pero se requiere un tacogenerador para tener la retroalimentación de la velocidad. Además, en bajas velocidades se debe realizar una compensación de voltaje para que el motor pueda producir el torque suficiente para mover la carga. Una desventaja es la producción de armónicos que se genera tanto en la red como en el motor, pero esto puede ser mejorado mediante la implementación de filtros de armónicos. Esta técnica de control es adecuada en aplicaciones con bajos requerimientos dinámicos, como bombas, compresores y ventiladores; en otras aplicaciones más exigentes se deben estudiar la implementación de otras estrategias de control que brinden un mejor desempeño.

Referencias

1. Ahmed, W., & Ali, S. M. U. (2013). Comparative study of SVPWM (space vector pulse width modulation) & SPWM (sinusoidal pulse width modulation) based three phase voltage source inverters for variable speed drive. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 51, 012027. doi:10.1088/1757-899x/51/1/012027. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/51/1/012027>

2. Anjum, F., & Sharma, N. (2018). Speed Control of Induction Motor using Hybrid PID Fuzzy Controller. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 05(11), 576-580. Recuperado de <https://www.irjet.net/archives/V5/i11/IRJET-V5I11113.pdf>
3. Arnanz, R., García, F. J., & Miguel, L. J. (2016). Métodos de control de motores de inducción: síntesis de la situación actual. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 13(4), 381-392. doi:<https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.10.001>. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9251>
4. Arun Shankar, V. K., Umashankar, S., Padmanaban, S., Bhaskar, M. S., & Almakhlles, D. (2019). Investigation for Performances Comparison PI, Adaptive PI, Fuzzy Speed Control Induction Motor for Centrifugal Pumping Application. Paper presentado en 2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG). doi:[10.1109/CPE.2019.8862351](https://doi.org/10.1109/CPE.2019.8862351). Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8862351/>
5. Bharti, R., Kumar, M., & Prasad, B. M. (2019). V/F Control of Three Phase Induction Motor. Paper presentado en 2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN). doi:[10.1109/ViTECoN.2019.8899420](https://doi.org/10.1109/ViTECoN.2019.8899420). Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8899420>
6. Biabani, M. A. K. A., & Ali, S. M. (2016). Control of induction motor drive using space vector PWM. Paper presentado en 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). doi:[10.1109/ICEEOT.2016.7755324](https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755324). Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7755324>
7. Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas*. (5 ed.). México: McGraw-Hill.
8. Elan, S., & Aishwarya, A. (2014). Simulation & Development of Inverter Fed Three Phase Induction Motor Using V/f Control Strategy. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(4), 151-156. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.637.3857>
9. Habbi, H. M. D., Ajeel, H. J., & Ali, I. I. (2016). Speed Control of Induction Motor using PI and V/F Scalar Vector Controllers. *International Journal of Computer Applications*, 151(7), 36-43. doi:[10.5120/ijca2016911831](https://doi.org/10.5120/ijca2016911831). Recuperado de <https://www.ijcaonline.org/archives/volume151/number7/26248-2016911831>

10. Hartono, H., Sudjoko, R. I., & Iswahyudi, P. (2019). Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Universal Bridge and PID Controller. *Journal of Physics: Conference Series*, 1381, 1-8. doi:10.1088/1742-6596/1381/1/012053. Recuperado de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1381/1/012053/meta>
11. Hughes, A., & Drury, B. . (2013). *Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications* (4 ed.). Oxford: Elsevier Ltd.
12. Kumar, K. V., Michael, P. A., John, J. P., & Kumar, S. S. (2010). Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter ARPJ *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(7), 61-74. Recuperado de http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2010/jeas_0710_362.pdf
13. MathWorks. (2021a). Model dynamics of three-phase asynchronous machine, also known as induction machine, in SI or pu units. Recuperado de <https://la.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>
14. MathWorks. (2021b). Space Vector Modulation (SVM) for Motor Control. Recuperado de <https://www.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/space-vector-modulation.html>
15. MathWorks. (2021c). Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive. Recuperado de <https://la.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/spacevectorpwmvsiinductionmotordrive.html>
16. MathWorks. (2021d). Transformadas de Clarke y Park. Recuperado de <https://la.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/clarke-and-park-transforms.html>
17. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de Potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*. (3 ed.). México: Mc Graw Hill & Interamericana Editores S.A. de C.V.
18. Moreano Peña, J., & Vásquez Díaz, E. (2016). Implementation of V/f scalar control for speed regulation of a three-phase induction motor. Paper presentado en 2016 IEEE ANDESCON. doi:10.1109/ANDESCON.2016.7836196. Recuperado de <http://ieeexplore.ieee.org/document/7836196/>

19. Mudassir, M. A. W., Ismail, B. M., Khan, M. H., & Azam, A. (2015). Comparative Study of SPWM & SVPWM Based Three Phase Voltage Source Inverter for an Ups System Operating Under Non Linear Loads. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4(5), 4214-4224. doi:10.15662/ijareeie.2015.0405046. Recuperado de http://www.ijareeie.com/upload/2015/may/46_3_Comparative_NEW.pdf
20. Nasser, A., & Szemes, P. T. (2018). Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Scalar Method and PID Controller. *Recent Innovations in Mechatronics (RIIM)*, 5(1), 1-5. doi:https://doi.org/10.17667/riim.2018.1/12. Recuperado de <https://ojs.lib.unideb.hu/riim/article/view/3844>
21. Ojha, S., Pandey, A. K. J. I. J. o. P. E., & Systems, D. (2016). Close Loop V/F Control of Voltage Source Inverter using Sinusoidal PWM, Third Harmonic Injection PWM and Space Vector PWM Method for Induction Motor. 7, 217-224.
22. Rinkevičienė, R., & Batkauskas, V. (2009). Influence Of The Inverter Boost Voltage On The Transients Of Variable Speed Drive. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 92(4), 75-78. Recuperado de <https://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/10251>
23. Sharma, N., & Garg, V. K. (2014). Comparison of SPWM VSI and SVPWM VSI FED Induction Machine Using Volt per Hertz Control Scheme. In *Impending Power Demand and Innovative Energy Paths* (pp. 243-249): Krishi Sanskriti.
24. Shayaa, G. S. A., & Tawfik, H. M. (2014). Voltage Source Inverters Control using PWM/SVPWM For Adjustable Speed Drive Applications. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 9(1), 29-45. doi:10.9790/1676-09142945. Recuperado de <http://iosrjournals.org/iosr-jeee/Papers/Vol9-issue1/Version-4/D09142945.pdf>
25. Thorat, A. S., Waware, M. M., Shingade, G. D., & Matre, A. D. (2014). Performance investigation of space vector pulse Width Modulated inverter fed Induction Motor drive. Paper presentado en 2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC). doi:10.1109/ICCPEIC.2014.6915351. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6915351>

Análisis del control V/f con SVM en un accionamiento de velocidad variable

26. Tigade, C., & Sreejeth, M. (2018). Implementation of V/f Adjustable Speed Drive for Induction Motor Using dSPACE dS1104. Paper presentado en 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). doi:10.1109/ICPEICES.2018.8897476. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8897476>

©2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).