

Control de accionamientos eléctricos con capacidad de operación a altas frecuencias de conmutación: perspectivas de futuro

Control of electric drives with high switching frequency operation capabilities: envisioning future prospects

Edorta Ibarra¹, Antoni Arias², Víctor Repecho², Domingo Biel², Andrés Sierra-Gonzalez³ e Iñigo Kortabarria¹

¹ Universidad del País Vasco - UPV/EHU (España).

² Universidad Politécnica de Cataluña. UPC (España).

³ TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (España).

DOI: <https://doi.org/10.6036/10974>

1.- INTRODUCCIÓN

Los accionamientos eléctricos han cobrado gran relevancia en la academia e industria para aplicaciones de tracción [1, 2]. El control en lazo cerrado es fundamental para lograr un desempeño eléctrico y mecánico adecuado, adecuado, rápido, robusto y eficiente. Así, conceptos relacionados con recomendaciones de control son de gran interés para ingenieros que trabajen en soluciones de electromovilidad (coches, aeronaves, etc.) y en industria.

La frecuencia de conmutación de los convertidores de potencia es una característica importante de los accionamientos eléctricos. La mayoría de convertidores utilizan semiconductores de silicio IGBT

o MOSFET. Considerando eficiencia, gestión térmica y limitaciones tecnológicas de los semiconductores, los convertidores basados en silicio operan con frecuencias entre 5 kHz y 20 kHz. Sin embargo, los dispositivos de carburo de silicio (SiC) y nitruro de galio (GaN) de banda ancha (WBG) permiten mayor eficiencia, temperatura de operación y velocidad de conmutación, proporcionando en este último caso menor rizado de par y mayor rango de velocidades. Muchos autores creen que éstos dispositivos sustituirán a los de silicio a corto y medio plazo [3, 4]. En [4], se muestran inversores de tracción SiC operando a frecuencias de conmutación de 100 kHz, con buena eficiencia considerando el conjunto inversor/máquina. Por tanto, la operación de inversores de baja y media potencia con frecuencias elevadas es tecnológicamente viable.

Considerando la posible evolución de las tecnologías WBG, pueden preverse frecuencias de conmutación muy superiores a 100 kHz para las tecnologías GaN a medio plazo. Las pérdidas podrían mantenerse en valores razonables al tiempo que se

aprovechan las ventajas de operar a altas frecuencias de conmutación. La literatura analiza estas implicaciones desde el punto de vista de la eficiencia [4] o la tensión en modo común [5] pero, en general, se echan en falta comentarios sobre su influencia en el control más allá de la controlabilidad a altas velocidades.

Los autores de este trabajo participan activamente en la investigación de soluciones avanzadas de control para accionamientos eléctricos. Creen que la evolución de los semiconductores tendrá profundas implicaciones en la forma en que los controladores de los motores eléctricos podrían implementarse en un futuro. Al igual que es posible un buen control de temperatura de habitáculos utilizando reguladores de banda de histéresis, ya que la dinámica térmica es lenta, el control histerético de motores podría ofrecer resultados comparables a los controladores vectoriales actuales cuando las frecuencias de conmutación de los semiconductores sean lo suficientemente elevadas en relación con la dinámica de la máquina eléctrica. Para comprender estas profun-

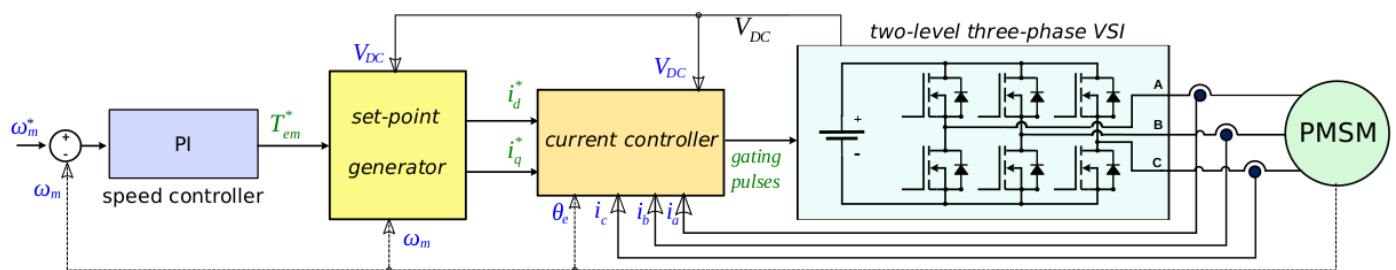


Fig. 1. PMSM trifásico regulado en velocidad que incorpora inversor trifásico de dos niveles y controlador de corriente FOC para regular par.

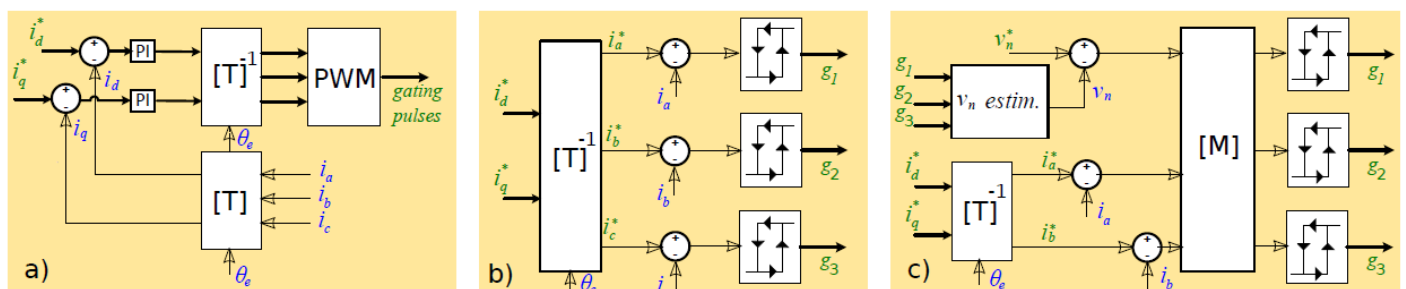


Fig. 2. Diagramas de bloques simplificados de alternativas FOC: (a) basada en PI con PWM (excluyendo términos feed-forward), (b) regulador histerético básico, y (c) SMC con bandas de histéresis fijas o variables.

das implicaciones, centrémonos primero en cómo se regulan los accionamientos modernos.

2.- APROXIMACIONES DE CONTROL BASADAS EN PIs E HISTÉRESIS

El control orientado de campo basado en PIs [FOC, Figs. 1 y 2(a)] es la técnica de regulación de par más popular [6]. Las corrientes del estator se transforman a un marco de referencia bidimensional síncrono ficticio mediante la aplicación de transformaciones estáticas (C, Clarke) y rotativas (P, Park) (T=C·P), véase la Fig. 2(a). Para seguir las referencias síncronas de corriente, los reguladores PI determinan las tensiones instantáneas del estator, que se sintetizan mediante modulador de anchura de pulsos [PWM, Fig. 2(a)].

Como alternativa, destaca el esquema básico de regulación por histéresis [Fig. 2(b)] [7]. Las corrientes síncronas de referencia se antitransforman a variables de fase aplicando T^{-1} . A continuación, los comparadores de histéresis proporcionan las señales de disparo de los semiconductores, de acuerdo con las bandas de histéresis y los errores de corriente por fase. La anchura de las bandas permite ajustar el rizado de corriente a un valor determinado. Reducir dichas bandas aumenta la frecuencia de conmutación y viceversa.

El regulador de histéresis básico es muy sencillo. Sin embargo, se intentan regular variables no independientes simultáneamente, es decir, las corrientes de fase están acopladas (en un sistema conectado en estrella, $\sum i_j = 0$). Además, se produce una frecuencia de conmutación variable, lo que no es deseable desde el punto de vista de las pérdidas de potencia y gestión térmica (la frecuencia de conmutación máxima no puede determinarse formalmente, porque el envejecimiento puede variar las inductancias de fase a un valor indeterminado).

Existen enfoques FOC hysteréticos más refinados que utilizan la teoría de control en modo deslizante (SMC) [8], véase la Fig. 2(c). Aquí, una matriz de desacoplamiento **M** conduce a un conjunto de superficies deslizantes desacopladas σ_j que permiten controlar las corrientes de fase mediante la regulación de dos de ellas. El valor medio de la tensión del punto neutro puede controlarse utilizando el grado de libertad restante. El SMC proporciona herramientas matemáticas para evaluar la estabilidad del sistema. Además, es posible variar dinámicamente las bandas de

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Inductancias de estator (L_{σ}, L_d)	1,5 mH	Momento de inercia (J)	$4,57e^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Resistencia de estator (R_{σ})	$0,36 \Omega$	Coefficiente de fricción (B)	$8,75e^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$
Flujo de imanes permanentes (Ψ_{PM})	0,2515 Wb	Tensión del DC-link (V_{DC})	540 V
Número de pares de polos (N_p)	3	Corriente nom. (I_{rated})/potencia (P_N)	10 A/2,54 kW
Frecuencia de conmutación (f_{sw})	10 kHz/100 kHz*	Bandas de histéresis (H_{\pm})	1,35 A/0,135 A**

*Frecuencia de conmutación fija para PI FOC, variable para hysterético básico (centrado a la frecuencia bajo estudio) y fijo para SMC.

**Bandas de histéresis básicas. Para SMC, dichas bandas se adaptan en tiempo real para fijar la frecuencia de conmutación del convertidor.

Tabla 1. Parámetros de planta y control del PMSM simulado.

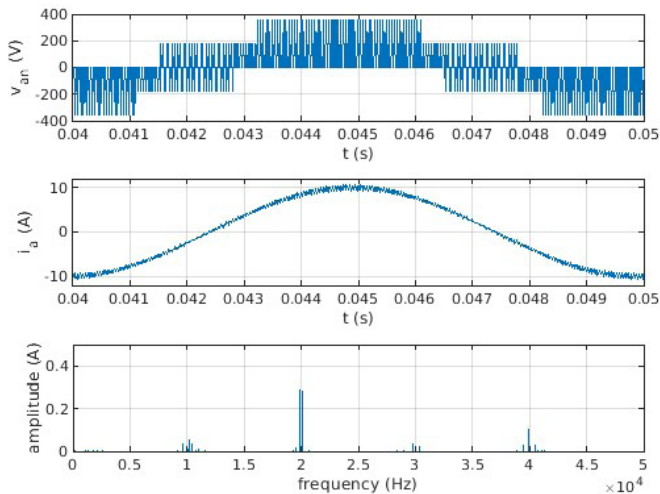


Fig. 3. FOC con PIs, frecuencia de conmutación de 10 kHz. Tensión fase-neutro, corriente y espectro armónico, excluyendo fundamental.

histéresis y fijar la frecuencia de conmutación [9], resolviendo los inconvenientes del funcionamiento a frecuencia variable.

Ambos enfoques hysteréticos proporcionan operación muy robusta ante incertidumbres y variaciones de la planta. El ancho de banda idealmente infinito (limitado por la frecuencia de conmutación finita en aplicaciones reales) permite seguir cualquier referencia de corriente más allá de una sinusoidal, lo cual es de interés en aplicaciones de control tolerantes a fallos [7].

3.- FUNCIONAMIENTO A ALTAS FRECUENCIAS Y CALIDAD DE LA FORMA DE ONDA

Para comparar los controladores discontinuos frente al clásico, se muestran simulaciones para un accionamiento PMSM trifásico. La máquina eléctrica se alimenta mediante un inversor de fuente de tensión (VSI) trifásico de dos niveles. La Tabla 1

recoge los parámetros más importantes del accionamiento. Representan un PMSM de baja potencia utilizado en aplicaciones industriales.

Las Figs. 3 a 5 resumen resultados de simulación para los tres enfoques de control estudiados a 10 kHz (típico en dispositivos de silicio), a corriente nominal y 2/3 velocidad nominal (100 Hz eléctricos). La Fig. 3 muestra la tensión fase-neutro y

una corriente de fase obtenidas al aplicar el FOC convencional basado en PI. Como era de esperar, se consigue el contenido armónico más bajo. La distribución armónica típica en torno a la frecuencia de conmutación y sus múltiples bandas proporciona una Distorsión Armónica Total (THD) del 4,5 % para el espectro total medido (Tabla 2).

El regulador de histéresis básico se ajustó con la frecuencia de conmutación centrada en 10 kHz (Fig. 4). El rizado de corriente se limita a las bandas de histéresis definidas. Sin embargo, la aplicación continua de vectores nulos por parte del inversor durante varios intervalos impide que las corrientes reboten entre las bandas durante dichos instantes, ya que las tres corrientes acopladas se regulan simultáneamente. La frecuencia de conmutación variable genera componentes armónicas adicionales, incluso de bajo orden. Se obtiene una THD del 11,80 % para el espectro completo. También se obtiene

Condiciones de test	Distorsión armónica total de i_a (%)		
	FOC basado en PI	Hysterético básico FOC	SMC FOC freq. fija
10 kHz, espectro completo	4,50	11,80	22,26
10 kHz, primeros 40 armónicos*	0,11	3,11	0,17
100 kHz, espectro total	0,45	1,17	1,83
100 kHz, primeros 40 armónicos*	0,05	0,15	0,01

*Norma española UNE-EN 61000-3-2: Comp. electromagnética (EMC) – Parte 3-2: Límites – Límites para las emisiones de corriente armónica.

Tabla 2. THD de corriente obtenido en PMSM simulada para los controladores estudiados.

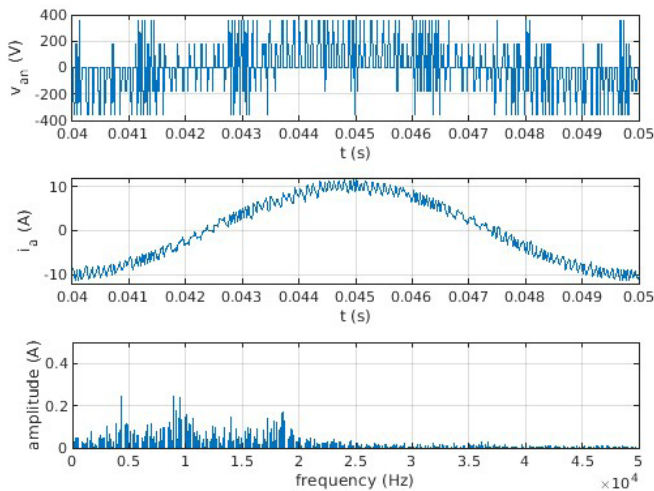


Fig. 4. Regulador histerético básico, frecuencia de conmutación centrada en 10 kHz (frecuencia variable). Tensión fase-neuro, corriente y espectro armónico, excluyendo fundamental.

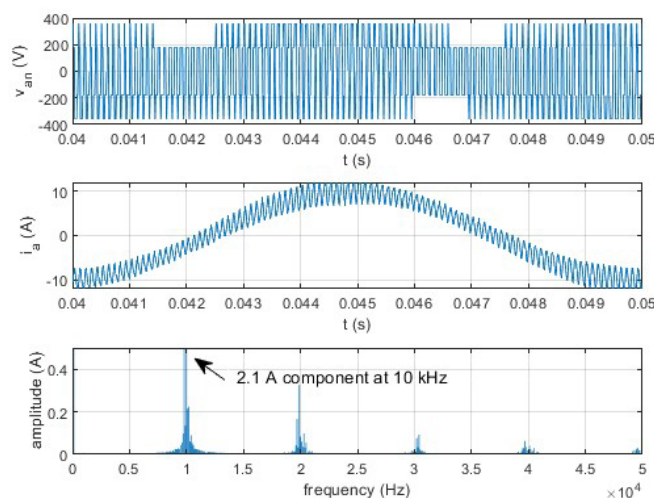


Fig. 5. Controlador SMC FOC, frecuencia de conmutación fija a 10 kHz. Tensión fase-neuro, corriente y espectro armónico, excluyendo fundamental.

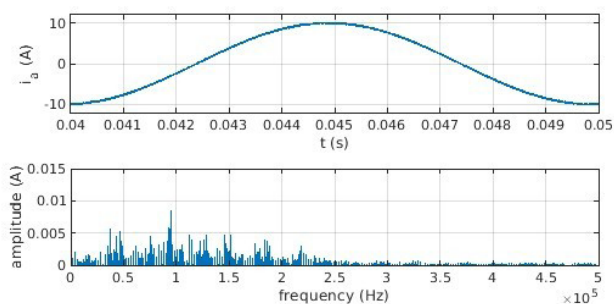


Fig. 6. Controlador histerético básico, frecuencia de conmutación centrada en 100 kHz (frecuencia variable). corriente y espectro armónico, excluyendo fundamental.

una THD relativamente alta si únicamente se consideran los 40 primeros armónicos, tal y como rige la norma española UNE-EN 61000-3-2 (Tabla 2).

La Fig. 5 muestra resultados al aplicar el SMC con frecuencia de conmutación fija. Los armónicos se concentran en torno a 10 kHz. La frecuencia de conmutación

se fija dentro de una banda estrecha. Los rebotes de frontera son siempre homogéneos, ya que las variables de control están desacopladas. Considerando el espectro completo, se obtiene una THD mayor a la del regulador histerético básico (Tabla 2). En cambio, la THD es mejor cuando únicamente se consideran los 40 primeros armónicos, ya que hay pocas componentes de baja frecuencia.

Aunque, a 10 kHz, el FOC basado en PI obtiene una mejor calidad de onda, las diferencias se reducen al aumentar la frecuencia de conmutación hasta 100 kHz (Tabla 2). En particular, la Fig. 6 ilustra lo buena que es la forma de onda de corriente de salida para el controlador histerético básico. Los THD se aproximan aún más a medida que aumenta la frecuencia, de forma que las diferencias de forma de onda entre los tres enfoques de control sean insignificantes.

4.- CONCLUSIONES

A frecuencias de conmutación elevadas, los controladores histeréticos pueden lograr resultados de forma de onda equivalentes a las basadas en PWM, manteniendo sus principales ventajas: gran robustez y respuesta dinámica ultra-rápida. En particular, el controlador histerético básico proporciona una regulación extremadamente buena a frecuencias superiores a 100 kHz, alcanzando una gran simplicidad de implementación conceptual. Esto podría generalizar su uso en el futuro, especialmente entre ingenieros

no especialistas en control, ya que se requieren pocos ajustes más allá del ancho de las bandas de histeresis.

Aunque es difícil asegurar que los esquemas histeréticos se verán favorecidos en el futuro, los autores creen que su utilización se ampliará en aplicaciones donde la simplicidad, robustez y dinámica rápida sean deseables. Conviene mencionar aplicaciones en las que se requiera maximizar el par mediante inyección de armónicos de corriente o en aplicaciones tolerantes a fallos en máquinas multifase, donde es obligatorio el seguimiento de referencias de corriente muy rápidas.

REFERENCIAS

- [1] Sierra-Gonzalez A, Peschetto P, Alvarez-Gonzalez F, et al. "Full-speed range control of a symmetrical six-phase automotive IPMSM drive with a cascaded DC-link configuration". 2023. Vol. 59, no. 3. p. 3413-3424. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3256382>
- [2] Sayed E, Pietrini G, Sa'adeh NM, et al. "Review of electric machines in more-/hybrid-/turbo-electric aircraft". IEEE Transactions on Transportation Electrification. December 2021. Vol. 7, no. 4. p. 2976-3005. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3089605>
- [3] Robles E, Matallana A, Aretxabaleta I, et al. "The role of power device technology in the electric vehicle powertrain". International Journal of Energy Research. 2022. Vol. 46. p. 22222-22265. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.8581>
- [4] Chang L, Alvi M, Lee W, et al. "Efficiency optimization of PWM-induced power losses in traction drive systems with IPM machines using wide bandgap-based inverters". IEEE Transactions on Industry Applications. September/October 2022. Vol. 58, no. 5. p. 5635-5649. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3178979>.
- [5] Xu Y, Yuan X, Ye F, et al. "Impact of high switching speed and high switching frequency of wide-bandgap motor drives on electric machines". 2021. IEEE Access. Vol. 6. p. 82866-82880. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086680>
- [6] Wilson D. "Field-oriented control: historical foundations". EE Times. 2015. <https://www.eetimes.com/field-oriented-motor-control-historical-foundations/> (online, consultation date: 24/03/2023)
- [7] Mohammadpour A, Sadhegi S, Parsa L. "A generalized fault-tolerant control strategy for five-phase PM motor drives considering star, pentagon, and pentacle connections of stator windings". IEEE Transactions on Industrial Electronics. January 2014. Vol. 61, no. 1. p. 63-75. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2247011>
- [8] Utkin V, Guldner J, Shi J, "Sliding mode control in electromechanical systems, 2nd edition". CRC Press. 2017.
- [9] Repecho V, Biel D, Arias A. "Fixed switching period discrete-time sliding mode current control of a PMSM". IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, no. 3. p. 2039-2048. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2745469>