

FILTROS SINUSOIDALES COMO PROTECCIÓN EFICAZ DE MOTORES DE ALTA VELOCIDAD EN SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO DE ALTA FRECUENCIA

Resumen: Los sistemas de accionamiento de alta frecuencia son un grupo de dispositivos que han marcado más su presencia en el mercado del petróleo y el gas en los últimos años. La mayor frecuencia del voltaje de salida del convertidor permite la regulación de las velocidades de rotación en un rango más amplio. Esto aumenta la eficiencia y la versatilidad de todo el accionamiento, pero al mismo tiempo causa riesgos adicionales para el aislamiento de los cables de alimentación, el transformador elevador y el propio motor. Un elemento indispensable de un sistema de este tipo es un filtro sinusoidal, que garantiza la protección y la fiabilidad de todo el accionamiento. El artículo presen-

de operación elevada y la frecuencia de conmutación. Se presentan los resultados de las pruebas sobre el impacto de estos parámetros en la operación del filtro, el voltaje de salida y la tasa de deformación THDu.

Palabras clave: filtros sinusoidales, accionamientos de alta frecuencia, motores de alta velocidad

1. Introducción

En los sistemas modernos de extracción de aceite (ESP, Electrical Submersible Pumping System) se requiere el uso de máquinas y dispositivos de alta eficiencia y el ajuste de la velocidad de rotación en un amplio rango. Por lo general, están equipados con motores de imán permanente (PMM, Permanent Magnet Motor). A diferencia de los motores de inducción estándar, los motores PMM utilizan imanes de tierras raras para producir un campo magnético constante del rotor, que

se traduce directamente en un rendimiento mayor y eficiencia energética, así como una mayor densidad de potencia y dimensiones más pequeñas [1]. Estos motores son extremadamente eficientes cuando funcionan a velocidades típicas y más altas de 500 a 10.000 rpm, que es aplicable en yacimientos de baja viscosidad y alto flujo de líquidos, así como a velocidades más bajas de 100 a 500 rpm en yacimientos con líquidos de alta viscosidad y bajo flujo.

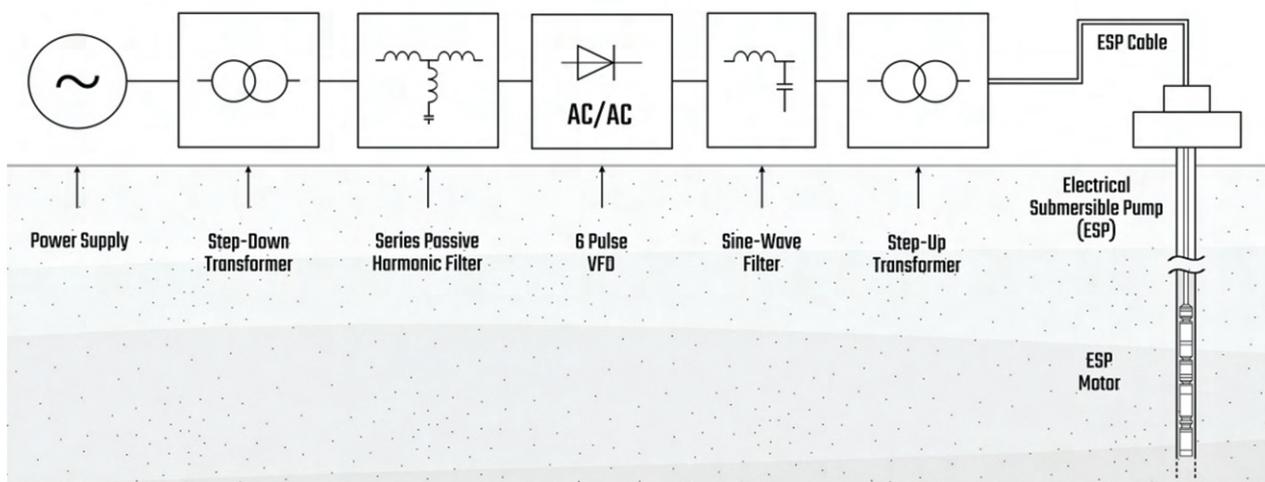


Fig. 1. Diagrama de flujo del sistema de alimentación para sistemas de extracción de petróleo (ESP)[2]



La necesidad de una regulación tan amplia de la velocidad de rotación de motores y bombas sumergibles se realiza por medio de convertidores de frecuencia variable (VFD, Variable Frequency Drive). Al regular y controlar el par, los convertidores VFD protegen las bombas y los motores al reducir las tensiones mecánicas y de corriente durante el arranque y ajustan la operación de todo el accionamiento a las condiciones de carga que cambian dinámicamente. Sin embargo, este sistema también tiene sus inconvenientes. El voltaje de salida deformado del convertidor (PWM, Pulse Width Modulation) representa un riesgo adicional para el aislamiento de los cables de alimentación, el transformador elevador y el propio motor (fig. 1). Los motores PMM son susceptibles a frecuencias de conmutación armónicas que causan histéresis de flujo magnético y corrientes parásitas indeseables adicionales, aumentando las pérdidas y la temperatura del motor. Además, los rotores de los motores PMM son sensibles a altas temperaturas. Las condiciones térmicas elevadas plantean el riesgo de disminución del par y la potencia del motor, y en casos extremos incluso la desmagnetización permanente del rotor. Por lo tanto, con el fin de eliminar los armónicos de conmutación (PWM), se usan filtros sinusoidales adaptados para operar con una frecuencia elevada.

2. Alimentación, puesta en marcha y control de motores PMM de alta velocidad

La potencia del motor es directamente proporcional a su velocidad de rotación, por lo que no es sorprendente que las industrias para las que la eficiencia y las dimensiones de la máquina son decisivas estén dispuestas a utilizar motores PMM de alta velocidad. El arranque y el control de estos motores se lleva a cabo más a menudo por medio de convertidores VFD (los motores PMM no se pueden arrancar directamente desde la red), y la operación a alta velocidad requiere un voltaje de salida ajustable con una frecuencia básica elevada (200 a 400 Hz). Una frecuencia básica elevada fuerza el uso de frecuencias de conmutación del variador más altas para mantener la modulación de frecuencia mf a un nivel aceptable:

$$mf = \frac{f_{\text{conmutaciones}}}{f_{\text{básica}}} \quad (1)$$

Cuanto mayor es la frecuencia de conmutación en relación con la frecuencia básica, mayor es la tasa de modulación y menor el THDu del voltaje de salida, lo que facilita filtrar los armónicos elevados resultantes de la frecuencia de conmutación.

Por ejemplo, una forma de onda de 50 Hz generada a una frecuencia de conmutación de 2 kHz tiene una tasa de modulación de 40. Sin embargo, cuando la frecuencia base se aumenta a 200 Hz, la tasa de modulación cae a 10 y el coeficiente THDu aumenta significativamente. El aumento de la frecuencia de conmutación a 5 kHz (a 200 Hz) aumenta la tasa de modulación a 25 y mejora el THDu (fig. 2a,b,c). En sistemas de potencia reales con una frecuencia básica elevada, el objetivo es tener una tasa mf de al menos 20. Dicho valor es un mínimo necesario, lo que garantiza la obtención de la precisión y facilidad de control del motor adecuadas. A valores más bajos de la tasa mf (fig. 2b), el THDu del voltaje de salida es alto, y los armónicos de orden bajo son difíciles de filtrar. Un impedimento adicional para la alimentación y el control de este tipo de sistemas son a menudo grandes distancias entre el convertidor y el motor, alcanzando hasta 2 a 3 km en algunas aplicaciones. Los cables de alimentación largos provocan caídas de voltaje que se compensan parcialmente cambiando la relación de voltaje del transformador elevador equipado con tomas de control [3] o, en cierta medida, sobremodulando el voltaje de salida del VFD. La sobremodulación permite un aumento en el valor efectivo del voltaje por encima del voltaje nominal [4]. Por un lado, esta función es muy útil porque permite compensar la caída de voltaje (potencia) y, en algunos casos, puede acelerar la dinámica de la respuesta del sistema de alimentación a las condiciones de operación establecidas. Sin embargo, por otro lado, la sobremodulación tiene un efecto adverso sobre el contenido de armónicos en la forma de onda de salida del voltaje VFD y, por lo tanto, armónicos de la corriente, lo que conduce a una mayor ondulación del par del motor. Esto se debe a la extensión de la duración (anchura) del pulso medio, lo que da como resultado la aparición de armónicos de orden bajo en la forma de onda de salida, es decir, 5h, 7h, etc., lo que aumenta la tasa de distorsión de voltaje THDu (fig. 2d).

3. Selección de parámetros de filtro para operar a una frecuencia elevada

Los filtros sinusoidales diseñados para operar a frecuencias más altas (200 a 400 Hz) sirven esencialmente para el mismo propósito que sus equivalentes de frecuencia de red. Eliminan los armónicos más altos asociados con la frecuencia de conmutación, produciendo una forma de onda casi sinusoidal de voltaje y corriente. La diferencia aparece en la selección de parámetros LC, frecuencia de resonancia y frecuencia de conmutación, así como el diseño del estrangulador. La selección de la inductancia



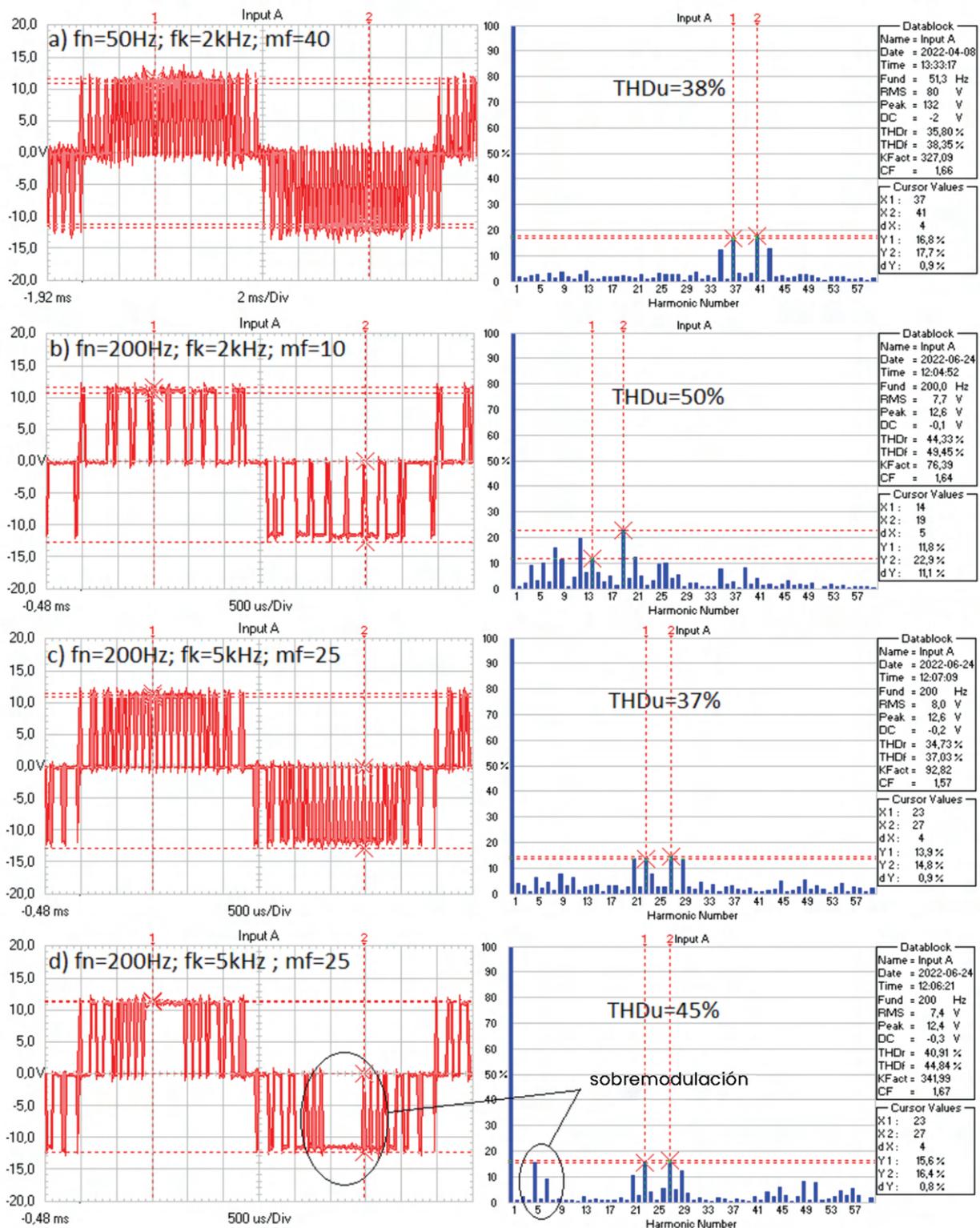


Fig. 2. Oscilogramas y distribución de los armónicos del voltaje de salida con diferentes frecuencias de operación y conmutación [2]



L es crucial porque cada impedancia adicional provoca una caída de voltaje adicional y reduce la corriente que fluye en el circuito, reduciendo así la potencia suministrada por el motor. Tenga en cuenta que la caída de voltaje es proporcional a la reactancia del estrangulador y, por lo tanto, a la frecuencia:

$$u_x[\%] = \frac{I_N X_L \sqrt{3}}{U_N} 100\% \quad (2)$$

donde:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (3)$$

Los filtros sinusoidales estándar utilizados para la frecuencia de red tienen una reactancia en el rango del 6% al 12% dependiendo de la frecuencia de conmutación aplicada. Si se utiliza un filtro estándar en un sistema de frecuencia elevada, por ejemplo, de: 300 Hz, la reactancia se multiplicaría por seis. Esto significaría una reactancia en el rango del 36% al 72%, en cuyo caso el filtro pierde su funcionalidad por completo debido a una enorme caída de voltaje. Lo mismo ocurre para la parte capacitiva del filtro. La corriente capacitiva consumida por el condensador en el sistema de 300 Hz será seis

veces mayor que en el sistema de 50 Hz, porque también es proporcional a la frecuencia:

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = U_C \omega C = U_C 2\pi f C \quad (4)$$

Limitar la corriente capacitiva es muy importante porque esta causa una carga adicional en el convertidor. Como se puede ver, los filtros sinusoidales estándar con frecuencia de red no son adecuados para su uso directo en sistemas de frecuencia elevada. La inductancia y la capacidad correctamente seleccionadas forman un filtro sinusoidal de paso bajo con una frecuencia de resonancia de:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

El valor de la frecuencia de resonancia debe seleccionarse debidamente en relación con la frecuencia operativa f_N y la frecuencia de conmutación f_k , separando la banda de transmisión de la banda de atenuación y conformando el coeficiente de atenuación del filtro en consecuencia (fig. 3). Cuanto mayor es el producto LC , menor es la frecuencia de resonancia del filtro, que a su vez se traduce en un coeficiente de atenuación más alto para una frecuencia de conmutación específica.

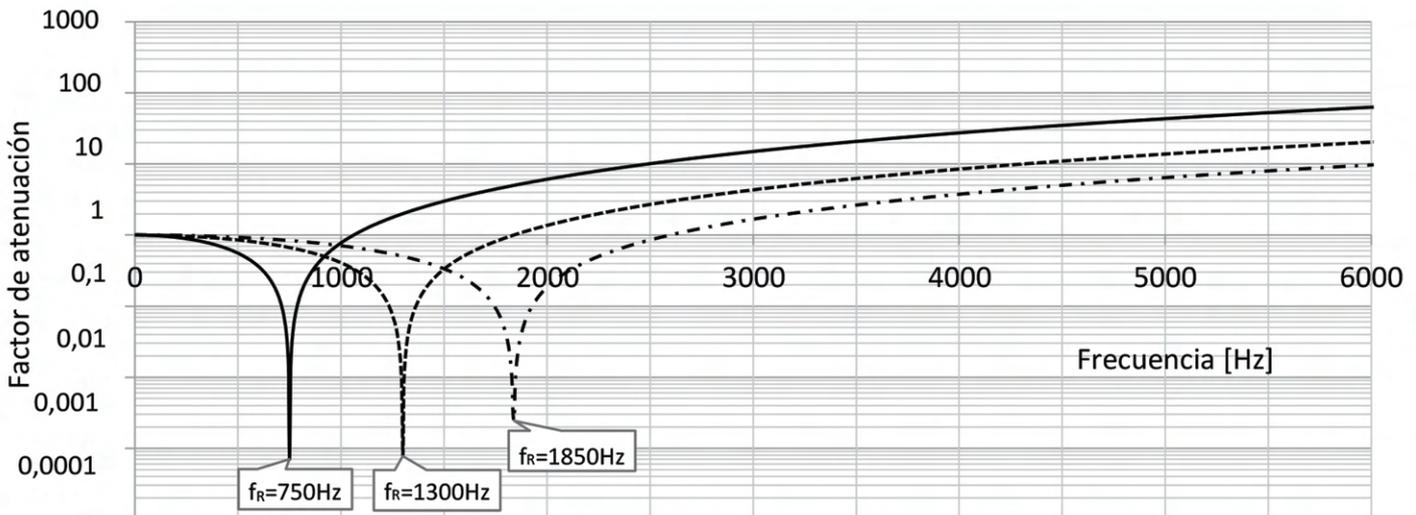


Fig. 3. Ejemplos de características de frecuencia de filtro LC para diferentes frecuencias de resonancia [2]



4. Selección de la frecuencia de conmutación: ¿por qué vale la pena aumentarla?

La selección de frecuencias de conmutación en sistemas de frecuencia elevada es una cuestión bastante complicada. Como se ha mostrado anteriormente, el aumento de la frecuencia de conmutación mejora las tasas mf y el THDu del voltaje de salida. Sin embargo, esto también tiene sus consecuencias negativas en forma de pérdidas de calor adicionales en el convertidor, por lo que los fabricantes de convertidores son reacios a aumentarla.

Sin embargo, si es necesario usar filtros sinusoidales en la salida del convertidor, obtenemos argumentos adicionales para aumentar esta frecuencia de conmutación.

Una razón para esto es el valor efectivo de la corriente capacitiva (4). El valor de esta corriente depende no solo de la frecuencia básica, sino también de la frecuencia de conmutación (fig. 4). Cuanto más alta es la frecuencia de conmutación, más pequeñas son las amplitudes de armónicos y más pequeño es el valor efectivo y máximo de la corriente capacitiva. Las amplitudes de armónicos más pequeñas de la corriente tienen un impacto significativo en la reducción del tamaño del estrangulador de filtro y la mejora de sus condiciones de trabajo (menores pérdidas y ruido). El valor más pequeño de la corriente capacitiva del filtro también significa una carga más baja del convertidor, y por lo tanto, en cierta medida, esto se compensa con mayores pérdidas adicionales del convertidor derivadas de la frecuencia de conmutación. Otra razón por la que vale la pena aumentar la frecuencia de conmutación es la tasa de deformación de voltaje de salida THDu. Aquí el asunto es obvio, más fácil y más barato es filtrar la forma de onda, que inicialmente está menos distorsionada. Somos capaces de comparar la forma de onda del voltaje de salida del convertidor sin un filtro y después de aplicar el filtro para frecuencias de conmutación de 2 kHz y 5 kHz (fig. 2b y 2c y fig. 4a y 4b). En el caso de la frecuencia de conmutación de 2 kHz, el filtro mejora la tasa THDu aproximadamente 3 veces del 50% al 15%. Sin embargo, el mismo filtro en el caso de la frecuencia de conmutación de 5 kHz reduce el THDu del 37% a menos del 4% (es decir, más de 9 veces). El impacto de la frecuencia de conmutación en la corriente capacitiva y en la deformación de voltaje de salida del filtro también se presenta en la Tabla 1. Estos resultados indican claramente que la frecuencia de conmutación más alta también deja mucho espacio para optimizar el filtro en términos de usar menos inductancia y/o menos capacidad, lo que permite reducir la caída de voltaje y la corriente capacitiva. Como se puede ver a partir del análisis y las mediciones anteriores, el uso de un filtro sinusoidal en un sistema de frecuencia elevada puede reducir la deformación de voltaje de salida del convertidor THDu incluso por debajo del 5%. Estas son condiciones similares a la alimentación de red, que es un gran alivio tanto para el transformador elevador como para el cable de alimentación, y especialmente para el motor PMM. El filtro sinusoidal suaviza la onda sinusoidal de voltaje de salida a expensas de la corriente capacitiva distorsionada. La corriente capacitiva se suma con la corriente de carga correcta del filtro, por lo que el filtro asume las pérdidas adicionales asociadas con la frecuencia de conmutación que ocurrirían en el transformador, el cable y el motor.

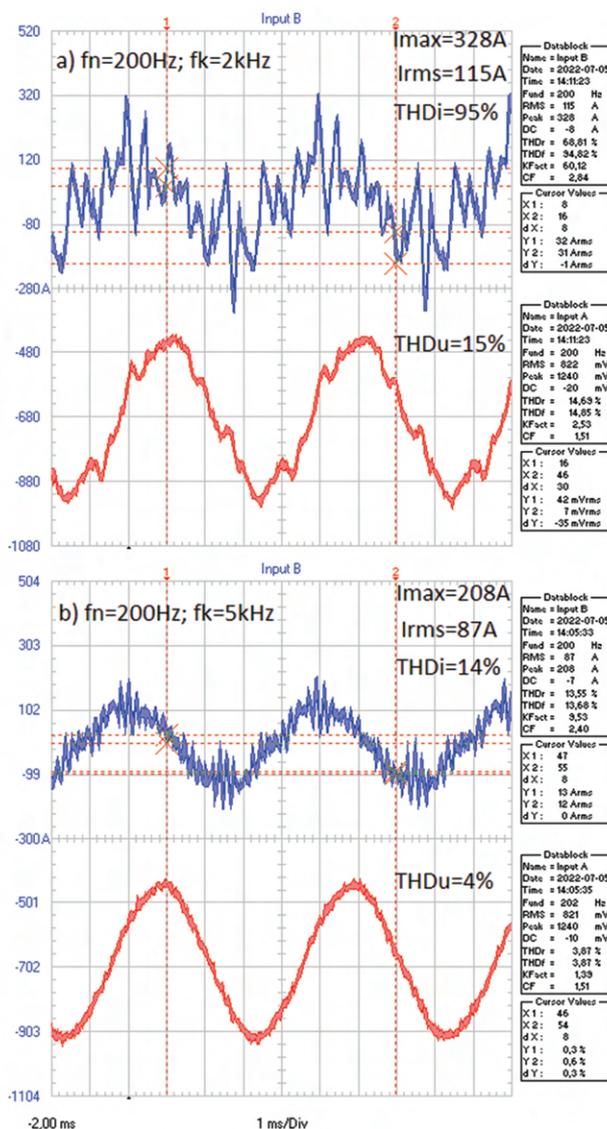


Fig. 4. Oscilogramas de corriente capacitiva y voltaje de salida del filtro EF3LC-415A 400V 200Hz para diferentes frecuencias [2]



Tabla 1. Mediciones de corriente capacitiva y deformación de voltaje de salida del filtro EF3LC-415A 400V 200Hz dependiendo de la frecuencia de conmutación [2]

f_N	f_k	Corriente capacitiva			THDu
		I_{CRMS}	I_{CMAX}	THDic	
Hz	kHz	A	A	%	%
200	2	115	328	95	14,9
200	3	101	272	59	8,7
200	4	93	232	38	7,6
200	5	87	208	24	3,9
200	6	83	198	14	3,2

El impacto de la deformación de la corriente en la operación y el diseño de los elementos magnéticos del filtro es enorme. Las pérdidas adicionales resultantes de los fenómenos parásitos fuerzan el uso de diseños de múltiples ranuras y las limitaciones del nivel de inducción en el núcleo. Esto reduce las pérdidas resultantes de las corrientes parásitas en el núcleo y los devanados causados por el flujo asociado con las ranuras, el llamado Fringing Flux [5]. Aplicando una frecuencia de conmutación elevada, reducimos la deformación de corriente, por lo que podemos influir en la reducción de las pérdidas y las dimensiones del filtro. Por lo tanto, la selección de frecuencias de conmutación en este tipo de sistemas es un compromiso entre los costes y posibilidades de reducir pérdidas adicionales en el convertidor resultantes de la frecuencia de conmutación elevada, y los costes y efectos de la filtración pasiva, que es necesaria para alimentar motores PMM.

5. Resumen

Los efectos de la instalación de filtros sinusoidales en sistemas de alta frecuencia con motores PMM de alta velocidad y alta potencia son más pronunciados que en el caso de los motores de inducción de frecuencia de red convencionales. Debe recordarse que en tales sistemas, un filtro sinusoidal es una mejora en las condiciones de operación y un aumento en la fiabilidad no solo del propio motor, sino también de otros componentes del sistema de accionamiento, es decir, el transformador elevador o el cable de alimentación. El filtro elimina los dos mayores riesgos que afectan la fiabilidad y la vida útil de todo el sistema de accionamiento, es decir, la deformación de voltaje, eliminando completamente su

crecimiento fuerte que es un riesgo directo para el aislamiento, y reduce las pérdidas de calor adicionales resultantes del flujo distorsionado de la corriente magnética en los núcleos o la corriente distorsionada en los devanados de trabajo. A su vez, la frecuencia de conmutación es importante en la selección de la filtración pasiva y otros componentes en los sistemas de alta frecuencia. La selección de frecuencias de conmutación debe tener en cuenta particularmente el impacto en los parámetros de los elementos pasivos, la corriente capacitiva del filtro y la eficiencia y capacidad de todo el sistema.

6. Bibliografía

- [1]. J. F. Gieras „Permanent magnet motor technology: design and application” 3rd ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010.
- [2]. ELHAND Transformatory Sp. z o.o. – Materiales y estudios propios, Lubliniec, 2022.
- [3]. T. Orłowski & L. Jasinski „Application of New Generation Transformer Harmonic Filter Hybrid Solution To Reduce Footprint and Operating Cost at the well site” ADIPEC – Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, November 2019.
- [4]. X. Guo, M. He, and Y. Yang, “Over modulation strategy of power converters: A review,” IEEE Access, 2018.
- [5]. J. Czornik, M. Haltof „Influence of harmonic filters on the improvement of electricity performance at the point of connection” Electrotechnical Review, No. 3, 2020.

Autores

M.Sc. Jarosław Czornik

j.czornik@elhand.pl

Dr Eng. Maciej Haltof

m.haltof@elhand.pl

M.Sc. Leszek Jasiński

l.jasinski@elhand.pl

ELHAND Transformatory Sp. z o.o.

ul. Klonowa 60, 42-700 Lubliniec, Poland

El artículo se desarrolló durante la realización del proyecto POIR-03.02.01-24-0007-18 titulado “Implementación de la tecnología de producción de filtros de armónicos mejorados integrados con transformadores de aceite”

