

8. Resultados Experimentales

El nuevo método SHMPWM propuesto ha sido ampliamente testado en un prototipo de 150kVA de tres niveles con topología Diode-Clamped. Se han aplicado las normas de conexión a red EN 50160 y CIGRE WG 36-05 y un parámetro tecnológico $k=0.01$ radianes. El voltaje del DC-Link es de 800V y se han medido y analizado las formas de onda a la salida en ausencia de carga. Este es el peor caso ya que, puesto que se han medido las tensiones sin carga, todo el ruido de las conmutaciones aparece a la salida y puede verse en el análisis espectral.



Figura 18 Prototipo de 150kVA y tres niveles Diode-Clamped usado en las pruebas.

Con objeto de poder comparar con otras técnicas de modulación se han realizado otras medidas para obtener datos equivalentes en cuanto a Ma y número de cortes pero usando otras técnicas de modulación. Se han utilizado los métodos SHEPWM y OSPWM [16] para realizar la comparación. Puesto que en el método OSPWM se utilizan dos ondas triangulares para obtener los instantes de conmutación, se han ajustado las frecuencias de dichas ondas triangulares de forma que el número de conmutaciones por ciclo sea el mismo.

El método OSPWM tiene como limitación que puede generar ondas con un $Ma=1.1567$ como máximo. Si se supera dicho valor aparecen armónicos de bajo orden que distorsionan la señal. Al igual que el método SHEPWM, el nuevo método propuesto no tiene a priori ningún límite en el máximo índice de modulación que se puede alcanzar. Usando SHMPWM se pueden conseguir formas de onda a la salida con un índice de modulación de hasta $Ma=1.19$ que siguen cumpliendo las normas anteriormente mencionadas.

Se han realizado distintas mediciones con distintas frecuencias de conmutación. A continuación se exponen los detalles de cada una y las características más importantes extraídas de las pruebas realizadas. El número de cortes especificado se refiere al número de veces que cambia la tensión de salida en cada cuarto de onda de forma que el número de cambios en un ciclo completo será:

$$NC = 4n \quad (15)$$

8.1 15 cortes

A continuación se muestran los resultados de las medidas realizadas con NC=60 cambios por ciclo.

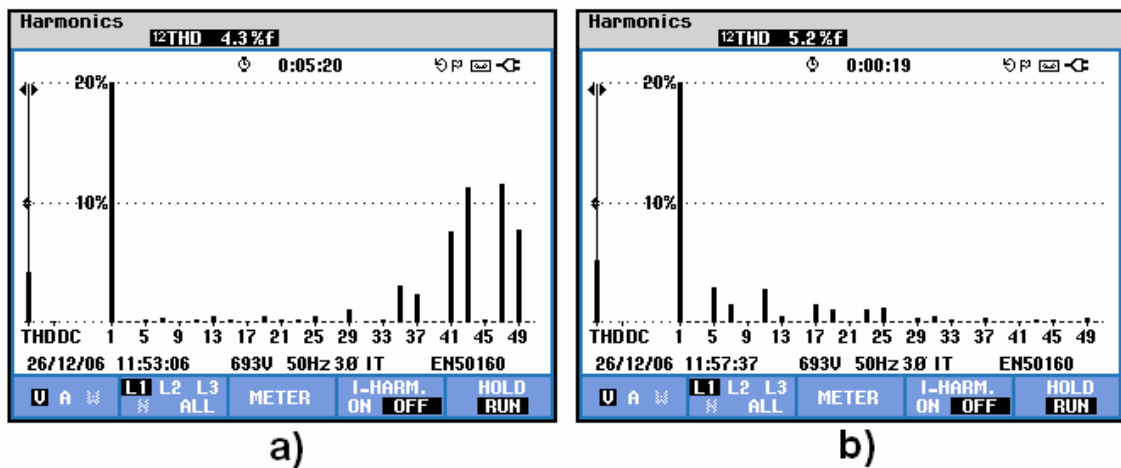


Figura 19 Contenido armónico de las señales generadas con OSPWM (a) y SHMPWM (b) para un $M_a=1.07$.

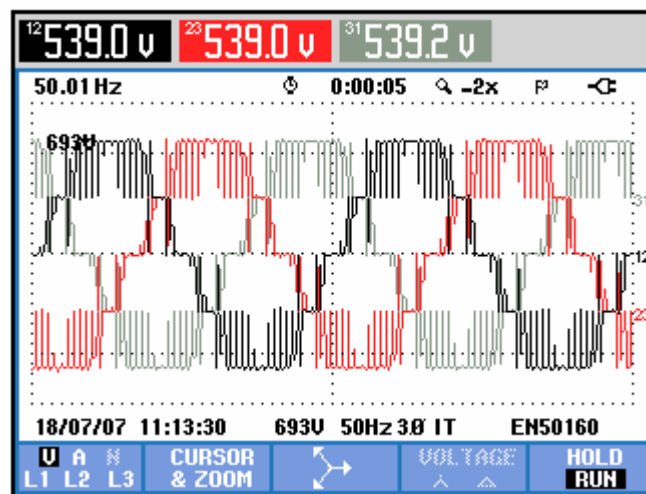


Figura 20 Forma de onda de la señal obtenida con SHEPWM y $M_a=1.07$.

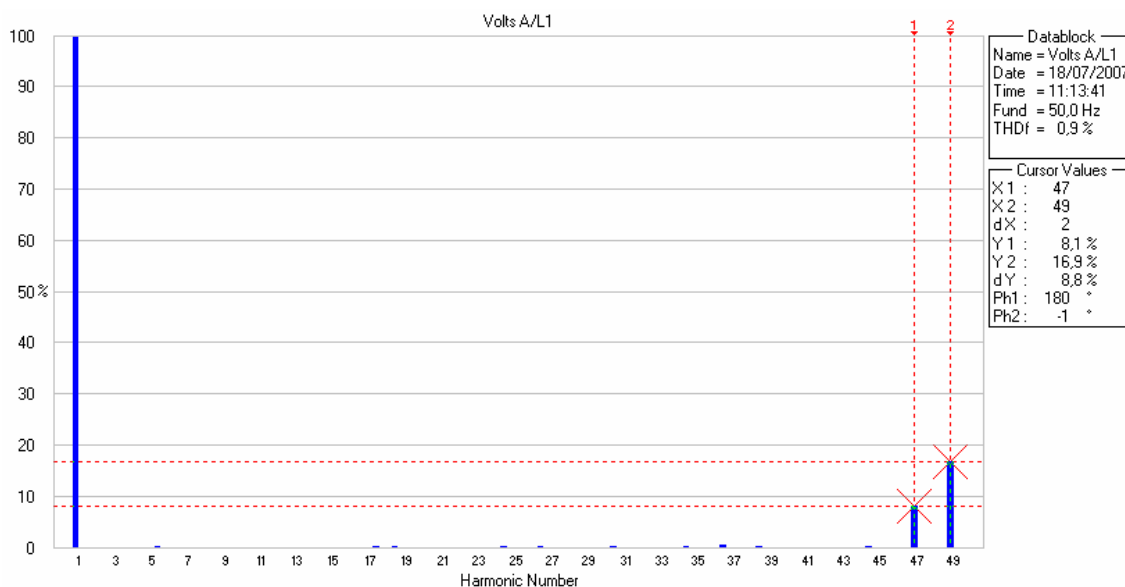


Figura 21 de la señal de salida modulada mediante SHEPWM y $Ma=1.07$.

Observando las figuras podemos destacar que usando el nuevo método propuesto se consigue cumplir la normativa por completo sin la necesidad de utilizar ningún filtro adicional. En la Figura 19 puede verse que al utilizar la técnica OSPWM hay varios armónicos que superan el valor máximo permitido por las normas, incluso hay dos que superan el 10% del nivel del armónico fundamental. Con la modulación Space Vector sucede algo similar ya que un número tan bajo de conmutaciones por ciclo implica que el contenido armónico se desplace hacia las bajas frecuencias y alcance la zona en la que las normas fijan los límites.

En la Figura 20 aparecen representadas las tres tensiones de salida del convertidor. Puede apreciarse el escaso número de conmutaciones que se realizan en cada periodo.

En la Figura 21 aparece el espectro de la señal modulada utilizando SHEPWM. Esta técnica permite eliminar un número concreto de armónicos relacionado con el número de conmutaciones por ciclo tal y como fue detallado en el Capítulo 6. En este caso, ya que la frecuencia de conmutación es tan baja, únicamente podemos eliminar 14 armónicos (ya que también es necesario fijar el Ma) de la secuencia (5,7,11,13,17,19,23,25,29,31,35,37,41,43,47,49) dejando completamente descontrolados los dos restantes. Normalmente es preferible eliminar los armónicos de más baja frecuencia ya que los filtros pasivos necesarios para su eliminación requerirían elementos reactivos mayores con el sobrepeso y sobrecosto que esto implica. De esta forma, se han dejado libres los dos armónicos de más alta frecuencia correspondientes al

47 y 49. En la figura puede apreciarse que en la medida realizada sus valores son del 8.1% y 16.9%, muy por encima de los límites exigidos en la norma de conexión (0.89% y 0.86% respectivamente).

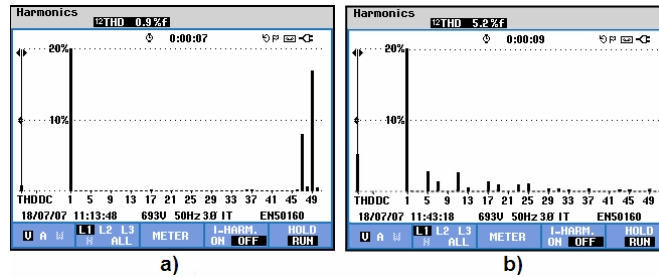


Figura 22 Contenido armónico para $Ma=1.15$ usando modulación SHEPWM (a) y SHMPWM (b).

En la Figura 22 aparece detallada una comparación entre el contenido armónico obtenido al modular usando la técnica SHEPWM y SHMPWM para un $Ma=1.15$. Puede apreciarse que a esta frecuencia tan baja de conmutación la técnica SHEPWM no consigue eliminar todos los armónicos y quedan dos completamente descontrolados.

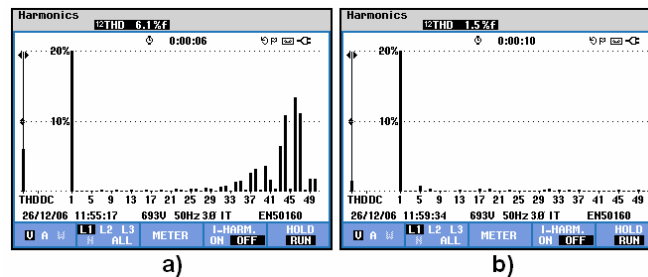


Figura 23 Contenido armónico para $Ma=1.15$ con modulación OSPWM (a) y SHMPWM (b).

En la Figura 23 aparece representada una comparativa entre el espectro de la señal de salida obtenida con el método OSPWM y el obtenido con SHMPWM. Dada la baja frecuencia de conmutación de los transistores, el método OSPWM no puede impedir que aparezca un alto contenido armónico a bajas frecuencias. Esto hace que la señal de salida no cumpla los requisitos exigidos por la norma.

8.1.1 Análisis de los resultados

En este apartado se han presentado resultados experimentales que no sólo muestran la validez del método sino que ilustran la ventaja que supone poder reducir la frecuencia de conmutación y poder seguir cumpliendo las especificaciones exigidas por las normas de conexión EN 50160 y CIGRE WG 36-05.

A esta frecuencia de conmutación tan baja, las técnicas PWM clásica y OSPWM no consiguen generar señales con un espectro limpio a baja frecuencia. Además, estas técnicas tienen una limitación importante en el máximo valor de Ma que son capaces de alcanzar sin que aparezcan armónicos de baja frecuencia. Las técnicas SHEPWM y SHMPWM son más eficientes en ambos aspectos ya que a priori no tienen limitación en el Ma máximo que pueden conseguir y permiten generar señales con bajo contenido armónico en el rango de interés (hasta el armónico número 50).

La técnica SHEPWM también permite conseguir señales con un Ma alto pero el número de armónicos que se pueden eliminar está directamente relacionado con el número de cortes por ciclo. En este caso, puesto que se han utilizado 15 cortes no consigue eliminar todos los armónicos en los que la norma establece restricciones. El principal problema de esta técnica es que no se dispone de ningún control sobre los armónicos que no se eliminan (a excepción del armónico fundamental). Esto hace que dicho valor sea completamente impredecible.

Es cierto que si se incrementa el número de cortes hasta 17, con el método SHEPWM se pueden conseguir señales que cumplan la norma y tengan un THD=0% ya que todos los armónicos hasta el 50 valdrán 0. La principal ventaja de la técnica SHMPWM es que consigue cumplir la norma pero con un número de conmutaciones menor aunque no consiga señales que anulen todos los armónicos. Dependiendo de la aplicación esto puede ser muy importante ya que cada conmutación supone un coste en energía que se desperdicia y en aplicaciones de alta potencia la refrigeración de los semiconductores es algo muy importante que puede llegar a ser muy problemático.

Es importante destacar que el nuevo método propuesto consigue resultados en un amplio rango de Ma (desde 0.3 hasta 1.19) que cumplen las normativas de conexión a red sin que sea necesario utilizar ningún elemento de filtrado adicional.

8.2 11 cortes

A continuación se muestran los resultados de las medidas realizadas con 11 cortes en cada cuarto de onda lo que hace un total de 44 cortes por ciclo.

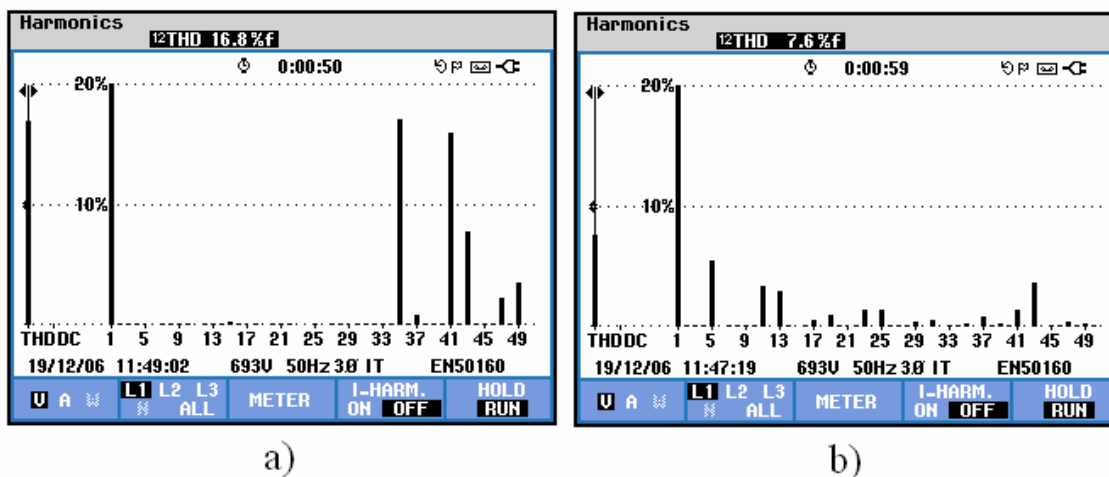


Figura 24 Contenido armónico de las señales generadas usando SHEPWM (a) y SHMPWM (b) con $M_a=1.10$ y 11 cortes.

En la Figura 24 aparece representada una comparación entre las señales generadas con la técnica SHEPWM (a) y SHMPWM (b) con 11 cortes y un $M_a=1.10$. Puede observarse que en el espectro obtenido usando SHEPWM, todos los armónicos hasta el 31 valen cero pero los restantes tienen valores muy altos ya que esta técnica no aplica ningún control sobre ellos. El contenido armónico del espectro obtenido con la técnica SHMPWM es mucho menor aunque los armónicos no son cero. En el caso concreto del quinto armónico aparece un nivel próximo al 5% pero que sigue cumpliendo la norma por lo que no es necesario añadir un filtro para su eliminación. De hecho, los únicos armónicos que no cumplen la norma en este caso son el 41 y el 43 pero a la vista de la figura es evidente que no es necesario reducirlos mucho para garantizar que están por debajo de los niveles especificados por la norma.

8.2.1. Análisis de los resultados

Bajando un poco más el número de conmutaciones de la señal de salida por ciclo puede verse que las ventajas aportadas por la técnica SHMPWM con respecto a la SHEPWM son mayores. El nivel de los armónicos que no son expresamente eliminados es impredecible lo que hace que el equipo necesite estar equipado con filtros que soporten el posible alto contenido armónico correspondiente.

Puesto que en la técnica SHMPWM se tienen en cuenta todos los armónicos, aunque no sea posible conseguir señales que cumplan la norma completa debido al reducido número de conmutaciones por ciclo, se consiguen espectros con un contenido armónico más contenido y siempre próximo a los niveles establecidos por la norma.

Esto hace que el número de filtros necesario sea menor y, en cualquier caso, relajar las especificaciones de los elementos almacenadores de energía de dichos filtros, reduciendo por tanto el coste y volumen de los mismos.

8.3 9 cortes

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos con 9 cortes por cada cuarto de onda lo que supone 36 cambios en la señal de salida por ciclo.

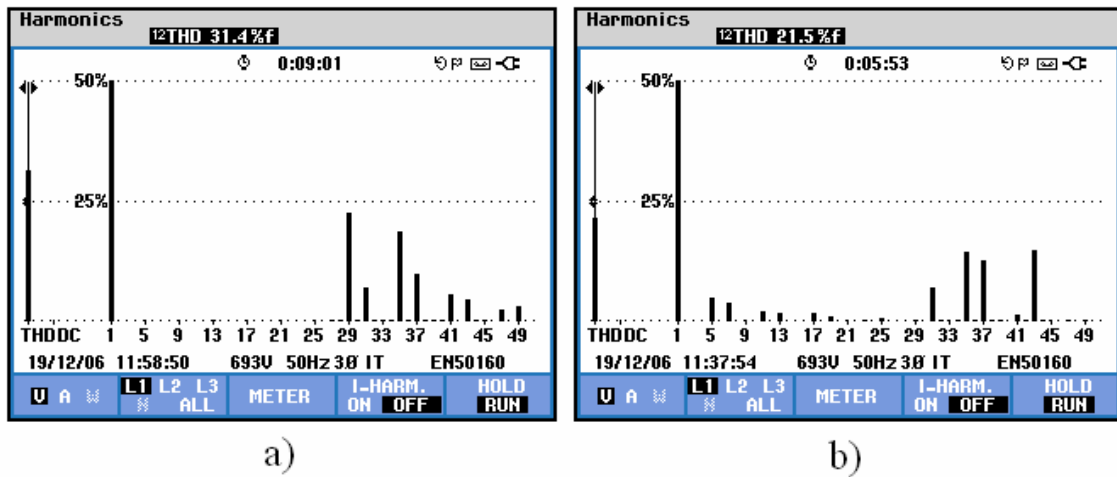


Figura 25 Espectro de las señales obtenidas con SHEPWM (a) y SHMPWM (b) con 9 cortes y $M_a=0.95$.

En la Figura 25 aparece representada una comparación entre las técnicas SHEPWM (a) y SHMPWM (b) para una forma de onda de 9 cortes y $M_a=0.95$. De nuevo puede verse que la señal conseguida con la técnica SHMPWM tiene un espectro más limpio que hace más fácil conseguir que entre en norma. El $THD_{40}=21.5\%$ frente al 31.4% de la obtenida con SHEPWM.

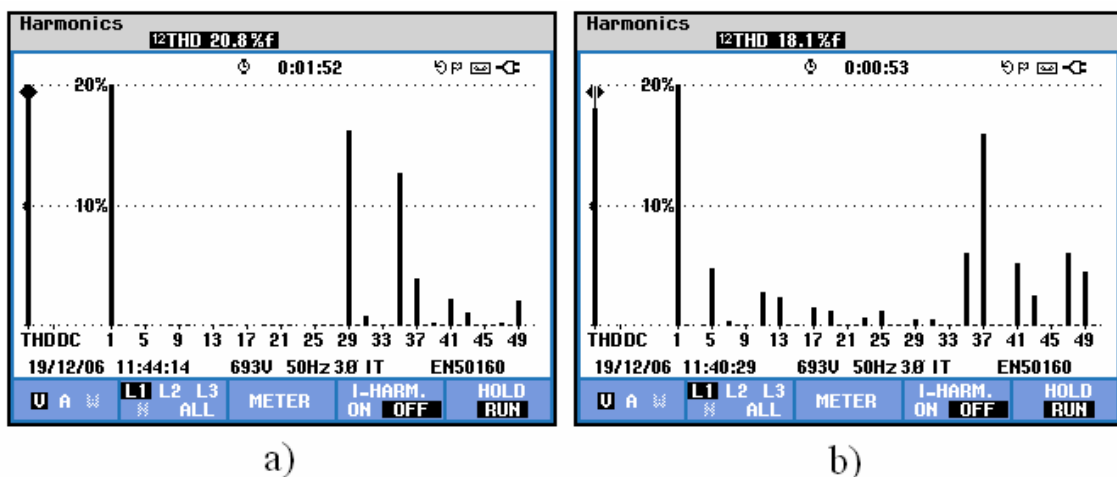


Figura 26 Espectro de las señales obtenidas con SHEPWM (a) y SHMPWM (b) con 9 cortes y $M_a=1.10$.

En la Figura 26 aparece de nuevo una comparación entre las formas de onda obtenidas usando los métodos SHEPWM (a) y SHMPWM (b) para 9 cortes y $M_a=1.10$. En este caso el THD es similar en ambos casos pero puede verse que el primer armónico no nulo de la solución obtenida con el método SHEPWM corresponde al 29 y tiene un nivel bastante alto. En el caso SHMPWM el primer armónico que se sale de norma es el 35 aunque con un nivel no demasiado alto. El primer armónico del caso (b) del mismo nivel que el 29 de la figura (a) corresponde al armónico 37. Esto es una clara ventaja ya que los elementos almacenadores de energía necesarios para su filtrado tienen un valor mucho más pequeño.

8.3.1 Análisis de los resultados

De nuevo se muestra que el nuevo método SHMPWM consigue formas de onda superiores en cuanto a calidad en el contenido armónico que las obtenidas usando SHEPWM. Esto se consigue gracias a que en el nuevo método se tienen todas las restricciones en cuenta y se estudia como un problema global mientras que en el método SHEPWM únicamente se consideran los armónicos que se pretende eliminar y el resto se dejan descontrolados. Esto implica que no se dispone de ningún conocimiento a priori sobre dichos armónicos y el resultado es completamente imprevisible.

Al igual que el caso de 11 cortes, se ha realizado la comparación únicamente con la técnica SHEPWM ya que a estas frecuencias de conmutación tan bajas las técnicas OSPWM y PWM clásica no consiguen evitar que aparezca un alto contenido armónico a baja frecuencia.

8.4 7 cortes

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos con 7 cortes por cada cuarto de onda lo que supone 28 cambios en la señal de salida por ciclo. Esta frecuencia de conmutación tan baja hace que las técnicas OSPWM y PWM clásica proporcionen señales de salida con un alto contenido armónico a bajas frecuencias (hasta el armónico 50 donde la norma establece limitaciones) y por tanto, de nuevo las comparaciones se han hecho únicamente con el método SHEPWM.

Esta frecuencia de conmutación tan baja es la apropiada para aplicaciones de muy alta potencia como variadores de grandes bombas.

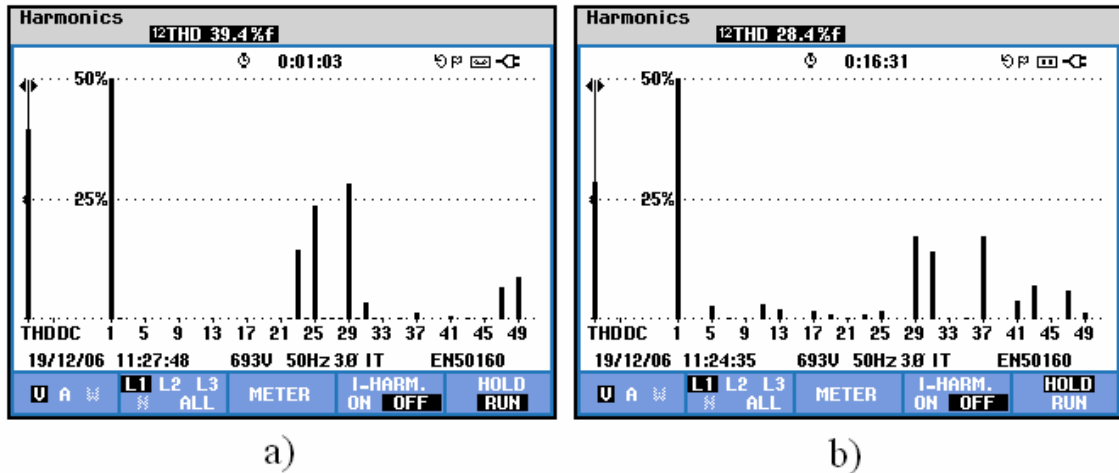


Figura 27 Contenido armónico de las señales obtenidas usando los métodos SHEPWM (a) y SHMPWM (b) con $M_a=0.95$ y 7 cortes.

En la Figura 27 aparece la comparación entre las formas de onda de 7 cortes y $M_a=0.95$ conseguidas con los métodos SHEPWM (a) y SHMPWM (b). De nuevo la onda generada con el nuevo método tiene un contenido armónico menor y a frecuencias más altas. El primer armónico no nulo del caso SHEPWM es el 23 mientras que el primero fuera de norma del caso SHMPWM es el 29. De nuevo esto contribuye a que las bobinas y los condensadores del hipotético filtro pasivo necesario para eliminar el contenido armónico sean de valores menores, lo que supone una gran ventaja ya que esta frecuencia tan baja de conmutación es ideal para aplicaciones de alta potencia.

También se puede observar que en el caso SHEPWM el $THD_{40}=39.4\%$ mientras que con el nuevo método se queda en 28.4% . Aunque está lejos de lo exigido por la norma (8%) viendo los espectros es evidente que es más fácil alcanzarla filtrando la señal generada con el nuevo método que con el SHEPWM.

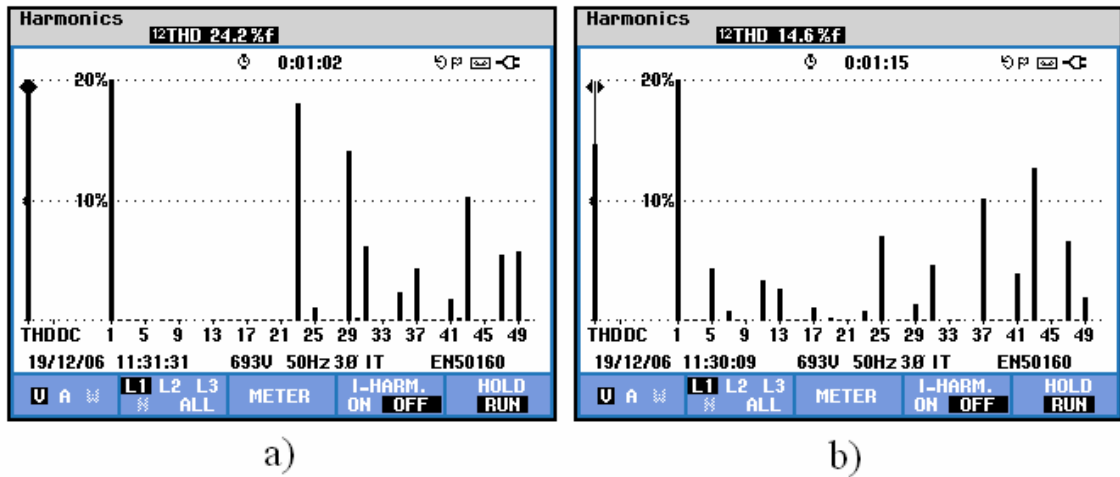


Figura 28 Contenido armónico de las señales obtenidas usando los métodos SHEPWM (a) y SHMPWM (b) con $M_a=1.10$ y 7 cortes.

En la Figura 28 aparecen representados los espectros de las señales generadas con SHEPWM (a) y SHMPWM (b) con 7 cortes y $M_a=1.10$. De nuevo se muestra que el método SHMPWM consigue espectros con menos contenido armónico y para frecuencias más altas. Puede apreciarse en la figura (a) que el armónico 23 se acerca al 20% del valor del armónico principal mientras que en el caso (b) el primer armónico significativo es el 23 y es mucho menor.

8.4.1. Análisis de los resultados

Al igual que en los casos anteriores, conforme se va reduciendo la frecuencia de conmutación se aprecia que las soluciones aportadas por el método SHMPWM son más interesantes que las conseguidas con SHEPWM. Como ya se ha comentado anteriormente, el motivo es que éste último considera un número limitado de armónicos y el resto se quedan completamente incontrolados mientras que en el SHMPWM se tienen en cuenta todas las restricciones y se intenta buscar la mejor solución según el criterio especificado por el usuario.

Este hecho hace que sea muy interesante usar esta técnica para aplicaciones de alta potencia ya que proporciona soluciones con muy bajo contenido armónico.