

7. Técnica Selective Harmonic Mitigation

Actualmente, la generación distribuida está comenzando a ser una realidad en el mercado de la energía y los distribuidores están preocupados sobre la calidad del suministro en la red. La inyección en la red debe ser realizada cumpliendo ciertas normas con objeto de mantener la red estable y con un mínimo de calidad. De hecho, en todo el mundo se están definiendo estándares para garantizar una buena calidad en el servicio. Normalmente, las normas de conexión a red indican la máxima distorsión armónica total (THD) admisible del sistema completo, siendo una restricción adicional al problema. Por otro lado, las normas también fijan un nivel máximo admisible para cada armónico. Por ejemplo, en la Tabla 8 se muestran las restricciones de las normas EN 50160 [11] y CIGRE WG 36-05 [14]. El máximo THD admitido es el 8% y hay limitaciones específicas para cada armónico entre el 2º y el 50º. El nuevo método propuesto tiene en cuenta este nuevo escenario y permite obtener patrones de señales PWM precalculadas con un contenido armónico de alta calidad para poder cumplir estas restricciones.

Odd harmonics				Even Harmonics	
Not triplen		Triplen		Harmonic order (n)	Relative Voltage(L _i)
Harmonic order (n)	Relative Voltage (L _i)	Harmonic order (n)	Relative Voltage (L _i)		
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1.5%	4	1%
11	3.5%	15	0.5%	6...10	0.5%
13	3%	21	0.5%	>10	0.2%
17	2%	>21	0.2%		
19	1.5%				
23	1.5%				
25	1.5%				
>25	0.2+32.5/n				

Tabla 8 Especificaciones de las normas EN 50160 y CIGRE WG 36-05.

En la sección 7.1 se presenta el principio básico del método propuesto. En la sección 7.2 se explica cómo reformular el planteamiento como un problema de optimización donde las ecuaciones se resuelven con un algoritmo de búsqueda aleatoria que minimiza una función objetivo. En este nuevo marco, el problema adopta una nueva expresión matemática que permite añadir nuevas restricciones de carácter práctico. Estas características prácticas son difíciles de modelar y no se suelen tener en cuenta en métodos analíticos sino que una vez encontradas las soluciones se comprueba si son válidas o es necesario descartarlas debido a estas restricciones. En la sección 7.3 se hace un repaso del método heurístico Simulated Annealing en su extensión a espacio continuo que es el que se ha utilizado para obtener los resultados. Una presentación más

detallada del método aparece en el capítulo 10. En la sección 7.4 se muestran algunos detalles de la implementación del algoritmo mientras que en la 7.6 se muestra la aplicación práctica del citado algoritmo a un ejemplo concreto.

7.1 Principio básico del método propuesto

En este trabajo, el planteamiento del problema se ha reformulado teniendo en cuenta que la eliminación de determinados armónicos no es el objetivo concreto buscado. El método SHEPWM consigue buenos resultados haciendo cero algunos armónicos concretos y olvidando el efecto del resto de armónicos. Se han presentado trabajos previos de otros autores que han intentado reducir el efecto de los armónicos no eliminados [15] pero en esta nueva técnica se tienen en cuenta todos los armónicos desde el 2º hasta el 50º que es el rango habitual donde las normas de conexión a red imponen restricciones.

Este nuevo método considera un nivel máximo aceptable para cada armónico permitido por el estándar de conexión a red y plantea la generación de patrones de conmutación como un problema de optimización. Como una restricción adicional, se tiene en cuenta el máximo THD admisible. Por esto, el método propuesto es llamado Mitigación Selectiva de Armónicos (en inglés SHMPWM) porque el método mitiga y no elimina el contenido armónico hasta niveles aceptables con objeto de conseguir señales de calidad a la salida.

7.2 Formulación de la Función Objetivo

La búsqueda de patrones de conmutación para cumplir una determinada normativa de conexión a red puede ser reformulada como un problema de optimización. Con objeto de abordar el problema con métodos heurísticos de búsqueda aleatoria, es necesario rescribir debidamente las ecuaciones (6). Si se acepta un valor mayor que cero (E_i) en un determinado armónico, la expresión de partida en (6) se relaja para permitir cierto contenido armónico pero mínimo. Ahora el problema está descrito como un problema de optimización que busca una terna de α_i en el intervalo continuo $(0, \pi/2)$.

$$\begin{aligned}
 H_1 &= \frac{4}{\pi} \left[\sin \alpha_0 - \sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 - \dots + (-1)^n \sin \alpha_n \right] \\
 E_1 &= Ma - |H_1| \\
 E_5 &= \frac{4}{5\pi} \left[\sin(5\alpha_0) - \sin(5\alpha_1) + \sin(5\alpha_2) - \dots + (-1)^n \sin(5\alpha_n) \right] \\
 E_7 &= \frac{4}{7\pi} \left[\sin(7\alpha_0) - \sin(7\alpha_1) + \sin(7\alpha_2) - \dots + (-1)^n \sin(7\alpha_n) \right] \\
 &\dots \\
 E_{49} &= \frac{4}{49\pi} \left[\sin(49\alpha_0) - \sin(49\alpha_1) + \sin(49\alpha_2) - \dots + (-1)^n \sin(49\alpha_n) \right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

El objetivo consiste en encontrar una solución muy próxima a la analítica, que se consigue cuando el contenido armónico es bajo, pero obtenida ahora cuando el valor de una determinada función objetivo (FO) es mínimo. Si la FO vale cero, entonces la solución debe ser idéntica a la obtenida usando métodos analíticos para resolver las ecuaciones planteadas con el método SHEPWM.

$$OF(\alpha_0, \dots, \alpha_n) = \sum_{(i=1,5,7,\dots,49)} E_i^2 \tag{9}$$

Con objeto de dotar de más flexibilidad al método, la FO presentada en (9) puede ser completada de la siguiente forma:

$$OF(\alpha_0, \dots, \alpha_n) = \sum_{(i=1,5,7,\dots,49)} c_i(E_i) \cdot E_i^2 + c_{THD}(THD) \cdot THD \tag{10}$$

donde $c_i(E_i)$ son en general funciones que dependen del error del armónico i . En primera aproximación, estas funciones pueden reducirse a constantes para dar pesos distintos según el armónico del que se trate. Por ejemplo, si $c_1=100$ y el resto son iguales a 1, entonces se da prioridad al armónico fundamental. El método ha sido generalizado para poder tener en cuenta normas y recomendaciones de carácter práctico.

Gracias al nuevo planteamiento del problema, la estrategia de optimización permite que el orden del problema (directamente relacionado con el número de conmutaciones por ciclo) no contribuya a incrementar la complejidad del método. En cualquier caso se sigue intentando minimizar una función objetivo usando un método de búsqueda heurística.

7.3 Extensión al espacio continuo

Para resolver el problema se ha utilizado una adaptación del ampliamente conocido algoritmo de búsqueda heurística conocido como Simulated Annealing (SA) que será ampliamente detallada más adelante. Se podrían haber utilizado otros muchos algoritmos como Tabu Search [18], Algoritmos Genéticos [19], Particle Swarm [20], etc. La elección de un determinado algoritmo no es relevante ya que los instantes de conmutación serán calculados previamente offline de forma que el esfuerzo computacional necesario para obtener los resultados no afecta a la implementación. Las principales características de SA que lo hacen apropiado para este objetivo son la fácil formulación y codificación que requiere para ser adaptado a cualquier problema.

La mayoría de las implementaciones que se han realizado de SA han sido para resolver problemas discretos donde el número de soluciones posibles (conocido como espacio de configuraciones) es extremadamente grande pero finito [21]. Una aplicación típica es el mapeo y rutado de circuitos programables como las FPGAs donde el gran número de opciones disponibles requiere el uso de técnicas de búsqueda aleatoria para obtener una solución suficientemente buena en un tiempo razonable.

En este caso la implementación del algoritmo difiere ya que es necesario utilizarlo en el espacio continuo. Las distintas soluciones se generan de forma aleatoria teniendo en cuenta que una nueva solución α' se obtiene a partir de la actual α siguiendo la siguiente expresión:

$$\alpha' = \alpha + T/T_{init} * \text{rnd}() \quad (11)$$

donde T y T_{init} son parámetros relacionados con el algoritmo. T es un parámetro relacionado con lo cerca que está la solución actual del mínimo absoluto (tiempo de computación que falta), rnd() es una función que genera un número aleatorio en el rango (0,1). La idea aparece representada en la Figura 14.

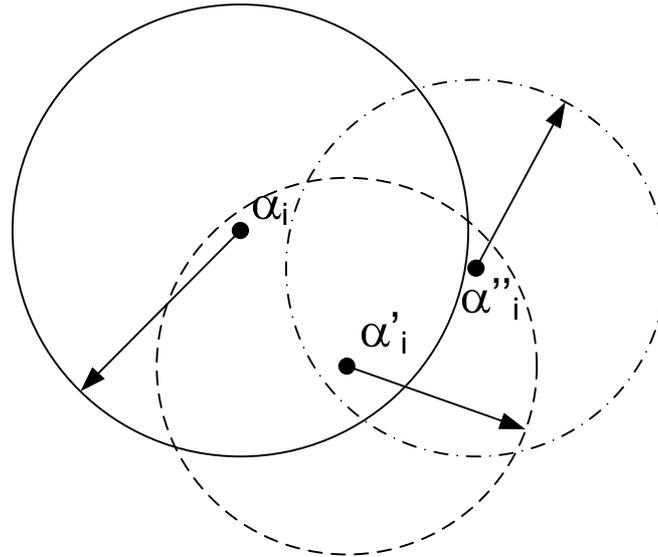


Figura 14 Representación de la generación aleatoria de soluciones en espacio continuo.

7.4 Detalles de la implementación del algoritmo.

Con objeto de dotar de la máxima funcionalidad al método, se han añadido algunas restricciones de carácter práctico a la implementación del algoritmo. Este tipo de restricciones ya se han tenido en cuenta en otras publicaciones previas donde se ha utilizado el método SHEPWM [10]. En este trabajo, el tiempo mínimo entre dos conmutaciones consecutivas on/off de los semiconductores se ha contemplado en el parámetro tecnológico k . Por tanto, una nueva restricción ha sido añadida al problema de forma que cualquier nueva solución α_i debe satisfacer no solamente las ecuaciones (7) sino también la nueva restricción impuesta por el parámetro tecnológico (12).

$$\alpha_{i+1} - \alpha_i > k, \alpha_0 > k/2 \text{ and } \pi/2 - \alpha_n > k/2 \quad (12)$$

Es conveniente recordar que k representa el mínimo ángulo entre dos ángulos de conmutación consecutivos y que por tanto equivale al tiempo mínimo que debe transcurrir entre los dos instantes de conmutación de un dispositivo semiconductor del convertidor (ver Figura 15). Se ha tomado un valor para k a partir de de la hoja de datos de un dispositivo habitual de potencia como el GTO 5SGF40L4502 4.5kV/4.0kA de la firma ABB.

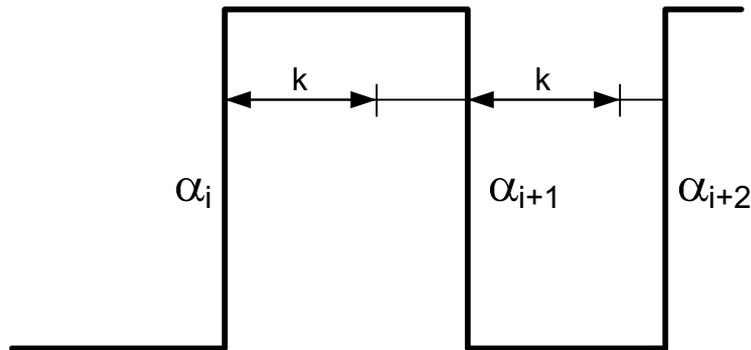


Figura 15 Restricción de tiempo mínimo entre dos conmutaciones consecutivas.

La implementación del algoritmo se ha hecho en C para poder ser ejecutado en un PC de sobremesa. El programa va generando una tabla que contiene los ángulos de disparo que determinan el tiempo de cada nivel de tensión a la salida. Con dicha tabla es posible generar senoides de la frecuencia que se quiera, 50Hz, 60Hz, etc. El tiempo que hay que esperar entre cada dos conmutaciones se obtiene de los ángulos con la siguiente expresión:

$$T_i = \alpha_i T / 2\pi \quad (13)$$

El rango completo de Ma se ha dividido en pasos de 0.01 y se ha ejecutado el algoritmo con cada uno de ellos. Es necesario destacar que es posible encontrar más de una solución distinta que cumpla todas las restricciones para cada Ma . De hecho, el número de soluciones posibles para cada Ma es desconocido. El algoritmo únicamente proporciona una solución, la mejor que ha sido capaz de conseguir para esas condiciones. Si nuestra aplicación requiere un cambio en el Ma , como será lo más habitual, será necesario interpolar entre las distintas soluciones de la tabla.

7.5 Adaptación al Seguimiento de Soluciones

Dado que pueden existir varios juegos de soluciones para cada Ma , el algoritmo ha sido adaptado para poder seguir una determinada solución de forma que se obtengan nuevas soluciones que pertenezcan a la misma familia. Esto garantiza que al hacer la interpolación entre dos soluciones de Ma próximos se obtenga una nueva solución donde cada uno de los ángulos esté próximo a los de partida. Esta variante del algoritmo ha sido llamada Followed Solution Simulated Annealing (FSSA). La idea consiste en transformar el algoritmo de forma que la nueva solución α' correspondiente a un Ma'

pertenece a la misma familia que la solución α correspondiente a Ma que se ha utilizado de partida.

El algoritmo ha sido adaptado para este propósito mediante los siguientes pasos:

- a) Se utiliza como solución inicial de partida la terna α correspondiente al índice de modulación Ma .
- b) La Tinit es muy baja para evitar que los ángulos se muevan lo suficiente como para cambiar de familia. En este caso se ha seleccionado un valor de Tinit=0.1.

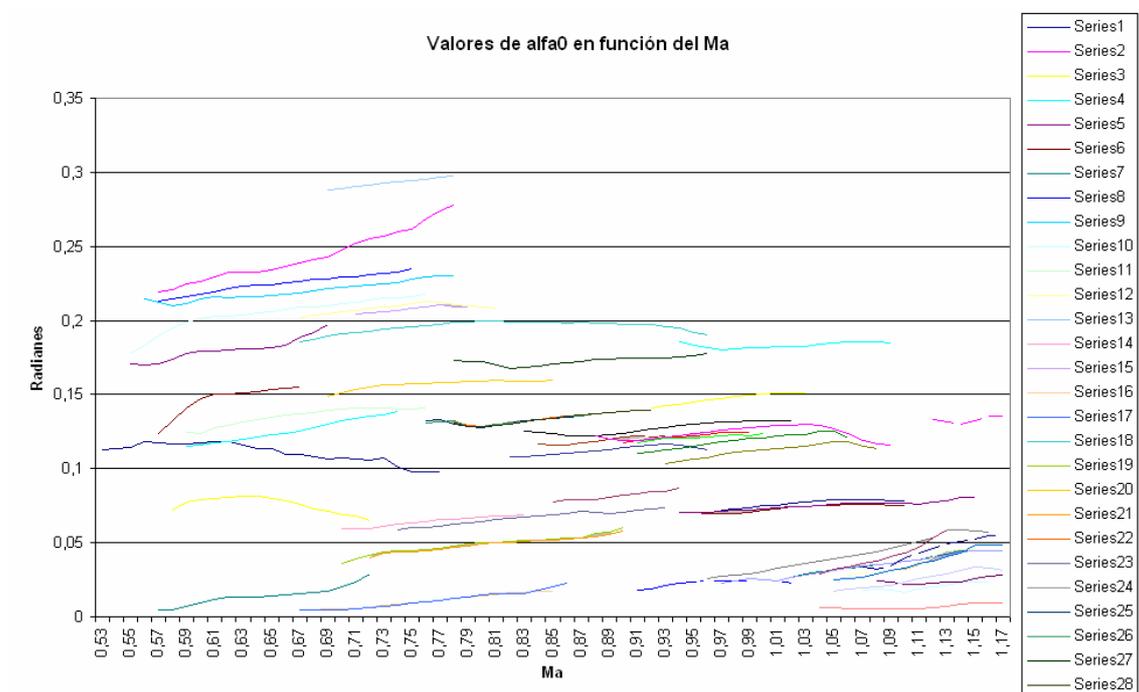


Figura 16 Multiplicidad de soluciones con 15 cortes obtenidas con el método SHMPWM que cumplen la norma.

Esta versión del algoritmo es muy gradencial y permite obtener el resultado mucho más rápido. FSSA evita los saltos entre familias de soluciones pero desgraciadamente no es siempre posible encontrar un único conjunto de soluciones para el rango completo de Ma . En la Figura 16 aparece representado el primer ángulo para todas las soluciones de 15 cortes encontradas usando el método FSSA a partir de una de las soluciones obtenidas con el método SHMPWM al realizar el barrido completo de Ma (de 0.53 a 1.19). Se puede apreciar la multiplicidad de familias de soluciones posibles mencionada en secciones anteriores.

Aunque no es posible encontrar una única familia para poder recorrer todo el rango de Ma , gracias a la existencia de varios conjuntos de soluciones válidas se

dispone de múltiples solapes entre las distintas curvas que permiten recorrer todo el rango. En la Figura 17 aparece ilustrado este hecho.

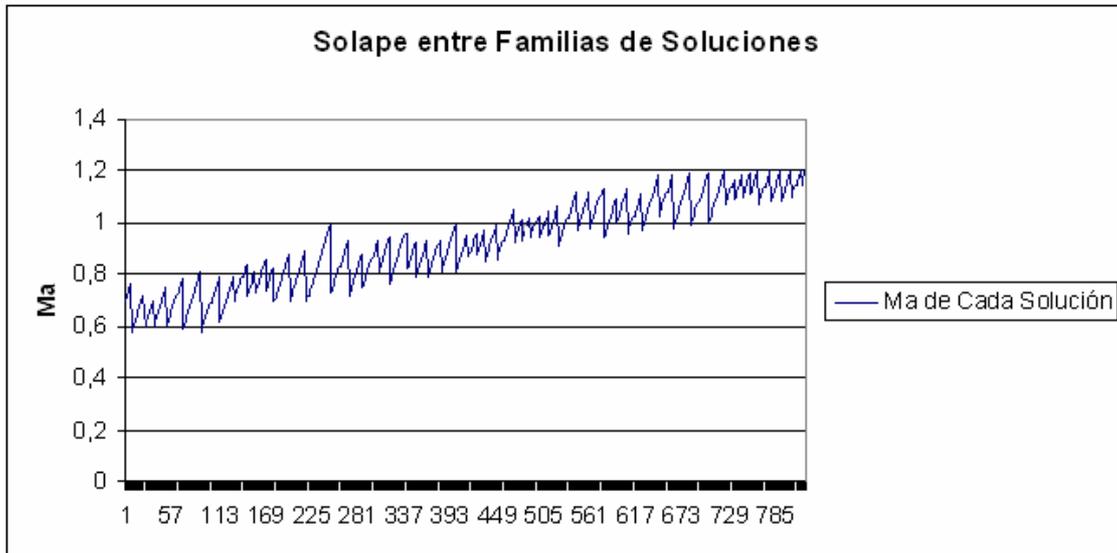


Figura 17 Detalle del múltiple solape entre distintas familias de soluciones para un mismo Ma .

El cambio de un juego de soluciones a otro debe ser realizado con mucho cuidado porque puede producir errores transitorios. Una primera regla práctica es que debe hacerse en uno de los cruces por cero de las señales. Siguiendo esta condición se consiguen señales a la salida que suelen respetar el contenido armónico.

7.6 Ejemplo práctico

El método propuesto calcula el patrón PWM para un convertidor de tres niveles con objeto de cumplir una determinada normativa de conexión. En este caso se han utilizado las normativas EN 50160 y CIGRE WG 36-05 en el algoritmo de optimización para obtener el patrón de conmutación PWM para todo el rango de Ma . Dada la flexibilidad del método se puede utilizar cualquier otra para obtener otros resultados que se adapten a las necesidades del usuario.

Los requerimientos de las normativas mencionadas aparecen representados en la Tabla 8. Cada armónico tiene una limitación específica mientras que el máximo THD permitido (considerando hasta el armónico número 40) es el 8%. Con objeto de contemplar estas restricciones en el algoritmo se han rescrito las ecuaciones (8) sustituyendo cada factor E_i por el valor límite especificado para cada armónico (L_i).

$$\begin{aligned}
 H_1 &= \frac{4}{\pi} \left[\sin \alpha_0 - \sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 - \dots + (-1)^n \sin \alpha_n \right] \\
 E_1 &= Ma - |H_1| \\
 \left| \frac{E_5}{H_1} \right| &\leq 0.8 \cdot L_5 \\
 \left| \frac{E_7}{H_1} \right| &\leq 0.8 \cdot L_7 \\
 &\dots \\
 \left| \frac{E_q}{H_1} \right| &\leq 0.8 \cdot L_q \\
 \left| \frac{E_{q+1}}{H_1} \right| &\leq 0.8 \cdot (L_{q+1} + A_{q+1}) \\
 &\dots \\
 \left| \frac{E_{49}}{H_1} \right| &\leq 0.8 \cdot (L_{49} + A_{49})
 \end{aligned} \tag{14}$$

En la implementación del algoritmo se ha añadido un margen de seguridad del 20% de forma que todos los armónicos están por debajo del 80% del límite correspondiente establecido por la norma. Esto permite disponer de un margen lo suficientemente amplio como para poder implementar los resultados en el prototipo con seguridad. Este margen soporta todas las tolerancias y no idealidades de los componentes reales.

Las funciones $c_i(E_i)$ que aparecen en (10) se han modelado como funciones no lineales con excepción de la del armónico fundamental. Para considerar únicamente combinaciones con el Ma deseado siempre se le asigna un coste $c_i=15000 \cdot E_i$. Para el resto de armónicos, cuando el contenido armónico de la nueva solución supera el 80% del límite establecido por la norma se le asigna un coste $c_i=1000 \cdot E_i$ mientras que si está por debajo el coste asignado es únicamente $c_i=E_i$. Este hecho hace que todos los armónicos estén por debajo del límite especificado en la norma siempre que el número de disparos por periodo (la frecuencia de conmutación) sea lo suficientemente alto como para permitirlo. De esta forma, una vez que el algoritmo haya conseguido que todos los armónicos estén dentro del margen de seguridad establecido se intentarán minimizar. El trato con el THD es muy similar.

Al mismo tiempo se tiene en cuenta la restricción del parámetro tecnológico que modela el tiempo mínimo que es necesario respetar entre dos conmutaciones consecutivas (k en radianes). De esta forma se evitan conmutaciones rápidas de los dispositivos y únicamente se permiten resultados realistas. En esta implementación, $k=0.01$ radianes lo que supone un tiempo de guarda de $32\mu\text{s}$ entre dos conmutaciones consecutivas de los transistores para una onda de 50Hz .