

CAPÍTULO 4. PERTURBACIONES PRODUCIDAS POR ASOCIACIÓN DE CONVERTIDORES

En el Capítulo 3 se han estudiado las perturbaciones conducidas generadas por un único convertidor conectado a través de la red artificial a una alimentación adecuada: la red en el caso del rectificador y la red rectificada en el caso del ondulator. En ambos casos se determinó la perturbación que se propaga hacia el lado de red tanto en modo diferencial como en modo común.

Sin embargo, en las aplicaciones industriales es común que los convertidores no estén conectados directamente a la red, si no que lo estén en cascada. Es decir, se conectan a la red a través de otros convertidores. En concreto, en el caso que nos ocupa, es el ondulator el que se alimenta de la red a través del rectificador.

En esta situación la pregunta a la que intenta dar respuesta este Capítulo es: ¿cómo deben combinarse las perturbaciones generadas individualmente por cada convertidor, y que han sido determinadas en el Capítulo 3, para obtener la perturbación global del sistema?. Esta cuestión ya ha sido abordada en trabajos anteriores [47], pero en unas condiciones de funcionamiento “de laboratorio” alejadas de la realidad y que no son representativas de una situación real.

Para llevar a cabo este estudio se utilizará la configuración experimental descrita en el Apartado 1.2.2 del Capítulo 1 y que se repite en la Figura 4.1.

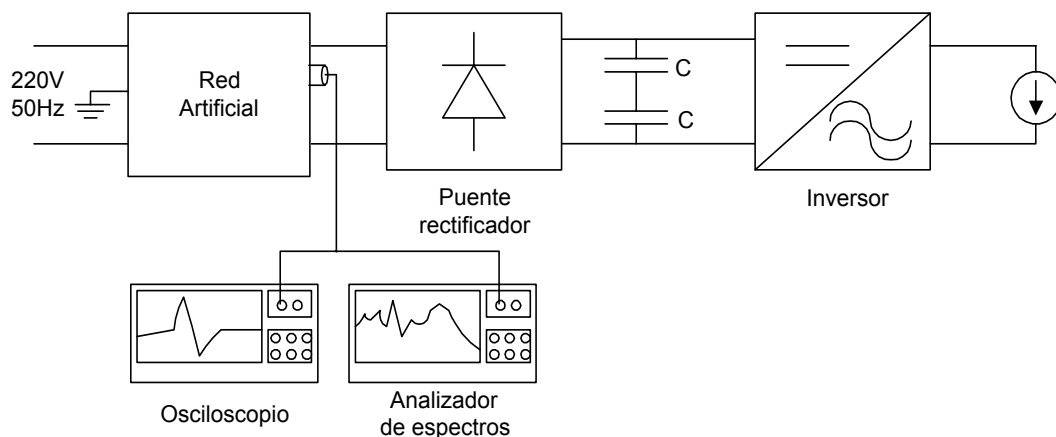


Fig. 4.1 Disposición experimental para el estudio de la asociación de convertidores

Al igual que en el Capítulo 3, se estudiará por separado los dos modos de propagación y se compararán los resultados obtenidos por el modelo con los experimentales.

4.1.- ASOCIACIÓN RECTIFICADOR-INVERSOR

El estudio del problema de la propagación a través de una cascada de convertidores de las perturbaciones generadas por ellos mismos ya ha sido abordada en [47]. En ese trabajo se estudia el caso de la asociación en cascada de dos convertidores: un rectificador y un convertidor DC/DC básico, cuyo esquema aparece en la Figura 4.2

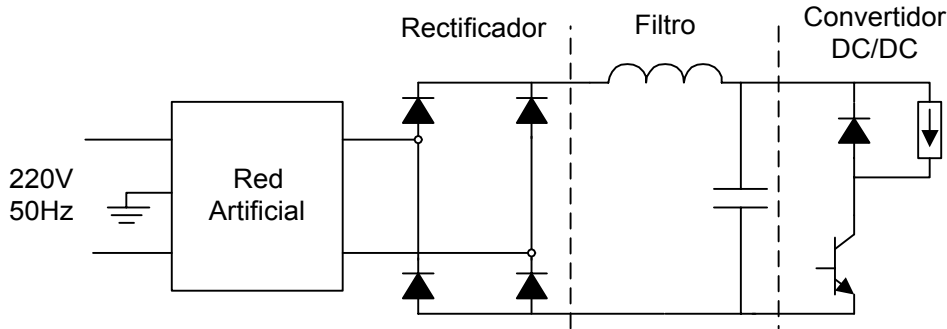


Fig. 4.2 Configuración experimental considerada en [47]

Entre ambos convertidores se insertó una bobina de filtrado para asegurar que el rectificador de entrada trabajase en régimen de conducción continua. Lo sorprendente es que el valor utilizado es de 1H. Este es un valor exageradamente grande que no es aplicable en la realidad.

De todas formas es interesante recordar aquí el resultado obtenido en [47] con la configuración experimental de la Figura 4.2 para entender el papel que juega el rectificador en la propagación hacia la red de las perturbaciones generadas por en ondulator. Bajo las siguientes condiciones:

- la impedancia de los diodos en el estado de conducción es muy inferior al valor de cualquier otra impedancia del circuito, por lo que se podrá despreciar.
- la impedancia de los diodos en el estado de no conducción se supondrá infinita, ignorando cualquier efecto de tipo capacitivo.
- el convertidor DC/DC funciona con ciclo de trabajo d constante e igual a 0,5.
- el rectificador de entrada funciona en régimen de conducción continua

se llega a la conclusión, corroborada experimentalmente, que la perturbación de la asociación de los dos convertidores, $F_{tot}(n\omega_0)$, se expresa en función de la perturbación individual de cada convertidor, $F_{rec}(n\omega_0)$ para el rectificador y $F_{ch}(n\omega_0)$ para el convertidor DC/DC, en la forma:

$$F_{tot}(n\omega_0) = (1 - e^{-j\pi m}) \left(F_{rec}(n\omega_0) + F_{ch}(n\omega_0) \frac{1 - e^{-j2\pi m k \xi}}{1 + e^{-j\pi m \xi}} \right) \quad (4.1)$$

en donde

n : es el orden del armónico considerado

ω_0 : pulsación de la tensión de red

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (4.2)$$

ξ : cociente entre el periodo de conmutación del convertidor DC/DC y el periodo de la tensión de red

$$\xi = \frac{T_c}{T_0} \quad (4.3)$$

y finalmente k responde a la expresión,

$$k = \frac{1}{T_c} \left(\frac{T_0}{2} - t_\mu \right) \quad (4.4)$$

donde t_μ es el tiempo de solapamiento en la conducción de los diodos de una misma rama del rectificador de entrada.

De la expresión (4.1) se deducen las siguientes conclusiones:

- el espectro resultante está constituido únicamente por armónicos de orden impar, dado que el factor

$$\left| 1 - e^{-jm} \right| = 2 \left| \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \right| \quad (4.5)$$

toma los valores 0 para armónicos pares y 2 para los impares

- teniendo en cuenta que

$$2t_\mu \ll T_0 \quad (4.6)$$

el factor multiplicativo de $F_{ch}(n\omega_0)$ en (4.1), que puede ser considerado como un factor de ponderación, se convierte en

$$P(n) = \frac{1 - e^{-j2\pi k\xi}}{1 + e^{-j\pi k\xi}} \approx \frac{1 - e^{-j\pi}}{1 + e^{-j\pi k\xi}} \quad (4.7)$$

Como el valor de k se puede aproximar por

$$k \approx \frac{1}{2\xi} \quad (4.8)$$

finalmente el módulo de (4.7) se convierte en

$$|P(n)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} n\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{2} n\xi\right)} \right| \quad (4.9)$$

Si se representa (4.9) en función de la frecuencia para $\xi=1/400$ y con una frecuencia de red de 50Hz se obtiene el resultado de la Figura 4.3. Como se puede observar, el efecto del factor de ponderación P es acentuar los armónicos de orden impar de la frecuencia de conmutación del convertidor DC/DC (en el ejemplo representado esta frecuencia es de 20kHz), mientras que deja inalterados los armónicos de orden par. Esta es una conclusión importante, puesto que refleja el efecto que sufre la perturbación generada por el convertidor DC/DC al propagarse hacia la red atravesando el rectificador de diodos en el caso de que éste funcione en régimen de conducción continua.

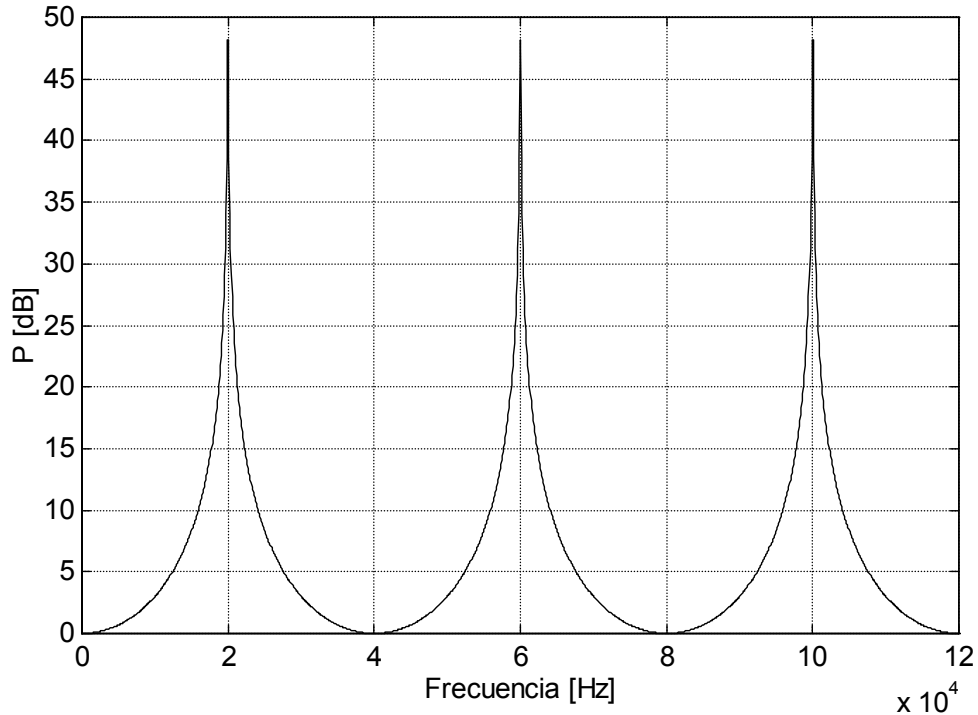


Fig. 4.3 Representación de la función de ponderación P

Por supuesto, los resultados únicamente son válidos bajo las hipótesis mencionadas anteriormente. Aunque en [47] no se ha considerado el efecto de cambios en el ciclo de trabajo d del convertidor DC/DC ni el caso de conducción discontinua del rectificador, intuitivamente si que cabe esperar algún resultado parecido cuando se consideren estas nuevas condiciones. Estas son las condiciones bajo las que se llevará a cabo el estudio de la planta esquematizada en la Figura 4.1:

- conducción discontinua del rectificador de diodos.
- el ondulator es controlado con una modulación senoidal tal como se describió en el Apartado 3.2 del Capítulo 3. Esto implica un ciclo de trabajo d variable.
- las impedancias de los diodos del rectificador en los estados de conducción y no conducción son cero e infinito, respectivamente.

4.1.1- Estudio en modo diferencial

Antes de abordar el estudio en modo diferencial, recordemos una de las conclusiones del Apartado 3.1 del Capítulo 3 referente a la perturbación generada por el rectificador: el origen de la misma es el solapamiento en la conducción de dos diodos de la misma rama durante el relevo en la conducción. Por lo tanto, si se acepta la hipótesis de conducción discontinua en el rectificador, éste no será una fuente de perturbación. Bajo esta condición, el rectificador se convierte únicamente en un propagador de la perturbación generada por el ondulator, pero no actuará como fuente.

Para entender mejor el nuevo papel que desempeña el rectificador en la propagación hacia la red de las perturbaciones generadas por el ondulator nos ayudaremos de la Figura 4.4, en la que aparece la corriente de entrada al rectificador junto con los 3 estados de conducción posibles del mismo.

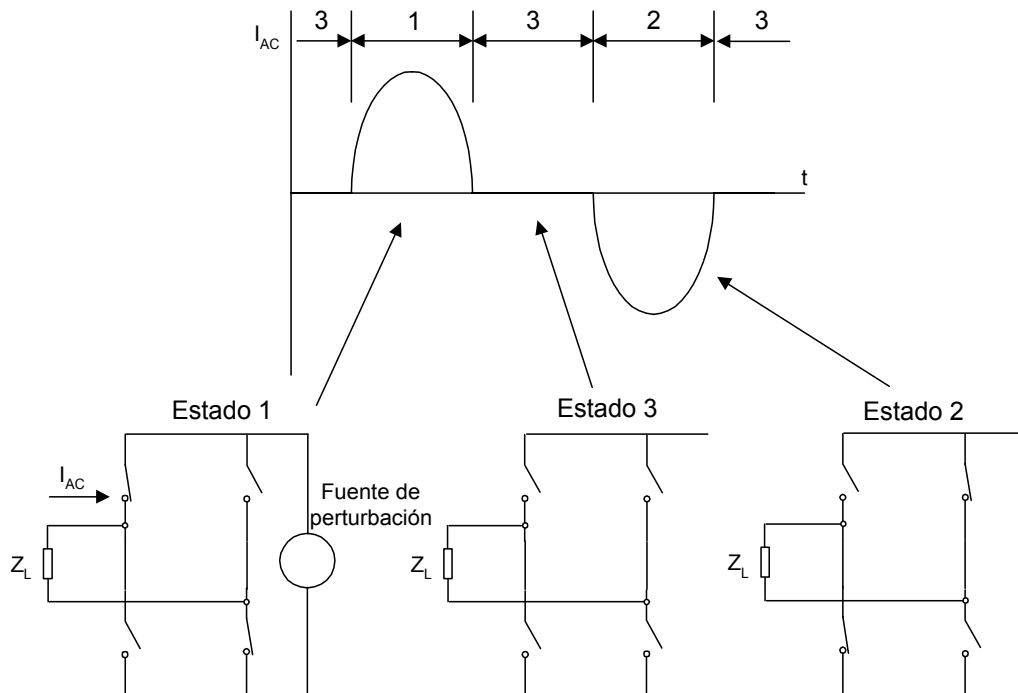


Fig. 4.4 Propagación de la perturbación MD a través del rectificador en conducción discontinua

Mientras el rectificador conduce (Estados 1 y 2) la perturbación presente en el lado de continua alcanza la red artificial afectada de un cambio de signo en cada semiperiodo de la tensión de red. En este sentido, el rectificador actúa como un modulador de la perturbación generada por el ondulator. Sin embargo, cuando el rectificador no conduce (Estado 3), el ondulator queda “desconectado” de la red artificial y el rectificador impide que la perturbación alcance la red artificial. Cabe señalar que aunque se hubiese considerado un cierto efecto capacitivo de los diodos del rectificador en polarización inversa se habría obtenido un resultado similar: la red

artificial estaría conectada entre los puntos medios de un puente equilibrado formado por las impedancias equivalentes de los diodos en polarización inversa.

Esta hipótesis se ve respaldada por la observación experimental. En la Figura 4.5 aparece el registro temporal de la corriente de entrada al rectificador junto con la corriente en modo diferencial en el lado de red.

Fig. 4.6 Corriente de línea y en MD en la entrada del rectificador

Obsérvese como la amplitud de la corriente en modo diferencial cuando conduce el rectificador es ostensiblemente superior a la que llega a la red artificial cuando el rectificado no conduce. Esta observación nos lleva a pensar en la siguiente idea: el rectificador actúa como una especie de “modulador de amplitud” de la perturbación generada por el ondulator. Cuando el rectificador no conduce bloquea el paso de la perturbación desde la fuente (el ondulator) hasta la red, mientras que cuando conduce permite el paso de la misma, aunque introduciendo un cambio de signo en cada semiperiodo. Esta idea se ilustra en la Figura 4.6

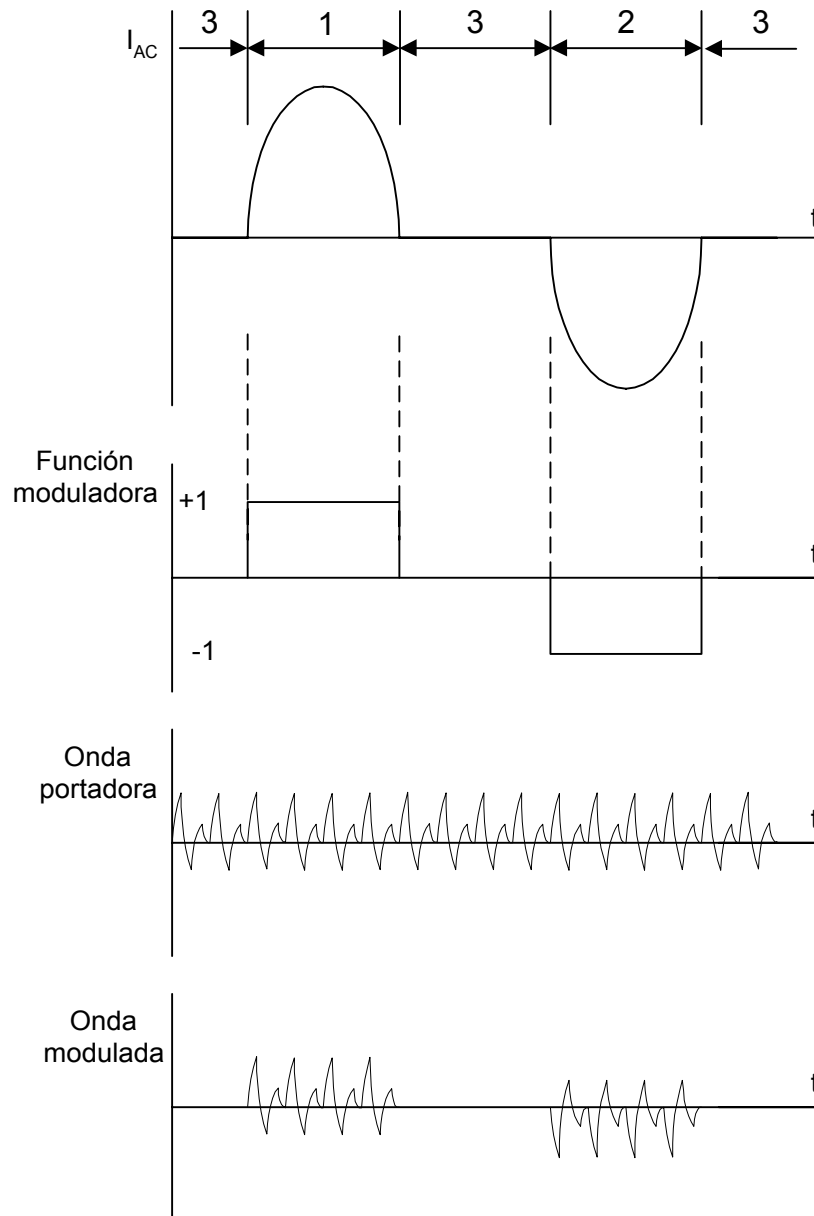


Fig. 4.6 El rectificador en conducción discontinua como modulador de amplitud

Bajo este punto de vista, la función escalón, que describe como primera aproximación el comportamiento del rectificador, actúa como función moduladora de la perturbación generada por el ondulator, que juega el papel de onda portadora.

4.1.2.- Estudio en modo común

En cuanto al papel que desempeña el rectificador desde el punto de vista del modo común se pueden hacer las mismas consideraciones que en el Apartado 3.1.3 de Capítulo3: puesto que no hay fuertes gradientes de tensión que exciten las capacidades parásitas, el rectificador no es una fuente de perturbación en modo común. Por lo tanto, al igual que en el caso del modo diferencial, el rectificador actuará alterando el camino de propagación de la perturbación

generada por el ondulator. Sin embargo, en el caso del modo común, la forma en que el rectificador altera el camino de propagación es mucho menos importante que en el caso del modo diferencial. Una vez más, al no existir grandes derivadas temporales de tensión en el rectificador, éste no se convertirá tampoco en un camino adicional importante para las corrientes de modo común.

De todo ello se puede concluir que la perturbación en modo común que llega a la red artificial es prácticamente igual a la generada por el ondulator. Esto se puede comprobar observando la Figura 4.VV, en la que se representa la corriente en modo común que alcanza la red artificial en el caso de la conexión en cascada de los dos convertidores y la generada por el ondulator individualmente.

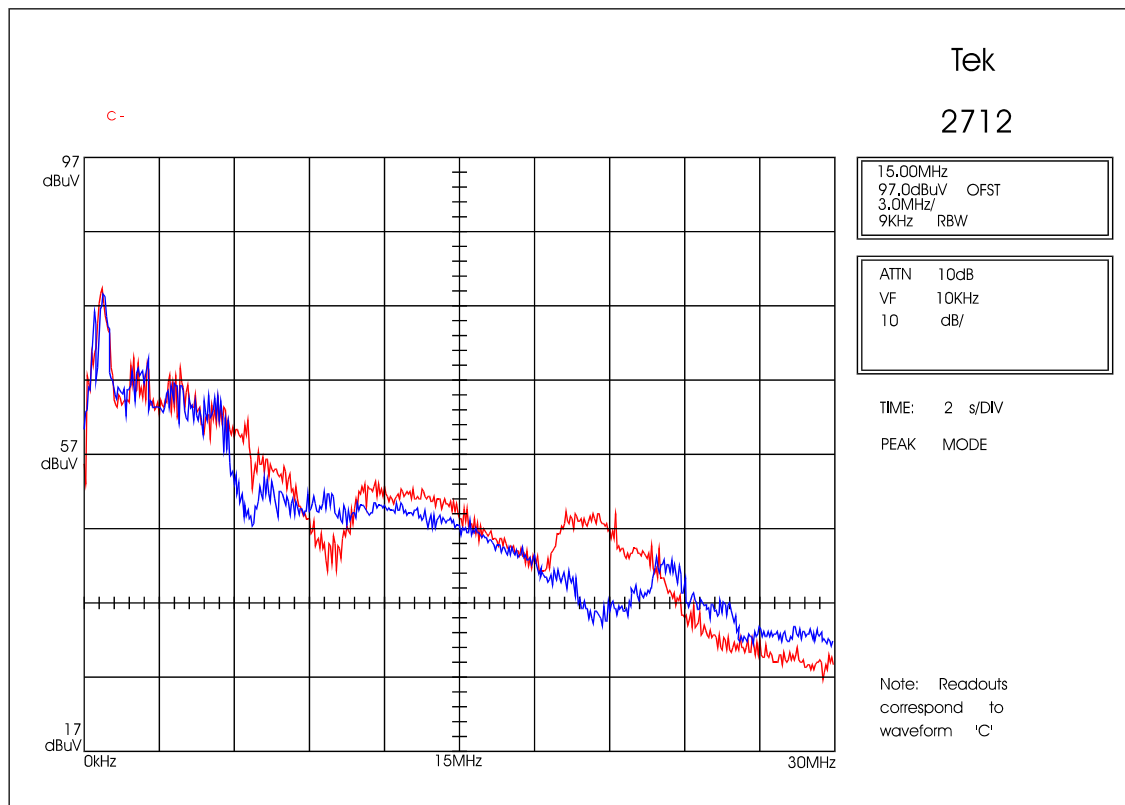


Fig. 4.VV Corriente MC de la conexión en cascada (azul) y del ondulator (rojo)

En la Figura 4.VV se aprecia una gran concordancia entre los espectros. En general se puede decir que la perturbación en modo común que alcanza la red artificial en el caso de la asociación de los dos convertidores es inferior a la del caso del ondulator aislado. La explicación de estas discrepancias puede encontrarse en las nuevas impedancias parásitas introducidas en el sistema. Efectivamente, al intercalar el rectificador entre el ondulator y la red artificial, aparecen nuevos caminos para la perturbación en modo común que permiten a las corrientes cerrarse sobre sí mismas formando bucles e impidiendo que alcancen la red artificial. De todas formas, no se ha considerado necesario desarrollar un nuevo modelo para describir la perturbación en modo común en el caso de la conexión en cascada de los dos convertidores.

La razón es que la perturbación en modo común queda acotada por la obtenida en el caso del ondulator conectado directamente a la red artificial.