

## Conclusiones, aportaciones y sugerencias para futuros trabajos

*En este último capítulo se va a realizar una recapitulación de las conclusiones extraídas en cada uno de los capítulos del presente trabajo doctoral. En primer lugar se exponen de forma resumida las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo. A continuación las aportaciones realizadas en el campo de los circuitos post-reguladores utilizados con los Emuladores de Resistencia, siendo éste el objetivo de todo el trabajo. Por último se indicarán algunas sugerencias para futuros trabajos de investigación dentro del campo de la corrección de Factor de Potencia en sistemas de alimentación monofásicos.*

### 7.1 CONCLUSIONES

La necesidad de cumplimiento de normas de inyección de armónicos de baja frecuencia ha impulsado el desarrollo y estudio de nuevas topologías de convertidores CA/CC y CA/CA que permitan satisfacer dichas normas a mínimo coste de rendimiento, fiabilidad, precio, dimensiones y peso. Existe un amplio abanico de soluciones propuestas que permiten escoger la más adecuada en función de cuál de los anteriores parámetros pese más en la decisión final. En el primer capítulo se han mostrado algunas de ellas, ensayando una clasificación de las mismas en función del objetivo perseguido (corriente senoidal o satisfacer la norma), el mecanismo de corrección (activo o pasivo) y el procesado de potencia (simple, doble o intermedio).

En el segundo capítulo se han presentado tres topologías útiles como post-reguladores de alto rendimiento. Éstas son:

- Post-regulador Reductor de dos entradas,
- Post-regulador conmutado serie Directo o *Forward*,
- El convertidor Elevador usado Post-regulador.

Se han descrito las características de los tres post-reguladores propuestos utilizando como convertidor de referencia en el análisis realizado el post-regulador Reductor o *Buck*. Para mostrar de forma más clara las características de los post-reguladores mencionados anteriormente se ha creado la tabla 2.4, en la que se han resumido dichas características.

La elección de uno de los post-reguladores propuestos como etapa de salida de un ER va a depender, en primer lugar, de la cadena convertidora, es decir, de si es posible diseñarla desde un principio, por lo que será posible añadir las salidas necesarias al ER, o si es un diseño ya dado, en el cual sólo tendremos una salida. En el primer caso se podrían utilizar cualquiera de los post-reguladores, con una o dos entradas, ya que como se ha dicho anteriormente, el número de salidas es configurable en la etapa de diseño. En el segundo el ER sólo dispone de una salida, luego los post-reguladores que podemos utilizar son los conmutados serie Directo o *Forward* y el convertidor Elevador, dado que son los que sólo necesitan una entrada.

Otro aspecto importante en la elección del post-regulador es el incremento de tamaño que ocasiona el post-regulador en el conjunto, tanto debido al mismo post-regulador como a las posibles modificaciones que haya que realizar en el ER para poder conectar ambos.

En la tabla 2.5 se indican cuáles son los elementos que definen el tamaño del post-regulador aplicado a un ER en el ejemplo que nos ocupa. También se incluyen los condensadores almacenadores de energía y los diodos asociados a éstos, indicando en cada caso el valor y el tamaño (volumen), debido a que en cada post-regulador el número de estos elementos va a cambiar.

Con los datos anteriormente expuestos (rendimiento, esfuerzos eléctricos de los semiconductores, aumento de superficie en el convertidor, etc) se podría tomar una primera decisión de cual de los post-reguladores analizados es mejor utilizar en función de los datos disponibles. En los capítulos posteriores se analizaron otras características importantes (audiosusceptibilidad, impedancias de entrada o salida, etc.) que nos van a permitir completar los criterios de selección.

En el tercer capítulo se han analizado cada uno de los post-reguladores desde el punto de vista del modelado de pequeña señal. A partir de los modelos de pequeña señal de los post-reguladores, se realizó el análisis de pequeña señal de cada uno de los post-reguladores con el control modo tensión. Como resultado de este análisis se determinó la estabilidad de los lazos de tensión, así como la audio-susceptibilidad y la impedancia de salida. Se pudo comprobar que la atenuación del rizado de la tensión de entrada, audio-susceptibilidad, a 100-120 Hz, no fue lo grande que sería deseable.

Para intentar mejorar la audio-susceptibilidad de los post-reguladores, es decir aumentar la atenuación del rizado de la tensión de entrada a 100-120 Hz, se añadió al control modo tensión otro lazo de prealimentación o *Feed-Forward*. De esta forma se realizó un análisis del lazo de prealimentación y se obtuvo la audio-susceptibilidad para cada uno de los post-reguladores. La conclusión a la que se llegó es que aunque analíticamente se obtuvo una elevada atenuación del rizado de la tensión de entrada, en la practica esta atenuación es menor de la que se esperaba, dado que el post-regulador opera en condiciones de gran señal, habiendose realizado el análisis y diseño en pequeña señal.

En capítulo cuarto se ha analizado el comportamiento de los post-reguladores propuestos con el control modo corriente promediada. Como se ha podido comprobar en este capítulo el ancho de banda que se puede obtener en los post-reguladores es elevado, entre 1kHz y 10 kHz cuando la frecuencia de conmutación es 100 kHz, dependiendo del post-regulador analizado.

Por otra parte, se ha estudiado también la influencia de las variaciones de la tensión de entrada en la tensión de salida. Se ha comprobado que el control de corriente promediada presenta mejores características de atenuación a bajas frecuencias (audio-susceptibilidad) que el control modo tensión cuando el lazo de tensión está abierto. Además se ha podido comprobar que las atenuaciones obtenidas para frecuencias comprendidas entre 100-120Hz son mayores en el post-regulador reductor de dos entradas y el post-regulador conmutado serie Directo o *Forward* que en el convertidor Elevador usado como post-regulador

Por lo tanto el mejor comportamiento de la audio-susceptibilidad del post-regulador con el control modo corriente promediada, de 20 a 40 dB mayor que con el control modo tensión en función del post-regulador, permitirá reducir más aun el tamaño del condensador almacenador de energía en el ER, y obtener los mismos resultados de rizado en la salida que con el control únicamente de la tensión.

En el quinto capítulo se han analizado los post-reguladores de alto rendimiento con el control modo corriente de pico. Se han analizado los post-reguladores desde el punto de vista

del lazo de tensión externo, y sobre todo respecto a la audio-susceptibilidad. En este último aspecto hay que destacar que los resultados obtenidos se parecen más a los obtenidos con el control modo tensión que al control de corriente promediada, ya que en este modo de control solamente se utiliza un amplificador de error o regulador, y por tanto la audio-susceptibilidad a bajas frecuencias tiene una pendiente de 20 dB/dec. Sin embargo ya que el ancho de banda que se obtiene es mayor, es posible introducir el polo en el origen y el cero del amplificador de error de tensión a una frecuencia mayor que en el lazo de tensión y por tanto tener una mayor atenuación en el rango de frecuencias 100-120Hz que el control modo tensión. La mejora más apreciable se produce en el convertidor Elevador. De todo ello se deduce que el control modo corriente de pico tiene unas características intermedias entre el control modo tensión y el control modo corriente promediada.

Los aspectos que se han tratado en el sexto capítulo han sido en primer lugar los problemas de estabilidad que pueden surgir por el encadenamiento entre etapas, utilizando como criterio la adaptación de impedancias de entrada y salida entre ambas etapas conversoras. La conclusión a la que se ha llegado es que, al reducir el valor del condensador o condensadores almacenadores de energía de 100 Hz de salida del ER, no aparecían problemas en la estabilidad de las etapas conversoras si se aumentaba el ancho de banda para mantener la sobreoscilación de salida dentro de los límites admitidos por el post-regulador, con lo que un efecto compensa a otro y la impedancia de salida del ER no se ve afectada. Sin embargo, el aumento del ancho de banda del ER tiene como efecto perjudicial la deformación de la corriente de salida, que debe ser siempre lo suficientemente pequeña como para no generar un contenido armónico que lleve al incumplimiento de la normativa de armónicos de baja frecuencia. Por tanto, la reducción del tamaño de los condensadores de filtrado acaba estando limitado por el contenido armónico admisible en la corriente de entrada.

El siguiente aspecto que se ha tratado es la reducción de la amplitud de la variación de la tensión de salida del ER ante variaciones de carga. En este punto se ha comprobado que aumentando el ancho de banda del ER hasta valores de 130 Hz obtenemos sobreoscilaciones prácticamente nulas y la forma de onda de la corriente se mantiene al límite de norma Clase A la cual es la menos restrictiva y con la cual el contenido armónico de la corriente en este caso estaría dentro de la norma, hasta potencias de 830W. La limitación del ancho de banda del ER  $f_{vi}$  también va a limitar el valor mínimo de los condensadores de almacenamiento.

El tercer aspecto tratado en este capítulo es el de las características de salida del convertidor. En este caso se ha podido comprobar que realizando la simulación del modelo de gran señal del convertidor podemos obtener valores muy próximos al valor real, salvo que no está incluido el valor del rizado de alta frecuencia. Los valores obtenidos para el post-regulador reductor de dos entradas con control modo corriente promediado nos permiten

obtener una audio-susceptibilidad baja, una impedancia de salida pequeña y una sobreoscilación y tiempo de respuesta del convertidor pequeña.

En prácticamente todos los análisis realizados se han comparado los resultados obtenidos mediante el análisis matemático, con la simulación y los resultados experimentales, obteniéndose una buena aproximación entre todos ellos.

## 7.2 APORTACIONES

En este trabajo, se ha realizado un estudio de convertidores con procesado parcial de potencia, lo que ha llevado al desarrollo y estudio nuevas topologías de convertidores útiles como post-reguladores de alto rendimiento, el post-regulador Reductor de dos entradas y el post-regulador conmutado serie Directo o *Forward*. Es de destacar que estas dos nuevas topologías dado su carácter novedoso, se encuentran registradas como patentes. El post-regulador Reductor de dos entradas con patente nacional y el post-regulador conmutado serie Directo o *Forward* con patente internacional. En el caso del convertidor Elevador se ha descrito su utilidad como post-regulador de alto rendimiento.

Se ha realizado un estudio completo de las nuevas topologías, estático y dinámico. En el estudio estático se han caracterizado los convertidores, obteniéndose los modos de funcionamiento, estrés en los semiconductores, dimensionamiento del convertidor, etc. Se han caracterizado los convertidores desde el punto de vista dinámico (en modo de conducción continuo), obteniéndose en cada caso el ancho de banda, impedancia de entrada, impedancia de salida, audio-susceptibilidad, para cada modo de control utilizado (modo tensión, modo corriente promediada y modo corriente de pico). En el control modo corriente de pico se han obtenido todos los parámetros de admitancias que se muestran en la tabla 5.1, de forma que es posible caracterizar al convertidor utilizando estos parámetros.

También, se ha realizado un estudio de la conexión en cascada de un ER y un post-regulador de alto rendimiento. También se ha realizado un estudio del ER en cuanto a la modificación del ancho de banda del mismo con el fin de limitar las variaciones de las tensiones de salida al mínimo, sin que el contenido armónico de la corriente de entrada exceda del límite permitido por la norma.

Por otra parte, se ha estudiado que características del convertidor permiten predecir las sobretensiones en la tensión de salida de los convertidores ante cambios bruscos de la carga.

Por último, decir que los estudios teóricos realizados han sido comprobados por dos vías: simulaciones por ordenador y ensayos en el laboratorio. Para realizar la simulación de los convertidores se ha utilizado el modelo promediado de la red de conmutación, modelo de gran señal, pudiéndose comprobar que el modelo es muy aproximado tanto para la obtención del modelo de pequeña señal como para realizar simulaciones temporales en gran señal. En cuanto a la simulación, se ha desarrollado un modelo de circuito de control PFC (por ejemplo UC3854 o UC3855) para la simulación en Pspice, en el que están incluidos el amplificador de error del lazo de tensión, el circuito multiplicador y el amplificador de error del lazo de corriente, quedando el modulador de anchura de pulso incluido en el modelo de gran señal del convertidor.

### 7.3 SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS

El presente trabajo se encuadra dentro de post-reguladores con procesado parcial de potencia para convertidores CA/CC con corriente senoidal y mecanismo de corrección activo. Sin embargo, últimamente han aparecido numerosos trabajos enfocados en la utilización de convertidores CA/CC en los cuales se pretende únicamente el cumplimiento de la norma de contenido armónico, que es en definitiva lo que exige la norma. En este campo se están desarrollando topologías en las cuales mediante un reprocesado parcial de la potencia, se realiza un conformado de la corriente para darle la forma deseada (parte de una senoide), comúnmente conocidos como “*Shapers*”. Por tanto, se considera interesante profundizar en el estudio de este tipo de topologías, tanto con mecanismo de corrección activo como pasivo.

En cuanto a los post-reguladores de alto rendimiento, el modo de funcionamiento que utiliza es el de sumar a una tensión de entrada la tensión necesaria para obtener la tensión de salida mayor. Sería de interés el ampliar el estudio de estos post-reguladores para el caso inverso, es decir, partir de una tensión mayor y restarle una tensión para obtener la tensión deseada.