

# 5

## CONCLUSIONES

---

*En el presente capítulo se pretende realizar un resumen de las conclusiones obtenidas a lo largo de esta tesis, además de hacer especial hincapié en las aportaciones originales realizadas. Por otra parte se sugerirán una serie de nuevas líneas de investigación hacia las cuales se podrían encaminar futuros trabajos que pudieran ser continuación del realizado en la presente tesis doctoral.*

### 5.1 APORTACIONES DEL PRESENTE TRABAJO

En los últimos 20 años dentro del contexto de la electrónica de potencia, y más concretamente en los sistemas electrónicos de alimentación, la corrección del factor de potencia ha sido uno de los temas más estudiados en el diseño de fuentes de alimentación CA/CC. Tradicionalmente ha sido sinónimo de corriente de entrada senoidal y Distorsión Armónica Total (DAT) muy baja. Sin embargo, con la entrada en vigor de la norma EN 61000-3-2, en el año 2000, no se hace necesario en absoluto tener una corriente de entrada perfectamente senoidal para el cumplimiento de la misma. En la norma se fijan, para cuatro clases de equipamiento, unos límites máximos en cada uno de los armónicos de la corriente de entrada entre el 2º y el 40º. Si la corriente de entrada del equipo está por debajo de estos límites, el equipo cumplirá la norma.

Por lo tanto, a partir de la aplicación de la norma la filosofía en el diseño de fuentes de alimentación CA/CC cambia y abre la puerta a nuevos circuitos que traten de suavizar la forma de onda de la corriente de entrada lo suficiente para que su contenido armónico esté por debajo de los límites de la misma. Ahora no se hace necesario recurrir a una topología de doble etapa, donde la primera, conocida como Corrector del Factor de Potencia (CPF), garantiza que la

corriente de entrada del convertidor sea senoidal, mientras que la otra etapa proporciona las características dinámicas adecuadas a la tensión de salida de la fuente de alimentación.

En la actualidad, existen muchas aplicaciones donde la carga no sufre variaciones bruscas y no se hace necesaria una respuesta dinámica de la tensión de salida excesivamente rápida, no hay requerimientos de *hold-up time* y las especificaciones de la tensión de salida (rizado y nivel de continua) no comprometen el diseño de la fuente (tamaño y coste del condensador de salida). En muchas de estas aplicaciones, el CFP con control con multiplicador puede ser usado como solución única (sin segunda etapa) para el diseño de una fuente de alimentación monofásica CA/CC y así disminuir el coste del diseño. En este caso, la dinámica de la tensión de salida de este tipo de convertidores ha de ser mejorada. Sin embargo, esta mejora, está limitada. La primera parte de la presente tesis se ha centrado en realizar aportaciones en esta línea de trabajo.

La segunda línea de trabajo, en la que esta tesis ha realizado aportaciones, es la búsqueda de nuevas estrategias de control con el objetivo de simplificar el control con multiplicador en CFP operando en Modo de Conducción Continuo (MCC).

Teniendo en cuenta las dos líneas de trabajo que se han desarrollado en el presente trabajo, las principales aportaciones de esta tesis son:

En primer lugar, en el capítulo 2 se han presentado un nuevo modelo estático y un nuevo modelo dinámico para el CFP con control con multiplicador. Dichos modelos han sido comprobados experimentalmente mediante simulaciones y prototipado. La principal novedad de estos modelos es la inclusión de la distorsión de la corriente de entrada en el análisis. De hecho, ambos modelos son de por sí una herramienta muy eficaz a la hora de analizar los CFP en los que se ha aumentado la dinámica de la tensión de salida y se consideran la primera aportación de esta tesis. De hecho, a partir de estos dos modelos se han establecido los límites dinámicos de los CFP. Dichos límites son de dos clases:

- Límites dinámicos impuestos por la normativa IEC 61000-3-2: Estos límites están definidos por la distorsión en la corriente de entrada, ya que a medida que se aumenta la respuesta dinámica, aumenta el contenido armónico de la corriente de entrada y por tanto, disminuye la potencia máxima para el diseño del CFP cumpliendo la norma EN 61000-3-2.

- Límites naturales del CFP: Estos límites están impuestos por el principio de funcionamiento de este tipo de convertidores. Considerando distorsión en la corriente de entrada, cada magnitud del CFP está compuesta por un valor medio y una componente de alterna de dos veces la frecuencia de red. Además, la amplitud de esta componente de alterna nunca puede ser mayor que la componente de continua en ciertas partes del circuito. En concreto, la tensión de salida del lazo de tensión impone un límite para el correcto funcionamiento del CFP, ya que el valor de pico de su rizado nunca debe superar el valor de su componente de continua. Por lo tanto, si se aumenta el ancho de banda del CFP por encima de 1,5 veces la frecuencia de red (para márgenes de fase razonables) se compromete el correcto funcionamiento del CFP.

En segundo lugar, en el capítulo 3, se ha estudiado paramétricamente, a partir de su análisis estático, la distorsión de la corriente de entrada en los CFP que se genera al aumentar la dinámica de la tensión de salida. De las conclusiones obtenidas se ha deducido una nueva estrategia de control en los CFP en los que se ha mejorado su dinámica. Esta nueva metodología de control está basada en la generación de una referencia senoidal modificada (como patrón fijo y calculado a priori mediante un análisis estático). Si se utiliza esta referencia en los CFP y control con multiplicador en lugar de la referencia senoidal rectificada tradicional sensada en la tensión de entrada, se obtienen CFP con dinámica rápida y corriente de entrada senoidal. Un microcontrolador de bajo coste puede utilizarse para crear dicha referencia senoidal modificada. Su implementación es sencilla y fácilmente acoplable a los controladores que se utilizan para la corrección del factor de potencia y control con multiplicador. Esta estrategia de control es la segunda aportación de esta tesis. A partir del análisis que se ha realizado de la misma (modelo estático y dinámico) se propone la posibilidad de diseñar fuentes de alimentación CA/CC basadas en CFP con dinámica rápida de única etapa sin distorsión en la corriente de entrada. Así se asegura el posible cumplimiento de la norma, previendo futuras revisiones más estrictas de la misma. Finalmente, con esta estrategia de control aunque se puede aumentar el ancho de banda del CFP hasta 2 veces la frecuencia de red (para márgenes de fase razonables) sin comprometer el correcto funcionamiento del CFP, este incremento no es significativo con respecto a las respuestas obtenidas en el capítulo anterior distorsionando la corriente de entrada.

Finalmente en el capítulo 4 se han presentado dos metodologías de control que tienen como objetivo simplificar el circuito de mando que supone el control con multiplicador. Los métodos de control presentados en este capítulo permiten usar controladores estándar de fuentes

conmutadas para el control de CFP que trabajan en MCC. De esta manera se evita el uso de controladores basados en multiplicadores analógicos, más complejos en su implementación y que en la tradicionalmente sólo pueden trabajar con redes de frecuencias de hasta 400 Hz. Los controladores usados con estos métodos deben ser del tipo “modo corriente de pico” y en ellos la rampa de compensación debe hacerse variar en función del valor de la corriente de entrada manejada. Por lo tanto, el Control mediante Rampas de Compensación Controladas por Tensión (CRCCT) con pendiente variable y el Control mediante Rampas de Compensación con Pendiente Fija (CRCPF) son la tercera y cuarta aportación de esta tesis. En el caso de CRCPF el circuito de control es mucho más sencillo que el CRCCT con pendiente variable. La rampa de compensación a utilizar tiene que ser una rampa lineal en el caso del convertidor elevador y una rampa exponencial en el caso de los convertidores de la familia del convertidor indirecto (reductor-elevador, SEPIC, Cuk y Zeta). La constante de tiempo de esta exponencial puede elegirse de tal forma que se minimice la DAT de la forma de onda obtenida. Esto ocurre para la mayor parte de los diseños reales cuando dicha constante de tiempo es entre 3 y 6 veces menor que el periodo de conmutación.

Tanto en el CRCCT con pendiente variable y en el CRCPF, el lazo de corriente de entrada es extremadamente rápido, lo que permite obtener alto FP en redes de frecuencias altas (como por ejemplo, las redes de 400 Hz utilizadas en aviónica). Los FP obtenidos están entorno al 0,98 en redes de frecuencia 1 kHz. También los FP se mantienen altos al disminuir la potencia en convertidores controlados con CRCCT y pendiente variable. Por el contrario, los resultados obtenidos para el CRCPF no son tan buenos a potencias menores. Además en este último caso, si el convertidor no opera en condiciones nominales de la tensión de entrada entonces la distorsión puede ser muy apreciable. Por lo tanto, CRCPF no tiene buenas prestaciones en el margen universal de la tensión de entrada. Sin embargo, el CRCCT con pendiente variable, diseñado de forma adecuada, sí que puede utilizarse en el margen universal de tensiones de entrada.

A modo de resumen se puede concluir que todas las aportaciones realizadas en esta tesis han ido encaminadas a cumplir con los dos objetivos de esta tesis:

- Llevar a cabo un estudio detallado de los CFP con control con multiplicador para analizar sus límites y su campo de aplicación como fuente de alimentación de única etapa, para posteriormente aportar soluciones a la distorsión de la corriente de entrada que se produce al aumentar su dinámica.

- Proponer nuevas estrategias de control con el objetivo de simplificar el circuito de mando que supone el control con multiplicador.

## 5.2 SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS

Como sugerencias para la continuación de las líneas de investigación iniciadas con esta tesis, se proponen las siguientes:

- Estudio en detalle de soluciones, ya aportadas por diversos autores, para la mejora de la dinámica de la tensión de salida de los CFP con control con multiplicador manteniendo la corriente de entrada senoidal. A partir del modelo estático y del modelo dinámico presentado en esta tesis se puede valorar dichos métodos.
- Aplicación de la metodología seguida en el desarrollo de los modelos del CFP con control con multiplicador a los llamados “Emuladores de Resistencia naturales”: CFP operando en MCD.
- Desarrollo de un circuito integrado de bajo coste para la implementación del CRCCT con pendiente variable.

