

## **Capítulo 8**

# **CONCLUSIONES, APORTACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

*En este último capítulo de la presente tesis doctoral, se realiza en primer lugar un breve resumen del trabajo realizado en la misma. Posteriormente se presentan las conclusiones obtenidas tras el estudio de las topologías presentadas, tanto para alimentación en régimen de la lámpara como para los periodos de arranque y calentamiento. A continuación se presentan las aportaciones del presente trabajo, destacando en último lugar las líneas de investigación que se abren a partir del trabajo realizado.*

### *Índice del Capítulo*

8.1	RESUMEN DE LA TESIS .....	8-3
8.2	CONCLUSIONES .....	8-5
8.3	APORTACIONES REALIZADAS.....	8-7
8.4	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	8-9

## **8.1 RESUMEN DE LA TESIS**

En la presente tesis doctoral, se ha realizado un estudio básico del fenómeno de resonancias acústicas en lámparas de alta intensidad de descarga. De las conclusiones de dicho estudio, se han obtenido una serie de características que deben presentar las formas de onda de alta frecuencia de alimentación de este tipo de lámparas.

Las resonancias acústicas son un proceso físico caótico no deseado, que se tiene en las lámparas de alta intensidad de descarga, cuando éstas son alimentadas a frecuencias altas (a partir de 10-20 kHz). Estas resonancias provocan inestabilidad en el arco de descarga, haciendo que este se curve en diversos modos geométricos. Aparecen entonces fluctuaciones en los parámetros eléctricos de la lámpara, en la intensidad de la luz emitida, en el color, etc. En ocasiones se produce el apagado de la lámpara, y, en casos extremos, si el arco llega a tocar la pared del tubo de descarga, puede producirse la destrucción violenta de la lámpara.

Se trata de un fenómeno que, a cada frecuencia, presenta una energía umbral de activación. Por tanto, aún cuando el sistema de alimentación proporcione una energía a la lámpara en una frecuencia en la que se tienen resonancias acústicas, es posible que estas no aparezcan si no se supera este umbral de activación. Esta energía mínima puede expresarse en porcentaje de la potencia media a una determinada frecuencia de conmutación respecto de la potencia media entregada a la lámpara.

Partiendo de publicaciones técnicas relacionadas con el tema, puede concluirse que, para asegurar una descarga estable, es suficiente tomar este umbral como igual al 5%. Este es el peor caso (frecuencia fundamental) del peor tipo de lámpara (halogenuros metálicos) para potencias nominales iguales o superiores a 70W.

Por tanto, queda abierto el camino para estudiar diferentes formas de onda de potencia instantánea, parametrizarlas, y definir los límites en estos parámetros que mantienen cualquier armónico de frecuencia por debajo del valor límite considerado.

Una vez que se han estudiado estas formas de onda, puede analizarse el comportamiento de inversores electrónicos que las proporcionen. Es necesario, en este punto, relacionar los parámetros límite de las formas de onda con los parámetros de control de los inversores. De este modo han podido especificarse los requerimientos que debe cumplir estos sistemas electrónicos de alimentación en alta

frecuencia, para lámparas de este tipo, de manera que resulta minimizado el riesgo de aparición de inestabilidad en el arco de descarga, debidas a resonancias acústicas.

A continuación se han procedido a realizar un análisis completo de determinadas topologías de potencia (así como de los métodos de control asociados a estas topologías). Se han escogido para este análisis topologías en corriente (que garanticen estabilidad), que sean capaces de proporcionar una forma de onda de potencia instantánea adecuada para la alimentación de lámparas de descarga. Tras el análisis de todas estas topologías, se han escogido dos opciones básicas de alimentación, mediante criterios tanto de estabilidad como de minimización del riesgo de aparición de resonancias acústicas.

La propuesta, análisis y diseño de estos inversores, así como de los métodos de gobierno asociados, es el tema principal de esta tesis doctoral. De las dos opciones más adecuadas (inversor de 1 interruptor e inversor de 2 interruptores), se escoge como el óptimo el inversor de 1 interruptor. Se ha construido un prototipo basado en esta topología, mediante un método de diseño del balasto que busca fijar parámetros de funcionamientos relacionados con las resonancias acústicas. Se ha procedido a la realización de experimentos en lámparas de descarga. Para estos experimentos, se han elegido lámparas de vapor de sodio a alta presión y de halogenuros metálicos de potencia nominal 70W.

Los resultados obtenidos han sido completamente satisfactorios. Las lámparas elegidas fueron probadas, en primer lugar, mediante balastos electrónicos senoidales de alta frecuencia (la amplitud del primer armónico de potencia es igual al valor medio, es decir, la modulación de la potencia es, para la frecuencia de conmutación, del 100%). En todas las lámparas de halogenuros metálicos, y en la mayoría de las lámparas de sodio, aparecieron resonancias acústicas. A continuación se probaron inversores de forma de onda cuasicuadrada a alta frecuencia. También aparecieron resonancias acústicas, aunque, en términos generales, en menor medida que en el caso senoidal. Al probar las lámparas mediante el inversor de un interruptor, con el método de control propuesto, las resonancias acústicas desaparecieron en todos los casos.

Por último, cabe destacar la propuesta, análisis y diseño de un nuevo tipo de arrancadores de lámparas de alta intensidad de descarga basados en dispositivos electrónicos de protección de muy bajo coste. También se han construido prototipos de estos arrancadores, realizándose, sobre el mismo tipo de lámparas, los experimentos oportunos. Estos mostraron que todas las lámparas se encendieron correctamente.

## 8.2 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos tras el análisis y los experimentos realizados en la presente tesis muestran que:

- ❑ Es posible estabilizar el arco de descarga en lámparas de halogenuros metálicos y de vapor de sodio a alta presión, de baja potencia nominal (70W). Esto es posible alimentando dichas lámparas mediante el control de la forma de onda de potencia instantánea de salida, en bandas de frecuencia en las que existen resonancias acústicas.
- ❑ Mediante la topología presentada en esta tesis (inversor reductor-elevador con control por corriente máxima y tiempo de apagado), y gracias al control de potencia instantánea, las resonancias acústicas en lámparas de sodio a alta presión y de halogenuros metálicos de 70 W, desaparecen, lográndose una descarga estable.
- ❑ El inversor así obtenido trabaja, estáticamente, a frecuencia constante (tiempo de apagado fijo y ciclo de trabajo 0,5). De este modo es posible elegir la frecuencia de alimentación de la lámpara.
- ❑ Estos inversores de alta frecuencia pueden implementarse en balastos completos para alimentación de lámparas, ya sean alimentados desde baterías de continua o desde la red de alterna.
- ❑ Mediante los sistemas de control propuestos, es posible controlar el periodo de calentamiento de las lámparas de descarga alimentadas, actuando sobre una referencia externa de potencia.
- ❑ También mediante este control, es posible limitar con gran exactitud la potencia máxima de funcionamiento, independientemente de las horas de funcionamiento de la propia lámpara.
- ❑ En cuanto al inicio de la descarga, se ha demostrado posible el diseño y construcción de un tipo de arrancadores de muy bajo coste basados en dispositivos electrónicos de protección. Así puede reducirse el coste total del equipo de alimentación de lámparas de descarga. El arrancador

propuesto es compatible con la topología de alimentación y el método de control propuestos.

- Finalmente, puede destacarse como conclusión que es posible la construcción de un balasto completo, para alimentación de lámparas de descarga, de *bajo coste*. Tanto las etapas de potencia (basadas en inversores de 1 interruptor) como los métodos de control (métodos sencillos), garantizan un coste total del balasto más bajo que el de otro tipo de balastos electrónicos.

### 8.3 APORTACIONES REALIZADAS

La principal aportación de este trabajo es la de proporcionar, al diseñador, un paquete completo de herramientas de diseño, que incluyen: topologías, métodos de control, métodos de calentamiento, arranque, etc., con el objetivo de realizar un balasto completo, para alimentación de lámparas de alta intensidad de descarga en zonas de frecuencia conflictivas (desde el punto de vista de las resonancias acústicas).

Con las herramientas proporcionadas sería posible construir un balasto completo, solamente con dos interruptores y dos elementos magnéticos, y un circuito de control de bajo coste, desde batería o desde la red eléctrica.

Entrando en detalle, se destacan a continuación las aportaciones, punto por punto, realizadas en la presente tesis doctoral:

- ❑ Se ha presentado un nuevo método de medida de resonancias acústicas, basado en la medida directa de la potencia media entregada a la lámpara en cada instante.
- ❑ Se ha demostrado que la variación de la potencia media, presenta la misma sensibilidad que la variación de la carga equivalente que presenta la lámpara. Esta variación de la resistencia equivalente, está directamente relacionada con la estabilidad del arco y, por tanto, con las resonancias acústicas.
- ❑ Se ha realizado un estudio de diversas formas de onda, de tensión y corriente, que pueden obtenerse mediante inversores electrónicos de alta frecuencia. Ese estudio presta especial atención al contenido armónico de la **potencia** instantánea a la que dan lugar estas formas de onda de tensión y corriente. Manteniendo los límites de este contenido armónico de la potencia por debajo de los niveles de excitación de resonancias acústicas, se han fijado límites de diseño para estos inversores.
- ❑ Se ha procedido a un análisis de inversores electrónicos de alta frecuencia, para alimentación de lámparas de descarga, teniendo en cuenta los límites de diseño anteriormente especificados. El análisis del comportamiento de estos inversores también presta atención a la estabilidad del sistema

balasto-lámpara obtenido. Mediante la normalización de este estudio, se ha logrado independizar este análisis de factores tales como la potencia nominal de la lámpara, la frecuencia de funcionamiento, etc.

- Se ha definido un parámetro eléctrico (rizado absoluto de corriente por la lámpara), necesario para poder trabajar de forma cómoda con los límites de diseño impuestos anteriormente, al estudiar la influencia de las formas de onda en la aparición de resonancias acústicas.
- Se ha propuesto un nuevo método de control, capaz de alimentar, en todo momento, lámparas de descarga en condiciones de potencia nominales (para cualquier tipo de carga equivalente de la misma). Este método de control gobierna simultáneamente tanto la potencia media como la forma de potencia instantánea (crítica para evitar resonancias acústicas).
- Se presenta también un procedimiento de diseño de estos inversores, con ejemplos ilustrativos, para poder emplear en la práctica los resultados del análisis realizado.
- Se han construido un prototipo de balasto completo basado en el inversor propuesto de 1 interruptor, y se han realizado experimentos de validación del método de control, que han logrado un funcionamiento estable de las lámparas. Estas lámparas ensayadas presentaban, al ser alimentadas mediante otro tipo de inversores, bandas de resonancias acústicas.
- Se ha logrado también implementar, en estos inversores, la capacidad de gobierno de la etapa de calentamiento de la lámpara. Es posible fijar la potencia media, en cada instante, al valor deseado. Además esto se ha conseguido manteniendo siempre la forma de onda instantánea de potencia dentro de los límites de seguridad, sin excitar las resonancias acústicas.
- En cuanto al encendido de la lámpara, se ha propuesto un nuevo tipo de arrancador electrónico, pensado para ser implementado en cualquier tipo de inversor electrónico de alta frecuencia. En concreto se han realizado prototipos de este arrancador que han sido montados en inversores como los propuestos en la presente tesis.



## **8.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Si se piensa en las distintas etapas del funcionamiento de una lámpara de descarga, es decir, encendido, calentamiento y permanente (teniendo en cuenta el envejecimiento), puede notarse cómo, en la presente tesis doctoral, se han realizado estudios y aportaciones relativas a todas ellas.

Además, se han realizado los prototipos y experimentos a los que estas aportaciones han dado lugar. Por tanto, un primer desarrollo tecnológico derivado de este trabajo, sería la construcción de balastos electrónicos completos, que incorporen todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento de lámparas de descarga en alta frecuencia. De este modo se procedería a una optimización, desde el punto de vista del coste del equipo, de los sistemas presentados en esta tesis.

En este sentido, los métodos de control han sido implementados, para los prototipos construidos, mediante dispositivos analógicos (comparadores, amplificadores operacionales, multiplicadores analógicos, biestables, etc.). Sería interesante valorar la implementación de estos métodos de control mediante dispositivos digitales (tales como microcontroladores, etc.). Estos dispositivos, podrían gestionar todo el periodo de funcionamiento de una lámpara, desde el inicio de la descarga, pasando por el calentamiento, hasta la llegada al régimen permanente. Además, sería posible entonces añadir prestaciones al balasto tales como comunicación en red, control de la potencia, etc.

Otra línea de investigación tiene por objeto contrastar este método de alimentación para distintos tipos adicionales de lámparas de descarga, de otros fabricantes y otras potencias nominales. En concreto el paso siguiente sería probar estos métodos de control en lámparas de potencia nominal 35W, que presentan más problemas de estabilidad de arco que las de 70W.

Por otra parte, y pensando en realización de balastos en serie, es vital plantearse qué ocurre con el funcionamiento del sistema ante variaciones de parámetros debidas, por ejemplo, a tolerancias de valor en componentes, etc. Esta sensibilidad del equipo frente a tolerancias, es crítica, sobre todo, en el caso del inversor de dos interruptores, puesto que presenta un sistema de control basado en que las dos inductancias son exactamente iguales.

Puesto que los balastos están basados en inversores de onda cuadrada, sería recomendable estudiar todo lo relativo al ruido electromagnético (EMI), tanto conducido como radiado. Es en este tipo de inversores en los que, a priori, los niveles de EMI son mayores (frente a otro tipo de balastos como los resonantes, que producen una forma de onda de alimentación senoidal).