

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1.- PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA**

En este Apartado se presenta una perspectiva histórica de la evolución del tratamiento que ha recibido la energía eléctrica desde su producción hasta su utilización final, poniendo de manifiesto la cada vez mayor importancia del procesado de la energía eléctrica con convertidores conmutados. Esta mayor intervención de los convertidores conmutados, junto con la evolución de otras ramas de la Electrónica, ha hecho que las interacciones indeseables entre equipos sea un problema de primer orden. Después se hace un repaso al estado actual del problema y, finalmente, se muestran las cuestiones a las que intenta dar respuesta esta Tesis y que serán desarrolladas en el Apartado 1.2.

#### **1.1.1- Perspectiva histórica**

En los inicios de la utilización de la energía eléctrica prácticamente la totalidad de la energía generada era consumida por cargas lineales, ya fueran pasivas en aplicaciones como iluminación y calefacción, o activas, como motores. Si era necesaria alguna manipulación de las características de la energía eléctrica, tal como amplitud, frecuencia, etc., se llevaba a cabo con la ayuda de alguna máquina eléctrica. Estas podían ser estáticas, como los transformadores y autotransformadores, o rotativas, como los grupos Ward-Leonard. Se hablaba entonces de los *convertidores rotativos*. En este tipo de convertidores, la energía era procesada de forma “continua”, sin utilizar conmutaciones bruscas ni de tensión ni de corriente (a excepción del colector de delgas de la máquina de continua). Por otra parte, en aquella época, los sistemas de medida, control y comunicaciones, por su simplicidad y robustez, no se veían afectados por el funcionamiento de los convertidores rotativos encargados del procesamiento de energía. Tampoco había una interferencia entre los diferentes convertidores rotativos. Sin embargo, sí están descritos en la literatura casos de interferencias entre los equipos de comunicaciones (telégrafo, radio,...). La *Compatibilidad Electromagnética* era entonces una disciplina incipiente, no desprovista de un cierto componente “misterioso”, en la que únicamente estaban interesados los técnicos que se ocupaban de los sistemas de telecomunicaciones. La Compatibilidad Electromagnética y la conversión de energía eléctrica, puesto que todavía no se puede hablar de Electrónica de Potencia, eran entonces disciplinas disjuntas. Los técnicos dedicados a la conversión de energía eléctrica no se preocupaban de los efectos secundarios negativos que producían las innovaciones técnicas que introducían en sus diseños.

En cuanto al tratamiento de la energía eléctrica, este panorama permaneció prácticamente inalterado, a pesar de la aparición de las válvulas de vacío, hasta la década de los 60 con la aparición de los dispositivos de estado sólido de potencia. La aparición del tiristor en 1957 [1] y

del transistor bipolar de potencia después, revolucionarían la forma de tratamiento de la energía eléctrica. Con la aparición de este tipo de dispositivos, que permitían dar paso a corrientes importantes y bloquear tensiones y corrientes apreciables, nacía una nueva disciplina: la *Electrónica de Potencia*. Cambiaba entonces de forma radical la forma de tratar la energía eléctrica: se pasaba del convertidor rotativo al *convertidor estático o convertidor conmutado*. Se pasaba de una situación en la que prácticamente las únicas fuentes de perturbaciones eran los relés a otra en la que la principal fuente eran los dispositivos de conmutación de estado sólido. Gracias a las ventajas que ofrecían estos nuevos dispositivos aumentó paulatinamente la proporción de energía eléctrica generada que era procesada por algún tipo de convertidor estático antes de ser utilizada, hasta llegar a nuestros días, en los que gran parte de la energía eléctrica sufre algún tipo de transformación con un convertidor conmutado antes de su utilización.

Las ventajas en cuanto a rendimiento, fiabilidad y precio de los convertidores conmutados han hecho que su utilización abarque una amplia gama de campos de aplicación: regulación de velocidad, compensación del factor de potencia, calefacción, alimentación de equipos tanto industriales como domésticos... Se puede decir que, hoy en día, los convertidores conmutados son sistemas habituales y comunes en nuestro entorno cotidiano.

Los convertidores conmutados, a diferencia de los convertidores rotativos, se caracterizan por un procesamiento "discreto" de la energía eléctrica, empleando conmutaciones de tensiones y corrientes que implican grandes pendientes temporales ( $dv/dt$ ,  $di/dt$ ) de estas magnitudes. Esto los convierte en una de las fuentes de perturbaciones electromagnéticas no deseadas más importante que se puede encontrar hoy en día. El problema se ve agravado si se tiene en consideración la cantidad de convertidores conmutados que se utilizan en la actualidad.

Por su parte, la evolución de las "víctimas" también ha contribuido al agravamiento del problema. Los sistemas de telecomunicación, medida, control y, en general, todos los equipos de tratamiento de la información, han ido aumentando su susceptibilidad, al igual que aumentaba el ancho de banda en los que son sensibles. Estas circunstancias han hecho que la Compatibilidad Electromagnética y la Electrónica de Potencia hayan dejado de ser paulatinamente disciplinas disjuntas, para casi convertirse en la actualidad en complementarias, aunque con intereses antagónicos. No se concibe hoy un técnico dedicado a la Electrónica de Potencia que ignore la problemática en cuanto a Compatibilidad Electromagnética que originan los convertidores conmutados.

Paralelamente, la Compatibilidad Electromagnética se fue desarrollando como disciplina dentro del área de las Telecomunicaciones, desarrollando técnicas de medida y solución de problemas. Sin embargo, muchas de estas técnicas y soluciones no se pueden aplicar directamente al campo de la Electrónica de Potencia. Un claro ejemplo de esto son las técnicas de filtrado: mientras que en los filtros de telecomunicaciones las impedancias de fuente y carga

son conocidas, en los filtros EMI de potencia son desconocidas. Se puede afirmar que las peculiaridades de los fenómenos de Compatibilidad Electromagnética dentro de la Electrónica de Potencia dan lugar a una nueva disciplina: la Compatibilidad en Electrónica de Potencia. Esta nueva área se caracteriza por sus propios procedimientos, métodos de medida y soluciones que son diferentes a los de la Compatibilidad Electromagnética que proviene del mundo de las Telecomunicaciones.

La presente Tesis se inscribe dentro de esta disciplina. Se centrará en la caracterización de las perturbaciones generadas por convertidores conmutados y que se propagan por el mecanismo de conducción al sistema de alimentación o a la carga.

### 1.1.2.- Estado del arte

La principal fuente de perturbaciones en los convertidores conmutados son los fuertes gradientes temporales de tensión y de corriente inherentes a su funcionamiento. El valor de estos  $(di/dt)$  y  $(dv/dt)$  ha ido creciendo a medida que evolucionaba la tecnología de los semiconductores de potencia. Si bien es interesante aumentar el valor de estos parámetros desde el punto de vista de la reducción de pérdidas y aumento del rendimiento, desde el punto de vista de la Compatibilidad Electromagnética interesa justo lo contrario. Se debe intentar, por tanto, llegar a un compromiso entre estos dos criterios. Existen trabajos que intentan buscar este punto de equilibrio [2]. También existen trabajos que intentan, mediante un driver de puerta especial, controlar las pendientes de tensión y corriente en el interruptor durante el proceso de conmutación [3] [4] [5] [6].

En la Tabla 1.1 aparecen los tiempos de conmutación y pendientes de tensión y corriente facilitados por dos fabricantes diferentes de transistores IGBT [7] [8].

**TABLA 1.1**

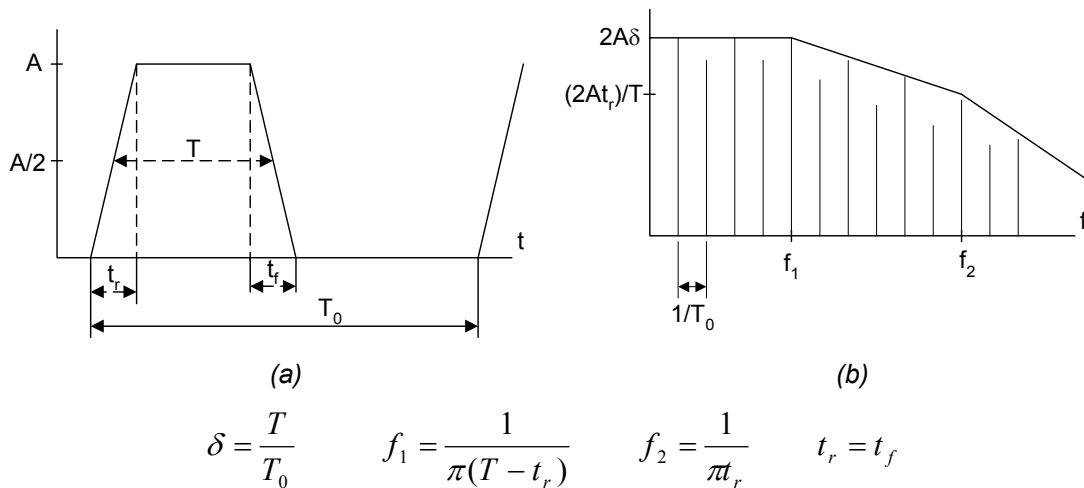
	$V_{ce\ max} = 600V$		$V_{ce\ max} = 1200V$		$V_{ce\ max} = 1600V$	
	Fab. 1	Fab. 2	Fab. 1	Fab. 2	Fab. 1	Fab. 2
$t_r$ (ns)	290	190	190	80	270	200
$t_{d\ on}$ (ns)	810	200	750	110	790	520
$t_f$ (ns)	430	510	840	80	590	110
$t_{d\ off}$ (ns)	560	680	620	550	550	1200
$(di/dt)_{on}$ (kA/ $\mu$ s)	0,517	2,105	1,052	0,250	0,277	0,750
$(di/dt)_{off}$ (kA/ $\mu$ s)	0,348	0,784	0,238	0,250	0,127	1,363
$(dv/dt)_{on}$ (kV/ $\mu$ s)	1,03	1,58	3,15	7,5	2,96	6
$(dv/dt)_{off}$ (kV/ $\mu$ s)	0,70	0,59	0,714	7,5	1,35	11

Como se observa, es común encontrar flancos de tensión y de corriente superiores a los  $10\text{kV}/\mu\text{s}$  y a los  $2\text{kA}/\mu\text{s}$  respectivamente. El siguiente ejemplo puede dar una idea de la magnitud del problema: imaginemos una línea de potencia en el que tenemos una señal con unos flancos de tensión de  $5\text{kV}/\mu\text{s}$ , junto a la que discurre una línea de señal que se encuentran acopladas por una impedancia parásita que representaremos con una capacidad concentrada de  $1\text{pF}$ . La corriente inyectada en el cable de señal por acoplamiento capacitivo viene dada por la expresión:

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (1.1)$$

Sustituyendo los valores considerados se obtiene una corriente inyectada en el conductor víctima de  $5\text{mA}$ . Este es un valor mas que suficiente para alterar el valor de la señal en ese conductor si se trata de un bucle de corriente, o para hacer cambiar el estado lógico si el conductor víctima está conectada a la entrada de un circuito digital.

La repercusión de estas fuertes pendientes temporales en el dominio frecuencial se puede encontrar analizando la envolvente del espectro de la función trapezoidal (onda cuadrada con pendientes finitas) [9]. Tomemos como ejemplo ilustrativo un convertidor que conmuta a  $10\text{kHz}$  ( $T_0=100\mu\text{s}$ ) una tensión de  $300\text{V}$  ( $A=300\text{V}$ ) en  $100\text{ns}$  ( $t_r=t_f=100\text{ns}$ ) con un ciclo de trabajo de  $0,5$ . Estos son valores representativos de un convertidor actual. Esta onda de tensión, representada en el campo temporal aparece en la Figura 1.1 (a). Esta onda periódica temporal se traduce en el campo frecuencial en un espectro discreto de bandas, cuya envolvente se muestra en la Figura 1.1 (b).



**Fig 1.1** Representación en el dominio temporal y frecuencial de una onda periódica  
(a) temporal ; (b) frecuencial

El espectro frecuencial es discreto, puesto que la onda temporal es periódica. Esta formado por líneas separadas en  $1/T_0$ , donde  $T_0$  es el periodo de la onda temporal. Aplicando los anteriores valores se obtiene que la primera frecuencia de corte  $f_1$  se encuentra a  $6,4\text{kHz}$  aproximadamente, mientras que la segunda frecuencia de corte  $f_2$  está en  $3,2\text{MHz}$ .

Estas perturbaciones de alta frecuencia no sólo tendrán su reflejo en las interferencias conducidas. Dependiendo de la configuración física del sistema, también determinarán las perturbaciones acopladas y radiadas. Existen trabajos sobre este tema: relacionar las perturbaciones radiadas con las tensiones y corrientes de alta frecuencia que circulan por el sistema [10] [11] [12]. Sin embargo, debido a la complejidad del problema, estos estudios han sido llevados a cabo sobre maquetas muy simplificadas y en convertidores continua-contínua principalmente [13] [14].

De todas formas, el conocimiento del origen y naturaleza de las perturbaciones conducidas es el punto de partida para el estudio de las radiadas [15]. Por otra parte, si se da solución a las primeras se reducirán habitualmente las segundas.

Una opción para evitar las grandes pendientes de tensión y de corriente propias de la conmutación forzada o dura es emplear técnicas de conmutación suave [16] [17]. Estas técnicas se basan en la utilización de un circuito resonante, normalmente LC, de forma que se consigue que la tensión o la corriente sea cero en el momento en que el interruptor de estado sólido cambia de estado. Esta idea da lugar a la conmutación a cero de tensión ZVS (Zero Voltage Switching) y la conmutación a cero de corriente ZCS (Zero Current Switching). Con estas técnicas de conmutación se consigue reducir las pérdidas energéticas por conmutación y disminuir las derivadas temporales de tensión y corriente origen de las perturbaciones [18] [19]. También permiten aumentar la frecuencia de conmutación. El efecto final es un menor nivel de emisión de perturbaciones. Como contrapartida, el control de los convertidores que utilizan estas técnicas de conmutación es más complejo que los que utilizan conmutación dura.

Sin embargo, en la práctica la utilización de estas técnicas se limita a los convertidores continua-contínua y su aplicación en otros tipos de convertidores y en equipos comerciales es prácticamente nula [20]. En definitiva, a pesar de sus inconvenientes frente a las técnicas de conmutación suave, la conmutación dura continua teniendo una posición dominante dentro de las aplicaciones industriales de la Electrónica de gran potencia.

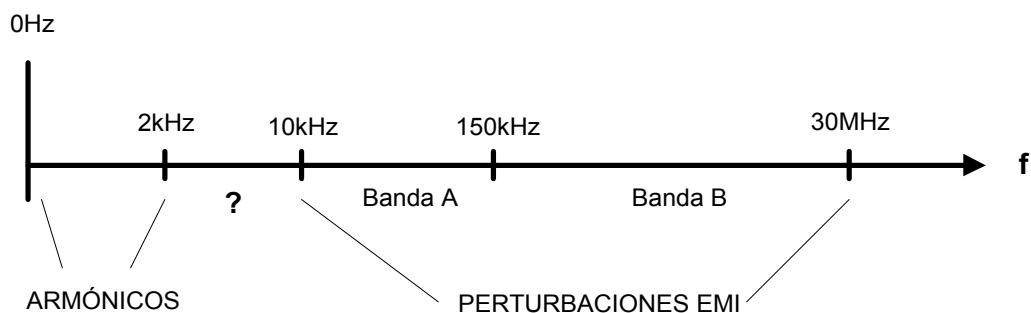
En particular, los accionamientos de máquinas eléctricas con inversores de potencia son, dentro del ámbito industrial, una de las aplicaciones más importantes. Relacionados con esta aplicación en concreto, existen trabajos dirigidos a determinar las perturbaciones conducidas que, originadas por el convertidor conmutado, se propagan hacia la red de alimentación [21] [22] [23] [24].

En este tipo de instalaciones, no sólo son importantes las perturbaciones que se propagan hacia la red. También lo son las que lo hacen hacia el lado de la carga. Un ejemplo de ello son las corrientes de alta frecuencia que circulan por el motor y deterioran los cojinetes de la máquina, acortando la vida útil de la misma [25]. Sobre la propagación de las perturbaciones

hacia el lado de la carga versará la Tesis de mi compañero J. Llaquet. Este es un aspecto de gran interés industrial, puesto que los conductores que unen el convertidor con la máquina accionada pueden compartir distancias apreciables con líneas de pequeña señal. Las perturbaciones producidas por el convertidor pueden afectar entonces a los sistemas de control como autómatas, buses de comunicaciones industriales, señales analógicas, etc...

Pensando en reducir las perturbaciones que se propagan hacia la carga, existen propuestas de nuevas técnicas de modulación aplicables a inversores convencionales (3 ramas, 6 interruptores) que intentan reducir las corrientes en modo común [26] [27]. También existen propuestas que persiguen el mismo objetivo que consisten en utilizar un inversor modificado, al que se le añade una cuarta rama [28]. Otros autores proponen utilizar un inversor convencional con patrones de conmutación especiales orientados a la reducción de las perturbaciones conducidas en modo común que circulan por el motor [29] [30] [31].

La normativa actual sobre perturbaciones conducidas utiliza como criterio para clasificarlas la frecuencia de las mismas. Se habla de armónicos cuando se hace referencia a las perturbaciones que se encuentran por debajo del armónico de orden 40, tomando como frecuencia fundamental la nominal de la red de alimentación [32]. Se habla de perturbaciones conducidas de alta frecuencia, o perturbaciones EMI, aquellas que van desde los 10kHz hasta los 30MHz. Los métodos de medida y límites permitidos en ambos casos son totalmente diferentes. No deja de ser chocante que entre los 2kHz, frecuencia del armónico de orden 40 en una red de 50Hz, y los 10kHz no exista ninguna normativa que limite el nivel de perturbación admisible. Sobre este particular, en la actualidad se está trabajando sobre un proyecto de norma que cubra esta banda de frecuencias [33]. También es un tanto caprichoso el límite superior de 30MHz asignado a las perturbaciones conducidas de alta frecuencia. Existen trabajos que demuestran que las perturbaciones conducidas pueden ser todavía importantes por encima de esta frecuencia [34] [35]. De forma gráfica se puede representar esta clasificación de las perturbaciones conducidas en el dominio frecuencial con la ayuda de la Figura 1.2.



**Fig. 1.2** Clasificación de las perturbaciones conducidas según su frecuencia