



APLICACIONES DE LA INGENIERÍA ELECTRÓNICA II

Guía de la asignatura

Plan de trabajo

■ Módulo 0: Presentación de la asignatura

Presentación

Semana 0, dedicación: 1 hora (0.5 no presenciales, 0.5 presenciales)

Esta asignatura incluye teoría y prácticas de laboratorio. Cada uno de estos tipo de actividades emplea referencias bibliográficas y métodos de aprendizaje distintos. Además, para realizar las prácticas es necesario haber estudiado previamente determinados conceptos y, en algunos casos, es recomendable haber resuelto algún ejercicio o problema propuesto. El módulo de presentación de la asignatura expone en primer lugar su interés temático en el marco del plan de estudios y el entorno tecnológico, así como sus objetivos. Esta presentación se complementa con una exposición del temario, su desarrollo temporal, la bibliografía recomendada y una descripción de los métodos de evaluación que se aplicarán. Este módulo se realiza en una sesión presencial (en el laboratorio) de 0.5 h, a la que se asocia un trabajo individual (no presencial) de 0.5 h.

Objetivos específicos

- Conocer a los profesores de la asignatura y los estudiantes que la cursan.
- Conocer los objetivos de la asignatura, sus contenidos básicos y su importancia en la ingeniería electrónica.
- Describir la bibliografía y la forma de utilizarla para las distintas actividades.
- Explicar la organización del curso, con énfasis en las sesiones presenciales y los encargos.
- Describir el método de evaluación.
- Organizar los grupos de prácticas.
- Conocer cómo se desarrollarán las prácticas: sesiones presenciales y no presenciales, trabajo individual y cooperativo.
- Saber qué material y herramientas propias debe aportar cada grupo de prácticas.
- Revisar los aspectos básicos del uso del Campus Digital.

■ Módulo 1: Introducción a los convertidores conmutados de potencia

Presentación

Semana 1, dedicación: 13 horas (8.5 no presenciales, 4.5 presenciales)

Este módulo consta de un tema teórico de introducción a las características propias de los sistemas procesadores de potencia (tema 0.2) seguida de dos sesiones y media de laboratorio presencial (5h) en las que se introducen aspectos de simulación de convertidores conmutados.

El Tema teórico presenta el concepto de procesado de potencia en contraposición al procesado de señal, concepto que permite determinar los elementos circuitales propios de los sistemas procesadores de potencia. Se incide a continuación en los objetivos generales exigibles a estos sistemas, en términos de la adaptación energética fuente-carga, presentando los distintos tipos de conversión y los compromisos asociados a los rangos de frecuencia de conmutación, potencia procesada y dispositivos semiconductores de conmutación disponibles. El tema prosigue presentando el convertidor conmutado DC-DC reductor a modo de ejemplo, con el fin de evidenciar el carácter

periódico en régimen estacionario de las tensiones y corrientes presentes en el circuito, y las consecuencias de dicha periodicidad sobre los balances netos de flujo y carga almacenados. El tema concluye presentando las posibilidades de control de las variables eléctricas tanto a frecuencia fija como variable.

En este primer bloque de prácticas (práctica 1) se utiliza el programa SPICE junto con una librería de subcircuitos desarrollados específicamente para la simulación de convertidores conmutados. Las simulaciones propuestas pretenden: resaltar los principios de funcionamiento de los convertidores (1.1), mostrar el comportamiento de dichos circuitos cuando sus interruptores se implementan mediante semiconductores de potencia (1.2) y comparar los resultados de simulación obtenidos con los distintos modelos escogidos para los interruptores (1.3). El bloque se compone de tres prácticas documentadas en el Manual de Prácticas de Simulación de la asignatura.

La Práctica 1.1, incluida en el módulo 1, presenta en primer lugar el convertidor reductor como la conexión en cascada de una fuente de tensión de entrada, un modulador PWM operando a frecuencia fija y a ciclo de trabajo variable y un filtro LC paso bajo conectado a una carga resistiva de salida. Tras describir el subcircuito que modela el modulador PWM, el primer conjunto de simulaciones propuestas pretende visualizar las formas de onda características del convertidor en lazo abierto, tanto en régimen transitorio (tomando como ejemplo un transitorio de arranque) como en régimen estacionario. A partir de las mismas se pone de manifiesto su periodicidad en régimen estacionario, el rizado de la tensión de salida y la dependencia de la respuesta tanto con el ciclo de trabajo, como con la tensión de entrada y la carga. Estas dependencias permiten introducir de forma natural un nuevo conjunto de simulaciones del convertidor que incorpora un lazo de realimentación para conseguir la regulación de la tensión de salida. La segunda parte de la Práctica 1.1 introduce de forma análoga a la primera un modelo de simulación de un convertidor resonante serie, compuesto por un subcircuito que modela a un modulador PWM de frecuencia variable y ciclo de trabajo constante, el filtro resonante, un rectificador y un filtro paso bajo de salida. El conjunto de simulaciones propuestas visualiza tanto los espectros de las distintas señales como la posibilidad de control de la tensión de salida mediante la variación de la frecuencia de conmutación, evidenciando así su principio de funcionamiento. Finalmente esta práctica concluye incidiendo sobre una de las problemáticas de simulación de convertidores conmutados, asociada al modelado del comparador que interviene en los moduladores PWM, proponiendo la realización de un subcircuito SPICE que facilite su simulación.

Objetivos específicos

- Presentación de las características principales de los sistemas procesadores de potencia.
- Mostrar las formas de onda y los espectros asociados a la operación de los convertidores conmutados tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, mediante simulación circuital SPICE.
- Presentar las diferencias entre los principios de operación de los convertidores convencionales y los convertidores resonantes (*soft-switching*).
- Introducir las peculiaridades de la simulación de convertidores conmutados a través del macromodelado SPICE del modulador PWM.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
<i>Fundamentals of Power Electronics</i> , Erickson / Maksimovic Tema 1	Publicación CPET: <i>Electrónica de potencia:</i> <i>Prácticas de simulación</i> <i>Práctica 1 (parte I)</i> <i>pp. 1 – 8</i> <i>Práctica 1 (parte II)</i> <i>pp. 10 – 13</i>	

■ Módulo 2: Síntesis de topologías de conversión de potencia

Presentación

Semana 2, dedicación: 6 horas (3+3 no presenciales, 0 presenciales)

El módulo 2 aborda los principios básicos de la síntesis de estructuras de conversión de potencia. Se aborda en primer lugar cómo modelar los distintos componentes a efectos de síntesis asociando su comportamiento al de fuentes ideales de tensión o de corriente. En este contexto se razona el carácter de filtrado o de almacenamiento energético de los componentes reactivos de acuerdo con la relación entre las constantes de tiempo del circuito y la frecuencia de conmutación. A continuación, las reglas de conexionado aparecen como las propias de la conexión entre interruptores y fuentes ideales bajo la hipótesis de variación energética no instantánea. Estas reglas se aplican posteriormente a la síntesis de células de conversión que incluyan a lo sumo un elemento reactivo, un conmutador de dos posiciones y que interconecten dos fuentes con terminal común. Como resultado de esta síntesis sistemática se obtienen de forma natural las estructuras de conversión DC-DC elementales reductoras, elevadoras y elevadoras-reductoras. Se analiza seguidamente qué variables eléctricas de las estructuras anteriores tienen un comportamiento discontinuo, para presentar estructuras de conversión de orden superior que evitan dicho comportamiento mediante la incorporación de elementos reactivos de filtrado. Finalmente, el tema concluye presentando una metodología que permite implementar los interruptores ideales de las distintas células de conversión mediante dispositivos semiconductores, a partir de su característica estática corriente-tensión.

Objetivos específicos

- Presentación de una metodología de síntesis para convertidores conmutados.
- Obtención de las topologías elementales de conversión continua-continua

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
<i>Fundamentals of Power Electronics</i> , Erickson / Maksimovic Tema 6 (6.1 / 6.2) Tema 4 (4.1)		Publicación CPET: <i>Problemas resueltos</i> <i>Problemas : 1,2, 8</i>

■ Módulo 3: Análisis en régimen estacionario del convertidor

Presentación

Semana 3, dedicación: 12 horas (6+6 no presenciales, 0 presenciales)

El módulo 3 corresponde al análisis en régimen estacionario de convertidores conmutados DC-DC, particularizándolo al caso de un convertidor elevador que incorpora un conmutador de dos posiciones unidireccional en corriente. Se destaca en la introducción la importancia de este tema dado que permite un primer dimensionado de los componentes del convertidor, a partir de las especificaciones en régimen estacionario de su régimen nominal de operación.

Definiendo en primer lugar el modo de conducción continua como aquél en el cual no se anula la corriente del conmutador, la aplicación de las condiciones de balance nulo de flujo y carga en un periodo de conmutación permite deducir mediante un análisis geométrico convencional las formas de onda más significativas, la relación de conversión en tensión, las expresiones de los valores medios

de las corrientes de entrada y de salida en función de la corriente del inductor, y la influencia de la resistencia de carga en dichas variables. Por otra parte, el disponer de las formas de onda anteriores permite deducir las expresiones de los rizados de las variables de interés en función de los parámetros del convertidor, y analizar su influencia en el diseño.

A continuación, se define el modo de conducción discontinua como aquél en el cual la corriente del conmutador se anula durante un cierto intervalo temporal, estableciéndose analíticamente la condición frontera de cambio de modo en función de los valores de la resistencia de carga, la frecuencia de conmutación y la inductancia. El análisis en el modo de conducción discontinua aborda los mismos apartados tratados en el modo de conducción continua, y hace especial hincapié en la dependencia de la relación de conversión entrada-salida con los valores de la resistencia de carga, la frecuencia de conmutación y la inductancia.

Tras analizar las ventajas e inconvenientes del modo de conducción discontinua, y para aquellas aplicaciones en las que quiere evitarse, se introducen los convertidores de flujo energético bidireccional basados en una realización del conmutador para corrientes bidireccional. Esto permite, a su vez, exponer una tipología comparativa de posibles realizaciones de interruptores en base a su capacidad de operar tanto con tensiones de bloqueo bipolares como corrientes de conducción bidireccionales.

El tema concluye presentando los distintos orígenes de las pérdidas en los convertidores según sean atribuibles a los conmutadores (pérdidas de conmutación y de conducción) o a los elementos reactivos. Finalmente se evalúa la dificultad de incorporar estas pérdidas en el análisis en régimen estacionario anterior.

Objetivos específicos

- Presentación del procedimiento de análisis clásico/geométrico del comportamiento en régimen estacionario de los convertidores conmutados.
- Reconocimiento de las formas de onda significativas de la operación de los convertidores en modo de conducción continua.
- Deducción de las relaciones analíticas entre las variables eléctricas de interés y las especificaciones de diseño.
- Presentación del modo de conducción discontinua y la condición de cambio de modo.
- Aplicación del estudio anterior al diseño de convertidores en régimen estacionario.
- Presentación de los convertidores bidireccionales.
- Delimitación de la utilidad de las técnicas de análisis clásico para el caso en que se consideren pérdidas en el convertidor.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
<i>Fundamentals of Power Electronics</i> , Erickson / Maksimovic Tema 2 Tema 5		Publicación CPET: <i>Problemas resueltos</i> <i>Problemas : 3, 4, 5, 6, 7</i>

■ Módulo 4: El transistor MOSFET de potencia

Presentación

Semana 3, dedicación: 12 horas (6 no presenciales, 6 presenciales)

El módulo 4 corresponde a la Práctica 1.2, que se destina a estudiar circuitos conmutados que incorporen como interruptor un transistor MOSFET de potencia comercial, cuyo modelo circuital esté disponible en las librerías estándar de SPICE. Por una parte las simulaciones de las características estáticas de salida del MOSFET permiten identificar las zonas óhmica y de corte como las zonas de operación deseadas, mientras que las de entrada identifican la tensión umbral necesaria para la conducción. Por su parte las simulaciones dinámicas correspondientes a las conmutaciones ON/OFF y OFF/ON del MOSFET en un circuito con carga resistiva permiten poner de manifiesto el efecto de la capacidad de Miller (drenador-puerta), los retardos al corte y a la plena conducción, así como las pérdidas de conmutación y de conducción del transistor. El siguiente conjunto de simulaciones visualiza las sobretensiones que aparecen en un circuito con carga inductiva y un interruptor MOSFET, como es el caso de convertidores conmutados, así como la trayectoria en el plano (ID,VDS) para comprobar si el MOSFET permanece dentro de su área de funcionamiento seguro. Estas simulaciones se comparan con las siguientes que corresponden al mismo circuito, modificado al añadir una red limitadora de tensión. Finalmente, la práctica concluye con un conjunto de simulaciones comparativas que visualizan los distintos efectos de los circuitos auxiliares de excitación y de ayuda a la conmutación (Drivers y Snubbers).

Objetivos específicos

- Simular circuitos que pongan de manifiesto las características estáticas y dinámicas de los transistores MOSFET de potencia.
- Presentar los circuitos auxiliares de ayuda a la conmutación.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
	Publicación CPET: <i>Electrónica de potencia: Prácticas de simulación</i> <i>Práctica 2 pp. 14 – 26</i>	

■ Módulo 5: Modelado y simulación dinámica del convertidor

Presentación

Semana 6, dedicación: 20 horas (6+6+4 no presenciales, 4 presenciales)

El objetivo principal del módulo 5 es el estudio del comportamiento dinámico del convertidor, para poder diseñar un lazo de realimentación que permita la realización de un regulador de tensión. Se presenta en primer lugar la evolución de las formas de onda en el caso de un transitorio de arranque para poner de manifiesto tanto la pérdida de periodicidad como la naturaleza de sistema no lineal de tiempo discreto. Se justifica la imposibilidad de una linealización de este comportamiento atendiendo al carácter discontinuo de las derivadas de las variables en los instantes de conmutación, presentándose los modelos promediados como modelos de baja frecuencia linealizables que permiten la aplicación posterior de herramientas de análisis de sistemas lineales. Se definen a

continuación las variables de entrada consideradas perturbaciones no deseadas (perturbaciones de tensión de entrada y de carga), así como la variable de control (el ciclo de trabajo) que permitirá corregir la influencia de las anteriores sobre la variable de salida de interés (la tensión de salida).

Se presenta por una parte el método del circuito equivalente promediado, en el cual se sustituye el conmutador por un modelo circuital de fuentes controladas que permite explicitar el ciclo de trabajo como variable de control, y posteriormente se aproxima el comportamiento instantáneo de todas las variables por su comportamiento promediado en el periodo de conmutación. El análisis de este circuito equivalente permite obtener los valores medios de las variables de interés en régimen estacionario, así como el comportamiento de estas variables ante variaciones tanto de la tensión de entrada como de la variable de control. El carácter continuo de estas variables promediadas permite linealizar el circuito, obteniendo así un modelo dinámico de pequeña señal. Este último modelo permite deducir finalmente las funciones de transferencia tensión de entrada-tensión de salida y ciclo de trabajo-tensión de salida, a partir de las cuales puede abordarse el diseño del lazo de realimentación mediante técnicas lineales convencionales.

Como aproximación más sistemática al mismo problema, se introduce el método de promediación temporal en el espacio de estado. Este segundo método, de base matricial, permite obtener las mismas funciones de transferencia que el método circuital mediante la descripción de la dinámica del convertidor en el espacio de estado. Ambos métodos se aplican a modo de ejemplo a un convertidor elevador que incluye las resistencias de pérdidas tanto del inductor como del condensador, lo que permite evidenciar su influencia tanto en las relaciones de régimen estacionario como en las distintas funciones de red (entrada-salida, control-salida, admitancia de entrada,...) que caracterizan su comportamiento dinámico. La última parte de este tema aborda el diseño del lazo de realimentación de un regulador conmutado. Se presentan en primer lugar los elementos que componen el lazo de realimentación de la tensión de salida (amplificador de error y red de compensación, modulador PWM), y se deducen sus correspondientes modelos lineales, lo que permite describir a efectos dinámicos el conjunto convertidor-lazo de control como un diagrama de bloques de un sistema lineal realimentado de un solo lazo. Este diagrama de bloques permite obtener a su vez las expresiones de la ganancia de lazo y las funciones de transferencia en lazo cerrado en las que se explicita la influencia de cada uno de los parámetros del regulador. Finalmente se presenta un ejemplo de diseño completo de un regulador conmutado reductor a partir de un conjunto de especificaciones tanto estáticas (relación de conversión en tensión, carga, rizado de la tensión de salida) como dinámicas (regulaciones de línea y carga, márgenes de estabilidad y ancho de banda), utilizando técnicas convencionales de sistemas realimentados lineales.

La parte práctica incluida en el módulo, correspondiente a las simulaciones de la Práctica 1.3, está destinada a comparar en una primera fase tanto las formas de onda características del convertidor como los tiempos de simulación invertidos para distintos modelos de simulación de los interruptores. Se simula un convertidor reductor-elevador (Buck-Boost) con condiciones iniciales nulas (situación correspondiente a un arranque) operando a frecuencia y ciclo de trabajo constantes. Se comparan los tiempos de simulación y las formas de onda de las variables de estado cuando el conmutador se implementa sucesivamente con un MOSFET y un diodo de potencia comerciales disponibles en la librería SPICE, con un subcircuito que implementa un conmutador de dos posiciones ideal, y con el modelo del conmutador de fuentes controladas por una señal rectangular: estas simulaciones ponen de manifiesto tanto los rizados de las variables de estado y las discontinuidades de sus derivadas, como la influencia de las pérdidas de conducción del MOSFET y del diodo en el valor medio de la tensión de salida. En el último conjunto de simulaciones de esta primera fase se sustituye la señal rectangular de control del modelo de fuentes controladas del conmutador por su versión promediada, evidenciando por una parte una notable reducción del tiempo de simulación y por otra la obtención de las formas de onda de interés anteriores sin rizado, que corresponden a una versión promediada (es decir de baja frecuencia) de las mismas. La ausencia de discontinuidades de derivada en las variables de estado de este circuito permite obtener la simulación de la respuesta en frecuencia de las funciones de transferencia del convertidor para distintos ciclos de trabajo, poniendo de manifiesto su naturaleza no lineal. Finalmente se comparan los resultados obtenidos para el mismo convertidor realimentado con un control Proporcional Integral (PI) según se utilice un modelo del conmutador de variables instantáneas o promediadas, resaltando la utilidad de este último en la fase de diseño de un regulador conmutado.

Objetivos específicos

- Reconocer la naturaleza no lineal y de tiempo discreto de los convertidores conmutados.
- Poner de manifiesto la utilidad de los modelos continuos promediados para este tipo de sistemas.
- Presentar el método de modelado del circuito equivalente promediado como método de promediación de base circuital.
- Presentar el método matricial de la promediación en el espacio de estado, como método de modelado sistemático y general.
- Deducir las funciones de transferencia descriptivas del comportamiento dinámico en pequeña señal.
- Aplicar los modelos dinámicos lineales al diseño del lazo de realimentación de un regulador conmutado.
- Utilizar los diferentes modelos de simulación para convertidores conmutados y comparar sus características.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
<i>Fundamentals of Power Electronics</i> , Erickson / Maksimovic Tema 7 (7.1 / 7.2/ 7.3/ 7.4/ 7.5 / 7.6) Tema 8 (8.2) Tema 9 (9.1 / 9.2 / 9.3 / 9.4 / 9.5)	Publicación CPET: <i>Electrónica de potencia: Prácticas de simulación</i> <i>Práctica 3</i> <i>pp. 30 – 38</i>	Publicación CPET: <i>Problemas resueltos</i> <i>Problemas : 15, 16</i>

■ Módulo 6: Circuitos experimentales de conversión conmutada

Presentación

Semana 9, dedicación: 14 horas (7 no presenciales, 7 presenciales)

El módulo 6, correspondiente al segundo bloque de prácticas, se destina a la realización de medidas experimentales de las características de un regulador conmutado tensión-tensión. Para ello se procede de forma gradual, proponiendo las caracterizaciones experimentales sucesivas de un C.I. modulador PWM como componente básico del lazo de realimentación, del convertidor conmutado en lazo abierto, y finalmente del regulador tensión-tensión. Las medidas propuestas se realizan sobre dos prototipos de laboratorio (circuito PWM, y circuito convertidor/regulador) diseñados para este Bloque de prácticas, que incluyen elementos adicionales (resistencias de sensado de corriente, interruptores de conexión/desconexión de componentes, bornes de acceso, etc...) destinados a facilitar el ajuste y la realización de las medidas. El bloque se compone de tres prácticas documentadas en el Manual Análisis de un regulador Conmutado Basado en un Convertidor Reductor de la asignatura.

La Práctica 2.1 está dedicada al estudio de las características del circuito integrado comercial de control PWM SG3524 de Texas Instruments/Unitrode. Las medidas propuestas están destinadas a

corroborar su comportamiento como modulador de anchura de pulsos, verificando en particular sus márgenes de operación para compararlos con las características proporcionadas por el fabricante. Asimismo se comprueba la operación de protecciones (limitación de corriente) y funciones adicionales (shut-down) del C.I., y se visualizan las formas de onda PWM de salida para distintas señales moduladoras (senoidal, triangular, cuadrada).

La Práctica 2.2, cuyo estudio previo (el de mayor extensión del curso) requiere la aplicación de las técnicas de análisis descritas en el tema 3, consiste en la verificación experimental del funcionamiento de un convertidor conmutado reductor en régimen estacionario. Tras ajustar la frecuencia de conmutación y el ciclo de trabajo a los valores nominales, se visualizan las formas de onda de distintas tensiones características (tensión de puerta de MOSFET, tensión en bornes del diodo, tensión de alimentación del driver, etc...) y en particular la forma de onda de la tensión de salida para medir su rizado al ser éste un parámetro típico de diseño. Se miden a continuación las características de transferencia estáticas del convertidor (relación salida/entrada en función del ciclo de trabajo) y se comparan con las teóricas con el fin de evidenciar el efecto de las pérdidas. El siguiente conjunto de medidas pone de manifiesto los efectos de la conmutación en las tensiones de alimentación de los C.I. y los efectos beneficiosos del desacoplo de las mismas, así como la influencia de las impedancias de aislamiento de los instrumentos en caso de medidas no flotantes. Asimismo se visualizan las formas de onda de las corrientes en la entrada, en el diodo y en el inductor poniéndose de manifiesto en esta última el modo de conducción discontinua al incrementar la resistencia de carga y/o decrementar la frecuencia de conmutación.

La Práctica 2.3 es la última de este segundo bloque y se dedica a las medidas de las características del convertidor en lazo cerrado que incorpora una compensación por polo dominante. Se miden sucesivamente las regulaciones de carga y línea, el rizado y el ruido de conmutación presentes en la tensión de salida regulada, así como el rendimiento energético del regulador.

Objetivos específicos

- Conocer un circuito integrado de control de convertidores conmutados comercial y representativo de este tipo de circuitos.
- Presentar los componentes que forman un regulador conmutado, y mostrar su implementación completa a través de un prototipo específico.
- Caracterizar experimentalmente el comportamiento del regulador y evidenciar las no idealidades introducidas por la implementación.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
	Publicaciones CPET: <i>El modulador de anchura de pulsos</i> <i>Electrónica de potencia: Análisis de un regulador conmutado basado en un convertidor reductor</i>	

■ Módulo 7: Diseño de componentes magnéticos

Presentación

Semana 9, dedicación: 12 horas (6+6 no presenciales, 0 presenciales)

El módulo 7 coincide con el tema 4, que está dedicado al diseño de los componentes magnéticos que forman parte de un convertidor conmutado, aspecto que tiene una alta incidencia en las prestaciones finales del mismo. Esta alta incidencia es la que permite poner de relieve que el diseño del convertidor conmutado siempre requiere de una fase de diseño propia de sus componentes magnéticos, fase que necesita a su vez de un modelado previo de los mismos.

La fase de modelado es la que se aborda en la primera parte del tema recordando en primer lugar las magnitudes, leyes y unidades relacionadas con el campo magnético. Se exponen a continuación las características más relevantes de los materiales magnéticos (ferromagnéticos) de los núcleos con los que se implementan en general los componentes magnéticos (inductores y/o transformadores), describiendo la propiedad de magnetización y el correspondiente aumento de densidad de flujo, así como el fenómeno de saturación del material. Se describe asimismo el fenómeno de histéresis y se presentan las curvas características de distintos tipos de materiales ferromagnéticos (de característica cuadrada o lineal).

Seguidamente, y con objeto de modelar el comportamiento de los componentes magnéticos mediante elementos de circuito, se recuerda cómo se modela el comportamiento de un circuito eléctrico mediante la definición del parámetro resistencia que caracteriza a un conductor de alta conductividad que confina las líneas de campo eléctrico y es atravesado por una distribución uniforme de corriente. El estudio de un circuito magnético constituido por un núcleo de alta permeabilidad magnética y de geometría toroidal que confina todas las líneas de campo magnético en un flujo uniforme, permite evidenciar la analogía entre variables eléctricas y magnéticas (corriente/flujo, fuerza electromotriz/fuerza magnetomotriz) y modelar el comportamiento del núcleo mediante el parámetro reluctancia de forma análoga al parámetro resistencia. Asimismo la analogía entre variables permite presentar un modelo circuital equivalente del componente magnético.

Definido el inductor como componente de circuito caracterizado por el parámetro inductancia, el estudio anterior permite expresarlo en función de la geometría y características magnéticas del núcleo, así como del número de vueltas del arrollamiento. Finalmente, se estudia cómo afecta la inclusión de entrehierros en núcleos magnéticos a su reluctancia, lo que junto al incremento del número de vueltas del arrollamiento se utiliza para aumentar el nivel de corriente de saturación manteniendo el valor de la inductancia.

Las bases anteriores permiten abordar el diseño de inductores en convertidores conmutados partiendo de un valor de inductancia deseado que satisfaga determinados requerimientos de diseño en régimen estacionario (valor medio y rizado de la corriente en el inductor) y/o en régimen dinámico (ancho de banda, estabilidad, respuesta transitoria). A partir de un núcleo disponible, se establecen a continuación los compromisos de diseño del inductor en términos de la longitud del entrehierro y el número de vueltas para garantizar tanto que el núcleo no se sature como que el número de vueltas quepa en su ventana. Finalmente, se presentan dos caminos de diseño alternativos (diseño mediante el producto de áreas o mediante el parámetro geométrico KG) conducentes a obtener el valor deseado de la inductancia, según se fijen de partida otros datos auxiliares de diseño (densidad de corriente/sección del hilo o pérdidas por conducción en el arrollamiento).

Aprovechando todo el contenido anterior, el tema concluye presentando de forma natural el estudio y el diseño de transformadores incluidos en los convertidores. En la hipótesis de un transformador real con acoplamiento perfecto, el modelo circuital equivalente mediante reluctancias permite introducir el concepto de corriente de magnetización, deduciéndose las relaciones de conversión tensión/corriente del transformador. Posteriormente se trata cómo modelar el acoplamiento no perfecto mediante las inductancias de fugas y por extensión se presenta un modelo completo de parámetros concentrados de transformador real con acoplamiento no perfecto que incluye las pérdidas disipativas tanto en los arrollamientos como en el núcleo. El tema concluye con el diseño del transformador mediante un desarrollo idéntico al expuesto en el caso del inductor.

Objetivos específicos

- Introducir los fundamentos de diseño de inductores y transformadores en convertidores conmutados DC-DC.
- Revisar las propiedades de los materiales utilizados como núcleos magnéticos y la inclusión de entrehierros en los mismos.
- Proporcionar un modelo circuital equivalente de los componentes magnéticos.
- Presentar varios procedimientos de diseño de inductores y transformadores.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
<i>Fundamentals of Power Electronics</i> , Erickson / Maksimovic Tema 13 (13.1 / 13.2 / 12.3 / 13.5) Tema 14 (14.1 / 14.2) Artículo ...		Publicación CPET: <i>Problemas resueltos</i> <i>Problemas : 13, 17, 18</i>

■ Módulo 8: Convertidores con aislamiento galvánico

Presentación

Semana 12, dedicación: 6 horas (3+3 no presenciales, 0 presenciales)

El módulo 8, asociado al tema 5, aborda el estudio de los convertidores conmutados que incorporan un transformador en su topología. La introducción pone de manifiesto el interés de estas topologías presentando algunas de sus ventajas y aplicaciones como, por ejemplo, la conexión directa del convertidor a la red, que requiere explícitamente un aislamiento galvánico, aplicaciones en las cuales se requiera una relación de conversión elevada, o aplicaciones de múltiples salidas con o sin inversión de polaridad. Asimismo se presentan las desventajas asociadas a la presencia del transformador como son el incremento de tamaño, coste y peso del convertidor, así como los efectos de las inductancias de fugas y las pérdidas adicionales.

Las distintas opciones circuitales que garantizan la operación del transformador con balance nulo de flujo en un periodo de conmutación, permiten introducir a continuación la síntesis de los convertidores Flyback, Cuk con aislamiento y los convertidores en puente completo y medio puente como las topologías de conversión con transformador más representativas. En contraposición, se presenta el convertidor Forward como ejemplo de operación del transformador con balance de flujo no nulo, evidenciando la necesidad de una red de desmagnetización para evitar la saturación del transformador .

El tema concluye con el análisis del convertidor Flyback con un transformador real con acoplamiento perfecto como ejemplo, comparando sus características estáticas y dinámicas con las de un convertidor reductor-elevador, y finalmente se describen los efectos de las inductancias de fugas al sustituir el transformador por su modelo real con acoplamiento no perfecto.

Objetivos específicos

- Presentar las ventajas e inconvenientes de los convertidores con transformador.
- Introducir las principales estructuras de conversión que incluyen aislamiento galvánico.

- Analizar la influencia de la relación de conversión del transformador en el dimensionado de los componentes del convertidor.
- Evaluar los efectos de las no idealidades del transformador en el comportamiento del convertidor.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
<i>Fundamentals of Power Electronics</i> , Erickson / Maksimovic Tema 6 (6.3)		Publicación CPET: <i>Problemas resueltos</i> <i>Problemas : 9, 10, 11, 12, 14, 19</i>

■ Módulo 9: Diseño completo de un regulador conmutado

Presentación

Semana 12, dedicación: 12 horas (6 no presenciales, 6 presenciales)

El objetivo de la última práctica de la asignatura es la aplicación de todos los conocimientos obtenidos tanto en los temas de teoría como de laboratorio al diseño completo de un regulador conmutado de tensión, al montaje del prototipo correspondiente y a la verificación experimental de sus características. Los datos de diseño prefijados son:

- Regulador de tensión elevador de 12 V a 24 V.
- Potencia 12 W
- Regulación de línea del 20%
- Rizado relativo de la tensión de salida del 5%
- Ancho de banda mayor que 100 Hz
- Datos de diseño del inductor: Núcleo en EE/20/20/5 3C8, hilo de cobre esmaltado de diámetro 0,8 mm

Basándose en los componentes tanto del convertidor como del lazo de control vistos en la práctica 2, se pretende determinar, a partir de los datos de diseño anteriores los valores de la frecuencia de conmutación, del ciclo de trabajo, del inductor y del condensador de salida, así como los valores de todos los componentes del lazo de realimentación. La adecuación de la realización experimental al diseño propuesto se comprueba en el laboratorio verificando el arranque del convertidor, midiendo tanto la regulación de línea como el rizado de la tensión de salida y el ancho de banda del regulador.

Objetivos específicos

- Diseño, realización y caracterización experimental de un regulador de tensión conmutado integrando los conocimientos de las clases de teoría y de las sesiones anteriores de prácticas.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
	Publicaciones Campus Digital: <i>Especificaciones de la práctica de diseño</i>	

■ Módulo 10: Control avanzado de convertidores. Técnicas de control de corriente.

Presentación

Semana 14, dedicación: 4 horas (2+2 no presenciales, 0 presenciales)

El Tema 6 aborda el estudio del control de corriente en convertidores conmutados, estudio que se justifica tanto por las prestaciones adicionales que confiere este tipo de control a la regulación de tensión, como por su necesidad de uso en otras aplicaciones tales como la corrección del factor de potencia.

Partiendo de una perspectiva histórica, el tema introduce el control de corriente en el contexto de la regulación de tensión, sustituyendo la rampa del modulador PWM por una versión escalada de la corriente en el inductor. Se remarca que esta sustitución equivale a introducir un lazo de realimentación interno de corriente que permite el control del nivel máximo de corriente mediante la comparación con una tensión externa. La ecuación de control que describe esta comparación permite modelar el inductor como una fuente de corriente controlada por tensión. Esta primera parte concluye presentando un regulador multilazo que añade al lazo interno de corriente un lazo externo de control de la tensión de salida.

En base a lo expuesto, el tema prosigue destacando tanto las ventajas de este tipo de control como son, entre otras, la posibilidad de control del nivel máximo de la corriente de salida, la capacidad de conexión de convertidores en paralelo, así como las desventajas derivadas del sensado de corriente.

El comportamiento dinámico del lazo de control de corriente máxima merece un tratamiento diferenciado y se presenta a continuación, poniendo de manifiesto su inestabilidad intrínseca para ciclos de trabajo mayores que 0.5 mediante un análisis geométrico, y cómo remediar dicha inestabilidad añadiendo una rampa periódica de compensación.

El tema prosigue derivando de forma sistemática, al igual que en el Tema 3, las distintas funciones de transferencia características del convertidor con lazo de control de corriente, en las que se pone de relieve la reducción de orden y, por tanto, la simplificación del diseño del lazo externo de tensión.

Tras presentar otros tipos de control de corriente (control de corriente mínima, control de corriente media, control por ciclo de histéresis), el tema concluye presentando aplicaciones del control de corriente en convertidores conmutados alternativas a la regulación de tensión, como la concepción de fuentes de corriente de alto rendimiento, el diseño de correctores de factor de potencia y aplicaciones vinculadas a la interconexión de generadores de tensión como por ejemplo interconexión entre baterías.

Objetivos específicos

- Ampliar el conocimiento de métodos de control de convertidores conmutados, presentando las técnicas de modelado, análisis y síntesis de reguladores conmutados de tensión con lazo de realimentación de corriente.
- Reconocer la inestabilidad intrínseca del control de corriente y proponer métodos para su compensación.
- Presentar otras aplicaciones significativas del control de corriente, como por ejemplo la corrección del factor de potencia.

Plan de trabajo

Material referencia bibliográfica	Manual de prácticas	Problemas
<i>Fundamentals of Power Electronics</i> , Erickson / Maksimovic Tema 12 (12.1 / 12.2)		