

1. INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CA/CC

1.1. Introducción

Un convertidor ca/cc transforma corriente alterna en corriente continua. El término continua hace referencia a que la corriente fluye en un único sentido, no a que la salida resultante contenga una única componente. Al contrario, un convertidor ca/cc produce una onda de salida con un número considerable de componentes armónicas que se requiere eliminar. Para eliminar este rizado de la salida se emplea un filtro paso-bajo al final de la etapa rectificadora.

Generalmente, los convertidores ca/cc transfieren el flujo de potencia del lado de alterna al lado de continua (flujo de potencia positivo) y reciben el nombre de **rectificadores**. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, pueden proporcionar el flujo de potencia desde el lado de continua al lado de alterna (flujo de potencia negativo), recibiendo entonces el nombre de **inversores**. Como la intensidad de salida siempre fluye en un único sentido, el funcionamiento como rectificador o como inversor vendrá dado por el signo del valor medio de la tensión de salida.

La figura 1.1 muestra la clasificación general de los convertidores ca/cc:

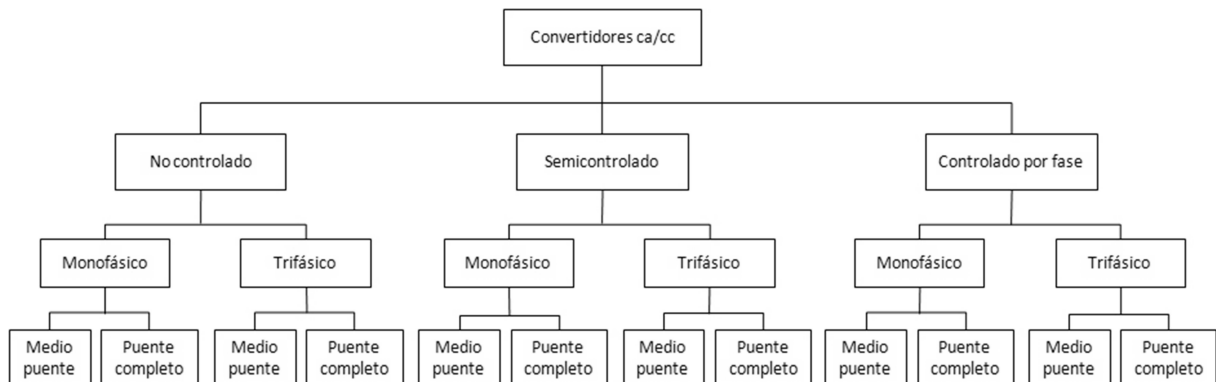


Figura 1.1. Clasificación de los convertidores ca/cc.

La Tabla 1.1 refleja, a modo de resumen, las características generales de los convertidores ca/cc:

Convertidor ca/cc	Semiconductor	Tensión media de salida	Funcionamiento
No controlados	Diodos	Mayor que cero. Valor constante	Rectificador
Semicontrolados	Diodos y tiristores	Mayor o igual a cero. Regulable con α	Rectificador
Controlados por fase	Tiristores	Mayor, menor o igual a cero. Regulable con α	Rectificador/ Inversor ¹

Tensión de entrada y configuración del convertidor	
Monofásicos	La tensión alterna de entrada es monofásica, de una sola fase
<i>Medio puente</i>	<i>Rectifica el semiciclo positivo de la tensión de entrada</i>
<i>Puente completo</i>	<i>Rectifica el semiciclo positivo y negativo de la tensión de entrada</i>
Trifásicos	La tensión alterna de entrada es trifásica, de tres fases
<i>Medio puente</i>	<i>La tensión de salida contiene 3 pulsos: trozos de las tensiones de fase</i>
<i>Puente completo</i>	<i>La tensión de salida contiene 6 pulsos: trozos de las tensiones de línea-línea</i>

Tabla 1.1. Características generales de los convertidores ca/cc.

1.2. Desarrollo en series de Fourier

Los circuitos electrónicos de potencia poseen normalmente tensiones y/o corrientes periódicas, pero no sinusoidales. Las series de Fourier permiten expresar una forma de onda periódica no sinusoidal como suma de una serie de sinusoidales. Sea, por ejemplo, $f(t)$ una función periódica no sinusoidal. Su desarrollo en series de Fourier viene dado por:

$$f(t) = F_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \operatorname{sen}(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \operatorname{cos}(n\omega t)$$

donde F_o es el valor medio de $f(t)$ y representa la tensión o la corriente media, y:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \operatorname{sen}(n\omega t) d(\omega t) \quad \text{y} \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \operatorname{cos}(n\omega t) d(\omega t)$$

¹ El funcionamiento como inversor sólo es posible, bajo ciertas condiciones, en los monofásicos de puente completo y en los trifásicos de medio puente y puente completo.

Los senos y cosenos de la misma frecuencia pueden agruparse en una misma función, dando como resultado:

$$f(t) = F_o + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t + \theta_n)$$

donde:

$$c_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)} \quad y \quad \theta_n = \arctg\left(\frac{-a_n}{b_n}\right)$$

1.3. Convertidores ca/cc: parámetros característicos

Son varios los parámetros que caracterizan a los convertidores ca/cc. La tabla 1.2 muestra los más importantes.

Parámetro	Definición
Ángulo de disparo α	Ángulo eléctrico ² en el que se produce el disparo de un tiristor medido a partir del momento en que éste se encuentra directamente polarizado. Por tanto, $\alpha = 0^\circ$ indicaría funcionamiento como diodo.
Ángulo de extinción β	Ángulo eléctrico en que se extingue la circulación de intensidad por la carga. Se mide como α , es decir, a partir del momento en que el semiconductor se encuentra directamente polarizado.
Ángulo de conducción γ	Ángulo eléctrico que conduce un semiconductor determinado. En el caso de un tiristor: $\gamma = \beta - \alpha$.
Ángulo de conmutación u	Ángulo eléctrico en el que conducen simultáneamente los semiconductores que se están apagando y los que entran en conducción. Esto es debido a que, en la práctica, la conmutación de los semiconductores no es inmediata.
Valor medio de la tensión de salida o en la carga V_o	$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt$ <p>Para corrientes periódicas, la tensión media en una bobina es cero.</p>

² Ángulo eléctrico = $\omega t = 2\pi f t$, siendo f la frecuencia de la tensión de red expresada en Hz.

Valor eficaz de la tensión V (V_{rms}, V_{ef})	$V = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$
Valor máximo o de pico de la tensión $V_{m\acute{a}x}$	<p>Si V (V_{rms}) es el valor eficaz de la tensión de entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $V_{m\acute{a}x}$ de la tensión de fase: $V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2}V$ • $V_{m\acute{a}x}$ de la tensión de línea-línea: $V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2}\sqrt{3}V$
Valor medio de la intensidad de salida o en la carga I_o	$I_o = \frac{1}{T} \int_0^T i_o(t) dt$ <p>Para tensiones periódicas, la intensidad media en un condensador es cero.</p>
Valor eficaz de la intensidad I (I_{rms})	$I = I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$
Ángulo de desplazamiento φ	Ángulo de desfase entre las ondas de tensión y corriente a frecuencia fundamental.
Factor de desplazamiento $\cos \varphi$	Coseno del ángulo de desplazamiento.
Potencia instantánea $p(t)$	$p(t) = v(t)i(t)$
<ul style="list-style-type: none"> • Si $p(t) > 0$ • Si $p(t) < 0$ 	<p>El dispositivo absorbe potencia.</p> <p>El dispositivo entrega potencia</p>
Potencia media P	$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(t)i(t) dt$
<ul style="list-style-type: none"> • Para tensiones e intensidades sinusoidales: $\begin{cases} v(t) = V_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \theta) \\ i(t) = I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \vartheta) \end{cases}$ • Para tensiones e intensidades periódicas no sinusoidales: 	$P = \left(\frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x}}{2} \right) \cos(\theta - \vartheta)$ $P = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta - \vartheta)$ $P = V_o I_o + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{m\acute{a}x,n} I_{m\acute{a}x,n}}{2} \right) \cos(\theta_n - \vartheta_n)$ $P = V_o I_o + \sum_{n=1}^{\infty} I_{rms,n} V_{rms,n} \cos(\theta_n - \vartheta_n)$

- Para tensiones sinusoidales e intensidades periódicas no sinusoidales:

$$\left\{ \begin{array}{l} v(t) = V_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \theta) \\ i(t) = I_o + \sum_{n=1}^{\infty} I_{m\acute{a}x,n} \text{cos}(n\omega t + \vartheta_n) \end{array} \right\}$$

$$P = \left(\frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x,1}}{2} \right) \text{cos}(\theta - \vartheta_1)$$

$$P = V_{rms} I_{rms,1} \text{cos}(\theta - \vartheta_1)$$

Potencia aparente S

$$S = V_{rms} I_{rms}$$

Factor de potencia f_p

$$f_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}}$$

Relación entre f_p y $\text{cos } \varphi$

- Para tensiones e intensidades sinusoidales:

$$\left\{ \begin{array}{l} v(t) = V_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \theta) \\ i(t) = I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \vartheta) \end{array} \right\}$$

$$f_p = \text{cos } \varphi = \text{cos}(\theta - \vartheta)$$

- Para tensiones sinusoidales e intensidades periódicas no sinusoidales:

$$\left\{ \begin{array}{l} v(t) = V_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \theta) \\ i(t) = I_o + \sum_{n=1}^{\infty} I_{m\acute{a}x,n} \text{cos}(n\omega t + \vartheta_n) \end{array} \right\}$$

$$f_p = \frac{I_{rms,1}}{I_{rms}} \text{cos } \varphi = \frac{I_{rms,1}}{I_{rms}} \text{cos}(\theta - \vartheta_1)$$

siendo:

$$I_{rms} = \sqrt{I_o^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_{m\acute{a}x,n}}{\sqrt{2}} \right)^2}$$

Distorsión armónica total THD

Cuantifica la propiedad no sinusoidal de una forma de onda. Es la relación entre el valor eficaz de todos los términos correspondientes a las frecuencias distintas de la fundamental y el valor eficaz correspondiente a la frecuencia fundamental.

$$THD = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{rms,1}^2}{I_{rms,1}^2}}$$

Tabla 1.2. Características generales de los convertidores ca/cc.

INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CA/CC

Ejercicios de autoevaluación

Señalar la única respuesta correcta a las preguntas. Razonar dicha elección.

1) En un convertidor ca/cc funcionando como rectificador, la potencia eléctrica fluye:

- a) Del lado de alterna al lado de continua.
- b) Del lado de continua al lado de alterna.
- c) Del lado de alterna al lado de alterna.
- d) No existe flujo de potencia.

2) Los rectificadores no controlados emplean como semiconductores:

- a) Tiristores.
- b) Diodos.
- c) Diodos y transistores.
- d) Diodos y tiristores.

3) Un convertidor ca/cc semicontrolado permite regular la tensión media de salida:

- a) En magnitud, no en polaridad.
- b) En magnitud y polaridad.
- c) En polaridad, no en magnitud.
- d) No permite regular el valor medio de la tensión de salida.

4) Un convertidor controlado por fase monofásico de medio puente:

- a) Siempre funciona como rectificador.
- b) Bajo ciertas condiciones, permite su funcionamiento como inversor.
- c) Siempre funciona como inversor.
- d) Para contestar debemos conocer el ángulo de disparo α .

5) En un convertidor ca/cc monofásico de puente completo, la tensión media de salida:

- a) Es la misma que en la de medio puente.
- b) Es la mitad que en uno de medio puente.
- c) Es el doble que en uno de medio puente.
- d) Es la cuarta parte que en uno de medio puente.

6) Un convertidor no controlado trifásico de puente completo alimentando una carga RL :

- a) El valor de la tensión media de salida es el mismo que para carga R .
- b) La tensión media de salida aumentará al aumentar el valor de R , dejando constante L .

- c) El valor de la tensión media de salida aumenta con el valor de L , dejando R constante.
- d) La tensión media de salida disminuirá al disminuir el valor de R , dejando constante L .

7) El funcionamiento como inversor de un convertidor controlado por fase trifásico de puente completo viene impuesto por:

- a) El signo de la tensión media de salida.
- b) El signo de la intensidad media de salida.
- c) El valor de la resistencia de la carga.
- d) Ninguna de las anteriores.

8) La tensión de salida de un convertidor ca/cc trifásico controlado por fase en puente completo está formada por:

- a) Trozos de las tensiones de fase.
- b) Trozos de las tensiones de línea-línea.
- c) Trozos de intensidades por la fuente.
- d) Ninguna de las anteriores.

9) Para un funcionamiento periódico en régimen permanente, la potencia media absorbida por una bobina es:

- a) Positiva.
- b) Negativa.
- c) A veces positiva, a veces negativa.
- d) Nula.

10) Para un funcionamiento periódico en régimen permanente, la potencia instantánea en una bobina:

- a) Es igual a cero.
- b) Siempre es positiva.
- c) Siempre es negativa.
- d) Durante una fracción del periodo absorbe energía y la fracción restante entrega energía.

11) Para un funcionamiento periódico en régimen permanente, la potencia media absorbida por un condensador es:

- a) Positiva.
- b) Negativa.
- c) A veces positiva, a veces negativa.
- d) Cero.

12) Si una fuente de tensión alimenta a una carga resistiva pura, el ángulo de desplazamiento φ vale:

- a) $\varphi = 0^\circ$.
- b) $\varphi = 45^\circ$.
- c) $\varphi = 90^\circ$.

CONVERTIDORES CONMUTADOS DE POTENCIA. TEST DE AUTOEVALUACIÓN

d) $\varphi = 120^\circ$.

13) Si una fuente de tensión alimenta a una carga inductiva pura, el factor de desplazamiento $\cos \varphi$ vale:

- a) $\cos \varphi = 0$.
- b) $\cos \varphi = 0.5$.
- c) $\cos \varphi = 0.8$.
- d) $\cos \varphi = 1$.

14) El factor de desplazamiento $\cos \varphi$ y el factor de potencia f_p son iguales cuando:

- a) La tensión y la intensidad son sinusoidales.
- b) La tensión es sinusoidal y la intensidad es periódica no sinusoidal.
- c) La tensión y la intensidad son periódicas no sinusoidal.
- d) Nunca son iguales.

15) La distorsión armónica total THD se mide en:

- a) Ondas sinusoidales.
- b) Ondas periódicas no sinusoidales.
- c) Ondas no periódicas.
- d) Valores constantes.

16) La tensión de salida de un convertidor ca/cc:

- a) Tiene una única componente continua.
- b) Está formada por una componente continua más un conjunto de armónicos.
- c) Es una sinusoidal pura.
- d) Ninguna de las anteriores.

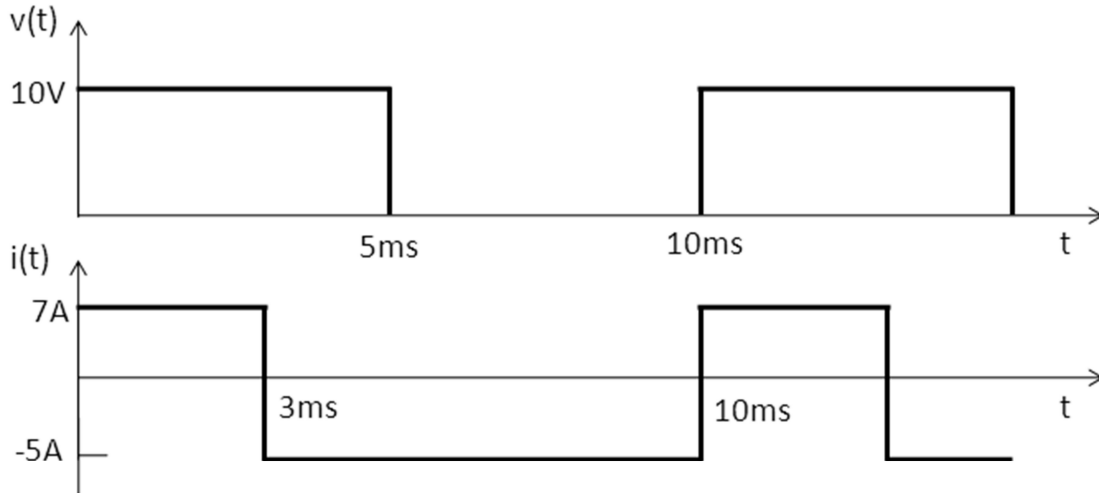
17) Un convertidor monofásico o trifásico controlado por fase con $\alpha=0^\circ$:

- a) Funciona como uno no controlado.
- b) Permite regular la tensión media de salida en magnitud y polaridad.
- c) La tensión media de salida es negativa.
- d) Permite regular la tensión media de salida en magnitud, pero no en polaridad.

18) Sea una señal sinusoidal de ecuación $v(t) = 5 \text{ sen}(\omega t)$, su valor eficaz vale:

- a) $V = 4.3 V$.
- b) $V = 5 V$.
- c) $V = 10 V$.
- d) $V = 3.5 V$.

19) La figura muestra la tensión y la corriente de un determinado dispositivo. La potencia media vale:



- a) $P = -5 \text{ W}$.
- b) $P = 11 \text{ W}$.
- c) $P = 18 \text{ W}$.
- d) $P = 15 \text{ W}$.

20) Una fuente de valor $v(t) = 70 \cos(\omega t)$ alimenta a una determinada carga, proporcionando una corriente: $i(t) = 5 + 10 \cos(\omega t + 15^\circ) + 8 \cos(2\omega t + 30^\circ) + 3 \cos(3\omega t + 45^\circ)$. La potencia absorbida por la carga vale:

- a) $P_o = 676 \text{ W}$.
- b) $P_o = 572 \text{ W}$.
- c) $P_o = 478 \text{ W}$.
- d) $P_o = 338 \text{ W}$.

21) Y el valor del factor de potencia f_p es:

- a) $f_p = 0.73$.
- b) $f_p = 0.64$.
- c) $f_p = 0.35$.
- d) $f_p = 0.48$.

22) Una fuente de valor $v(t) = 240\sqrt{2} \text{ sen}(\omega t)$ al alimentar una determinada carga da lugar a una intensidad de expresión $i(t) = 10 \text{ sen}(\omega t) + 5 \text{ sen}(2\omega t)$. La THD vale:

- a) $THD = 49\%$.
- b) $THD = 42\%$.
- c) $THD = 63\%$.
- d) $THD = 25\%$.

23) La tensión y la corriente de un dispositivo son funciones periódicas con $T = 100ms$. Si:

$$v(t) = \begin{cases} 8V & \text{si } 0 < t < 60ms \\ 0V & \text{si } 60ms < t < 90ms \\ 2V & \text{si } 90ms < t < 100ms \end{cases} \quad i(t) = \begin{cases} 0A & \text{si } 0 < t < 40ms \\ 4A & \text{si } 40ms < t < 80ms \\ -3V & \text{si } 80ms < t < 100ms \end{cases}$$

La potencia media vale:

- a) $P = 35 W$.
- b) $P = 10 W$.
- c) $P = 5.8 W$.
- d) $P = 2.3 W$.

INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CA/CC

Soluciones a los ejercicios de autoevaluación

Plantilla resumen

1.a	2.b	3.a	4.a	5.c	6.a	7.a	8.b	9.d	10.d
11.d	12.a	13.a	14.a	15.b	16.b	17.a	18.d	19.b	20.d
21.b	22.a	23.c							

Pregunta 1:

Un convertidor ca/cc permite dos modos de funcionamiento: como rectificador y como inversor. Este último funcionamiento sólo es posible para determinadas configuraciones ante determinadas condiciones, y se estudiará en la Lección 4 y Lección 5 dedicadas a los convertidores controlados por fase. Cuando su funcionamiento es como rectificador, el flujo de potencia se produce de la entrada a la salida, es decir, del lado de alterna al lado de continua. Cuando funciona como inversor la potencia fluye del lado de salida al de entrada, es decir, del lado de continua al de alterna.

Pregunta 2:

Los semiconductores empleados por los convertidores ca/cc dependerán de si estos son no controlados, controlados por fase o semicontrolados:

- No controlados: utilizan diodos.
- Semicontrolados: emplean diodos y tiristores.
- Controlados por fase: utilizan tiristores.

Pregunta 3:

Según el grado de controlabilidad del valor medio de la tensión de salida, los convertidores ca/cc:

- No controlados: Proporcionan una tensión media de salida constante. No puede controlarse, por tanto, ni en magnitud ni en polaridad.
- Semicontrolados: Proporcionan una tensión media de salida regulable mediante el ángulo α de disparo de los tiristores, pero únicamente en magnitud, no en polaridad. El valor medio de la tensión de salida es positivo o nulo. Nunca podrá ser negativo debido a la presencia de los diodos.
- Controlados por fase: Proporcionan una tensión media de salida regulable en magnitud y en determinados casos en polaridad mediante el ángulo de disparo α de los tiristores que configuran el circuito. El valor medio de la tensión de salida puede ser positivo, negativo (bajo ciertas condiciones) o nulo.

Pregunta 4:

Los convertidores controlados por fase monofásicos de medio puente siempre funcionarán como rectificadores, proporcionando un flujo de potencia

desde el lado de alterna al lado de continua. Los únicos convertidores que pueden funcionar como inversores bajo ciertas condiciones, que serán estudiadas en posteriores lecciones, son:

- Convertidores ca/cc monofásicos controlados por fase en puente completo.
- Convertidores ca/cc trifásicos controlados por fase de medio puente y de puente completo.

Pregunta 5:

Los convertidores ca/cc monofásicos de medio puente rectifican sólo el semiciclo positivo de la tensión de entrada. Los monofásicos de puente completo rectifican tanto el semiciclo positivo como el semiciclo negativo de la tensión de entrada. Por tanto, el valor de la tensión media de salida en un convertidor ca/cc monofásico en puente completo será el doble que la de uno monofásico en medio puente funcionando bajo las mismas condiciones.

Pregunta 6:

Un convertidor ca/cc no controlado, monofásico o trifásico, no permite regular la tensión media de salida, esto es, proporciona una tensión media de salida de valor constante. Por tanto, en el caso que se pregunta de un convertidor ca/cc no controlado trifásico de puente completo, la tensión de salida se mantiene constante independientemente de la variación de la carga.

Pregunta 7:

En todos los convertidores ca/cc, independientemente de si son no controlados, controlados por fase o semicontrolados, la intensidad por la carga siempre fluye en un único sentido. Por tanto, su valor medio siempre es positivo. Como el funcionamiento como rectificador o como inversor se manifiesta en el signo del flujo de potencia (positivo para la rectificación y negativo para la inversión), el signo negativo de la potencia media vendrá dado por el signo de la tensión media de salida. En definitiva:

- Si la tensión media de salida es positiva, el convertidor ca/cc funciona como rectificador.
- Si la tensión media de salida es negativa, el convertidor ca/cc funciona como inversor.

Pregunta 8:

En los convertidores ca/cc trifásicos:

- Si la configuración es de medio puente, la tensión de salida estará formada por trozos de las tensiones de fase: $v_{an}(\omega t), v_{bn}(\omega t), v_{cn}(\omega t)$ siendo n el neutro de la fuente trifásica.
- Si la configuración es de puente completo, la tensión de salida estará formada por trozos de las tensiones de línea-línea o tensiones compuestas: $v_{ab}(\omega t), v_{ac}(\omega t), v_{bc}(\omega t), v_{ba}(\omega t), v_{ca}(\omega t), v_{cb}(\omega t)$.

Pregunta 9:

En un funcionamiento periódico en régimen permanente, la tensión media en la bobina vale cero. Por tanto, la potencia media absorbida es nula. En otras palabras, en un periodo, toda la carga almacenada por una bobina es igual a la descarga de la misma.

Pregunta 10:

Según lo indicado en la respuesta a la pregunta 9, en un periodo la bobina se carga y se descarga, siendo el valor medio de la tensión cero. Así, durante una fracción del periodo la bobina se carga o absorbe energía (potencia instantánea positiva: tensión en la bobina positiva e intensidad positiva y creciente) y durante la otra fracción del periodo la bobina se descarga o entrega energía (potencia instantánea negativa: tensión en la bobina negativa e intensidad positiva y decreciente).

Pregunta 11:

En un funcionamiento periódico en régimen permanente, la intensidad media en un condensador vale cero. Por tanto, la potencia media absorbida es nula.

Pregunta 12:

El ángulo de desplazamiento φ se define como el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente a frecuencia fundamental. Cuando la carga es resistiva, la intensidad y la tensión están en fase: $v(t) = Ri(t)$, por lo que el ángulo de desplazamiento vale cero.

Pregunta 13:

El factor de desplazamiento $\cos \varphi$ se define como el coseno del ángulo de desplazamiento. En una carga inductiva, la intensidad y la tensión se encuentran desfasadas 90° , por lo que el factor de desplazamiento vale: $\cos(90^\circ) = 0$.

Pregunta 14:

El factor de desplazamiento y el factor de potencia sólo son iguales para tensiones e intensidades sinusoidales. Así, supóngase un convertidor alimentado con una tensión sinusoidal y por el que circula una intensidad también sinusoidal:

$$\begin{cases} v(t) = V_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \theta) \\ i(t) = I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \vartheta) \end{cases}$$

La potencia media tendrá la siguiente expresión: $P = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta - \vartheta)$ y la potencia aparente: $S = V_{rms} I_{rms}$.

El factor de potencia, definido como el cociente entre la potencia media y la aparente, vale:

$$f_p = \frac{P}{S} = \frac{V_{rms} I_{rms} \cos(\theta - \vartheta)}{V_{rms} I_{rms}} = \cos(\theta - \vartheta) = \cos(\theta - \vartheta)$$