



# PRÁCTICO INVERSORES

## ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Curso 2017

---

### Ejercicio 1

(Examen de Electrónica de Potencia 1 - 23 de febrero de 1996)

Sea un inversor trifásico de tensión (VSI) compuesto por sus tres ramas inversoras que generan un sistema trifásico equilibrado de tensión y frecuencia fundamental  $U_1$  y  $f_0$ .

El inversor está alimentado por una fuente de tensión continua  $E$ .

A su salida tiene conectado, mediante tres inductancias serie de valor  $L$ , una red ideal trifásica equilibrada de tensión  $U_2$  y frecuencia  $f_0$ .

El sistema  $U_2$  está retrasado un ángulo  $\theta$  respecto al sistema  $U_1$ .

- 1) Determinar cómo se debe comandar cada una de las ramas del puente inversor a los efectos de dar a su salida una tensión sin 5° armónico y tener el máximo valor de su tensión fundamental.

En lo que sigue del problema se mantendrá este control sobre el puente inversor.

- 2) Dibujar los diagramas de potenciales de las tres tensiones de fase y una de línea de salida del inversor.

- 3) Dar una expresión del contenido armónico de la tensión de línea del sistema  $U_1$ .
- 4) Calcular  $E$  si la tensión de línea  $U_1$  tiene como valor eficaz del primer armónico de  $220V$ .
- 5) ¿Cuáles son, en la tensión de línea, los primeros tres armónicos no nulos? Justificar la respuesta claramente.
- 6) Dar una expresión del valor medio de la corriente  $I_o$  de entrada al inversor provista por la fuente de continua  $E$ .
- 7) Calcular dicho valor para  $U_1 = 220V$ ,  $U_2 = 150V$ ,  $f_0 = 50Hz$ ,  $L = 10mHy$  y  $\theta = 30^\circ$ .

**NOTA:** Todos los componentes se consideran ideales.

## Ejercicio 2

(Electrónica de Potencia 1 - Diciembre 1999)

Al inversor monofásico de la figura 1 se le controla la rama A con la señal PWM sinusoidal generada al comparar la triangular normalizada (portadora) y la senoide de período  $T$  y amplitud  $k$  (modulante) tal como se muestra en la figura 2. Se define  $M$  como la cantidad de conmutaciones para un cuarto del período de la modulante.

La rama B se controla con una onda cuadrada de período  $T$  en contrafase con la modulante sinusoidal.

La corriente de la carga es puramente sinusoidal de valor eficaz  $I$  y esta retrasada un ángulo  $\varphi$  respecto a la modulante.

- 1) Para el caso de  $M = 2$  y  $k = 0,5$ , dibujar las tensiones A, B, A-B y las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_o$ .
- 2) Calcular los ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  que quedan determinados en la parte 1.
- 3) Dar la expresión del contenido armónico de la tensión A-B en forma genérica para  $M$  ángulos.
- 4) Calcular el valor medio de la corriente  $I_o$ .
- 5) Dar la expresión de la integral que se utilizaría para calcular el contenido armónico de  $I_o$  eficaz y demostrar cuáles son las frecuencias presentes en dicha corriente.

**Datos:**

$$E = 300V$$

$$I = 10A$$

$$\varphi = 70^\circ$$

$$\frac{1}{T} = f = 50Hz$$

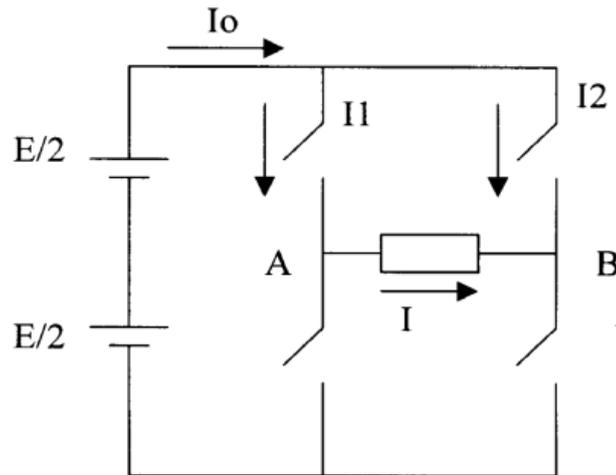


Figura 1

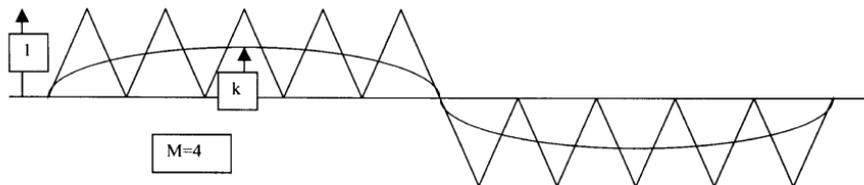


Figura 2

### Ejercicio 3

(Electrónica de Potencia 1 - 6 de marzo de 1997)

El inversor trifásico de la figura 3 genera un sistema de tensiones trifásicas equilibradas. La carga se asumirá lineal. La corriente de carga se asumirá sinusoidal de valor eficaz  $I$  y retrasada respecto de la tensión en un ángulo  $\varphi$ . Se recomienda dibujar en papel cuadrículado tomando cada división como  $10^\circ$ .

- 1) Determinar y dibujar la secuencia de comandos que se debe realizar sobre las

llaves  $T_1, T_2, T_3$  y  $T_4$  para que la tensión de salida de la rama  $R$  del inversor trifásico  $U_{RG}$  sea la de la figura 4.

- 2) Determinar el contenido armónico eficaz de  $U_{RS}$ . Calcular  $U_{RS(1)_{ef}}$ .
- 3) Determinar el contenido armónico eficaz de  $U_{NG}$ .
- 4) Dibujar  $U_{RS}$ .
- 5) Dibujar la corriente  $i_{LR}(t)$  y determinar claramente de todos los componentes de la rama  $R$  quiénes conducen o están cortados.
- 6) Supuesto conocido  $I_{LR}(n)$  (contenido armónico de  $i_{LR}(t)$ ) dar una expresión del contenido armónico de  $i_o(t)$ .
- 7) Dibujar la corriente  $i_{GR}(t)$  y calcular su valor medio.
- 8) Calcular el valor medio de  $i_o(t)$ .

**Datos:**

$E = 150V$

$I = 120A$

$\varphi = 40^\circ$

$\alpha_1 = 20^\circ$

$\alpha_2 = 70^\circ$

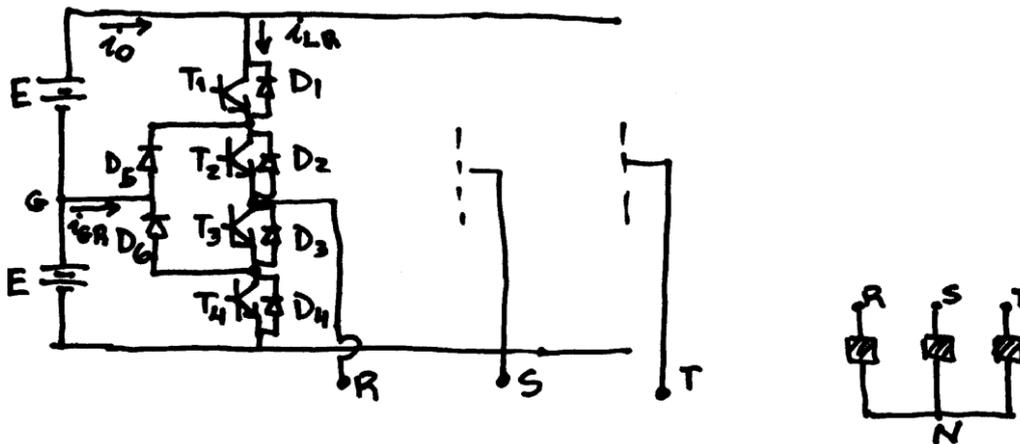


Figura 3

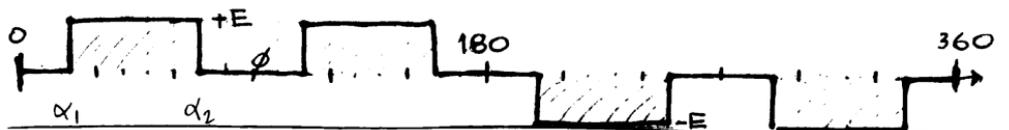


Figura 4

## Ejercicio 4

(Electrónica de Potencia 1 - 24 de febrero de 1999)

Sea un inversor trifásico en el que cada rama tiene la posibilidad de imponer en su salida tres niveles de tensión (estados), a saber,  $+\frac{E}{2}$ , 0 y  $-\frac{E}{2}$ , respecto al punto medio de la fuente de continua que alimenta al inversor (ver figura 5).

El inversor genera en su salida una tensión trifásica en perfecta fase con la tensión del sistema trifásico al que está conectado mediante un transformador, siendo las inductancias de desacople entre la tensión del inversor y la red la reactancia de fugas del propio transformador.

En todos los casos se tendrá en cuenta sólo el primer armónico.

- 1) Determinar qué llaves deben ser comandadas a los efectos de tener cada uno de los niveles indicados para cualquier tipo de carga.
- 2) Determinar la forma de onda de salida de tres estados mediante la cual se pueda controlar el primer armónico de tensión con mínimos flancos posibles y sin armónicos pares.
- 3) Demostrar que dependiendo del módulo de la tensión del primer armónico del inversor, el sistema inversor-transformador es visto como una carga capacitiva o inductiva.
- 4) Determinar:
  - a) Valor máximo  $+Q_n$  (capacitivo) y  $-Q_n$  (inductivo) permitidos por el sistema propuesto.
  - b) Valores de la tensión de primer armónico de salida del inversor para cada uno de estos casos.
- 5) Dibujar para el caso de la carga inductiva  $-Q_n$  calculada en 4) y para una sola rama:
  - Tensión de fase de red.
  - Tensión de fase del inversor.
  - Corriente de fase del inversor.
  - Corriente por  $L_1$ .
  - Corriente por  $D_5$ .

En el dibujo se indicará claramente cuándo conducen cada uno de todos los semiconductores de la rama.

6) ¿Qué potencia entrega la fuente de continua del inversor?

**Datos:**

$$U_{red} = 5,2kV$$

Inversor:  $E = 8kV$ ,  $I_{1n} = 4kA$  (corriente de primer armónico de salida nominal).

Transformador: YY, 1:1,  $x_{cc} = 10\%$ ,  $S_n = 27MVA$ .

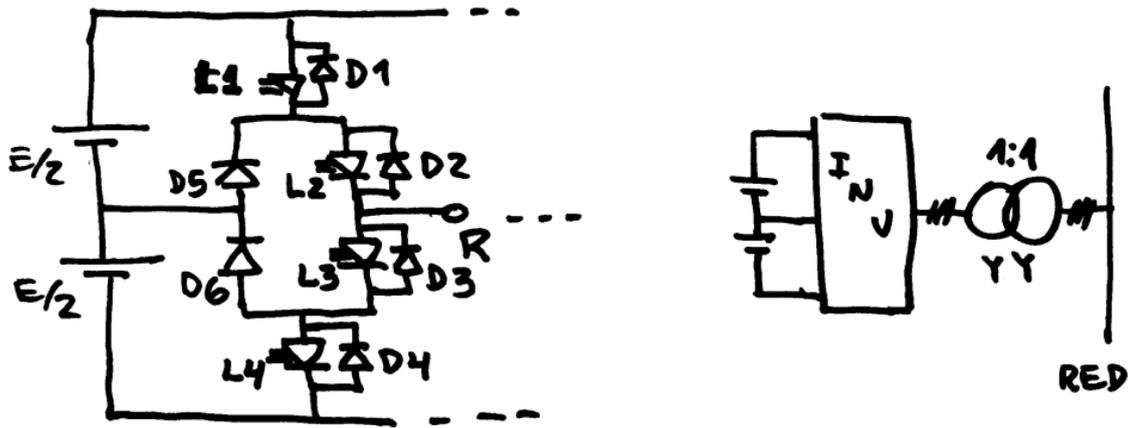


Figura 5

## Ejercicio 5

(Examen de Electrónica de Potencia 1 - 9 de agosto de 2000)

El inversor trifásico de la figura 6 tiene como objetivo la generación de una tensión de salida de 5 estados. Básicamente funciona como un trifásico de tres estados con el agregado de un módulo, **común para las tres ramas**, que hace que lo que era el punto medio del inversor de tres estados original tome en este caso valores  $kE$ ,  $0$  y  $-kE$ .

La tensión de salida por fase se sintetiza a partir de los ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  tal como muestra la figura 7. Para este caso se tomará  $\alpha_2$  constante e igual a  $30^\circ$ .

- 1) Determinar para la rama R cómo se deben comandar las llaves para lograr la tensión dibujada en la figura 7. Se recomienda llenar una tabla como la mostrada a continuación.

Llave: prendida=1, apagada=0, no importa (pero sin provocar corriente cruzada)=Z								
	U1	U2	U3	U4	S1	S2	S3	S4
+E (k+1)								
+E k								
0								
-E k								
-E(k+1)								

- 2) Dibujar la tensión  $V_{U0}$ ,  $V_{V0}$  y  $V_{W0}$ .
- 3) Teniendo en cuenta las tres fases, dibujar la tensión  $V_{N0}$  demostrando que no hay interferencia entre las tres fases pese a que comparten el punto N.
- 4) Dibujar  $V_{UV}$ .
- 5) Calcular el contenido armónico eficaz de  $V_{U0}$  y  $V_{UV}$ .
- 6) Calcular el valor eficaz (total) de  $V_{UV}$  (basta con escribir la expresión que lo calcula en función de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $E$  y  $k$ ).
- 7) Dibujar la corriente  $I_0$  si las corrientes  $I_U, I_V$  e  $I_W$  (que se asumirán sinusoidales de amplitud  $I_P$ ) está retrasada  $20^\circ$  respecto a las tensiones respectivas.

**NOTA:** Se recomienda dibujar en papel cuadriculado con  $10^\circ = 1$  cuadrado,  $E = 1$  cuadrado y  $kE = 1$  cuadrado.

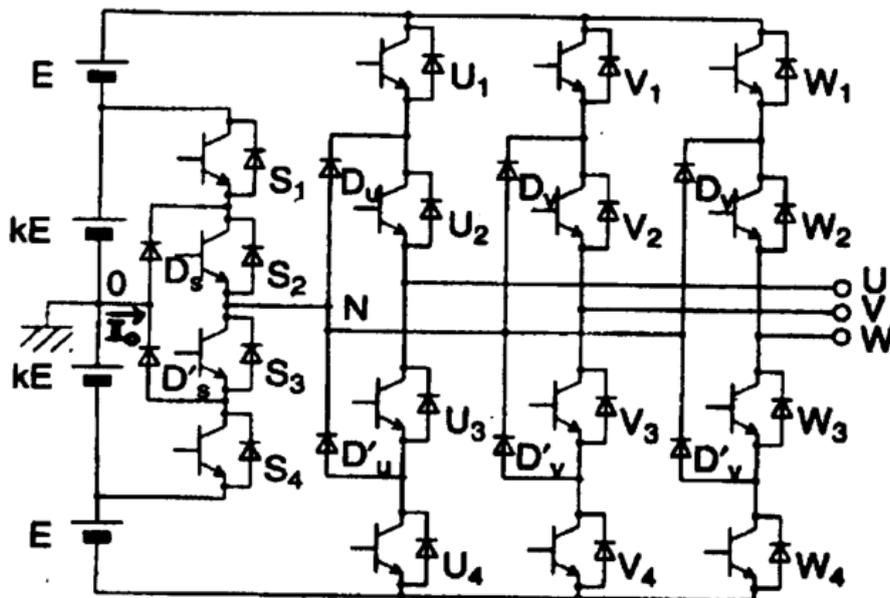


Figura 6

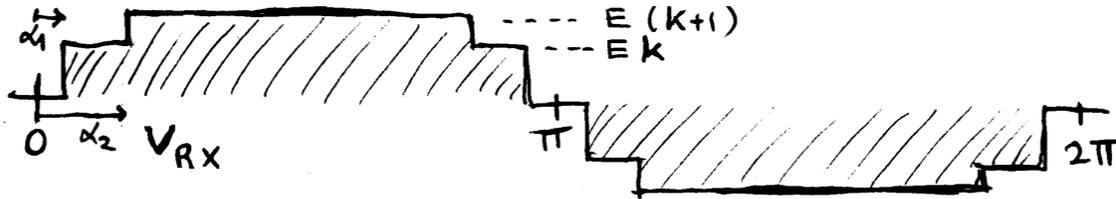


Figura 7

## Ejercicio 6

(Examen de Electrónica de Potencia 1 - marzo de 1994)

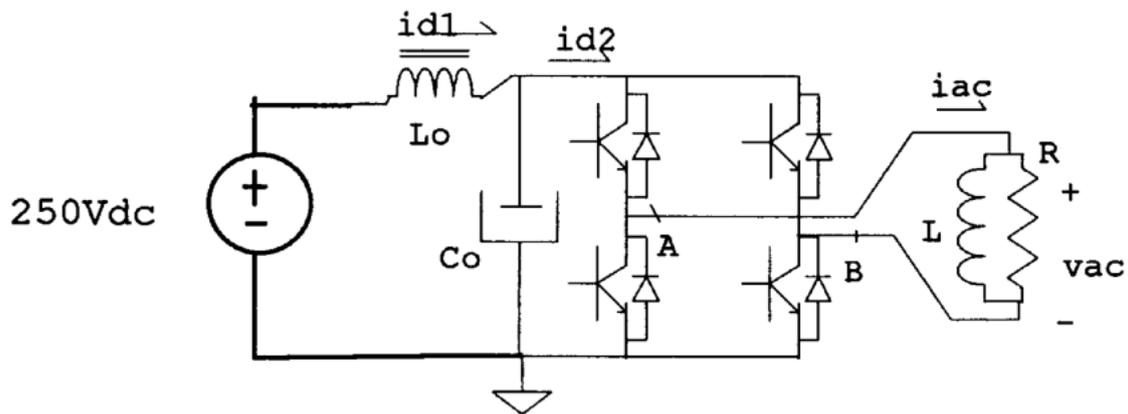


Figura 8

Las ramas A y B del puente inversor de la figura 8, se manejan de forma tal que el potencial de los nodos A y B respecto a tierra, son ondas cuadradas de período ( $T = 200\mu s$ ). La onda  $B(t)$  está retrasada respecto a  $A(t)$  en un cuarto de período.

La carga del inversor está constituida por una inductancia de  $250\mu H$  en paralelo con una resistencia de  $5\Omega$ .

La alimentación se realiza desde una fuente de continua de  $250V$ .

- 1) Suponiendo la tensión del condensador  $C_0$  constante, dibujar las siguientes formas de onda:
  - Tensión sobre la carga  $v_o(t)$ .
  - Corriente por la carga  $i_o(t)$ .

- Corriente por los transistores y diodos inferiores de cada una de las ramas del inversor.
  - Corriente  $i_{D2}$  (salida del filtro de continua).
- 2) Diseñar el filtro  $L_o - C_o$  para que las variaciones pico a pico de la tensión en el condensador y de la corriente en la bobina sean inferiores a  $1V$  y  $0,5A$  respectivamente.
  - 3) Indicar los valores relevantes para la selección de los semiconductores del puente inversor.

## Ejercicio 7

(Electrónica de Potencia 1 - febrero de 1995)

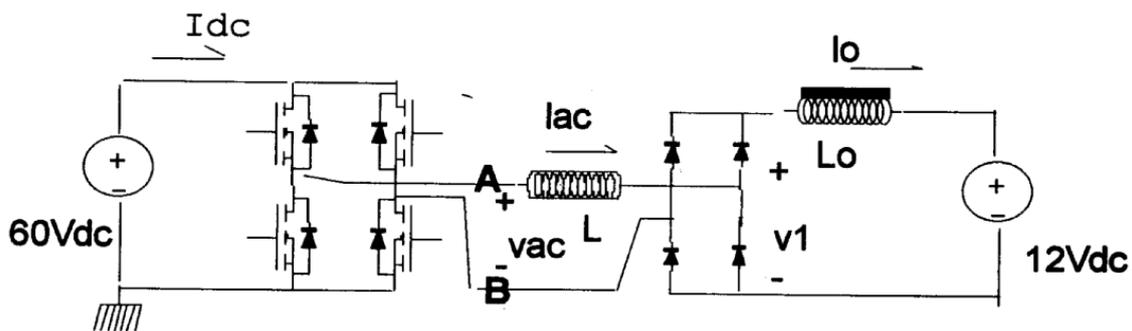


Figura 9

El circuito de la figura es un inversor en "puente H" que genera una tensión ac de  $50kHz$  la cual se rectifica para cargar una batería de  $12Vdc$ .

La inductancia que aliza la corriente de salida del rectificador el lo suficientemente grande y se puede suponer que la corriente ( $I_o$ ) es cuasi-constante.

El inversor se alimenta desde una fuente perfecta de  $60Vdc$ . Las ramas se manejan de manera que el potencial de los bornes A y B son ondas cuadradas de  $50kHz$ .

Para controlar la corriente de carga se atrasa el manejo de la rama B respecto del de la rama A en un ángulo variable  $\varphi$ .

La inductancia L a la salida del inversor es de  $24\mu Hy$ .

- Dibujar la transferencia  $I_o = f(\varphi)$ .
- Dibujar las formas de onda de:  $v_{ac}(t)$ ,  $i_{ac}(t)$ ,  $v_1(t)$  e  $i_{dc}(t)$  para una corriente de carga (en estado permanente)  $I_o = 5A$ .

## Ejercicio 8

(Primer parcial - 18 de mayo de 2006)

Sea un inversor trifásico que alimenta una carga equilibrada que tiene un factor de potencia tal que provoca un retraso de  $60^\circ$  de la corriente respecto de la tensión. Se asumirá corriente puramente sinusoidal de valor eficaz  $I$  de  $100A$ . El inversor se alimenta de una fuente de tensión constante  $E$  de  $400V$ .

A los efectos de eliminar algún armónico de tensión se realiza modulación de pulso centrado (ver en la figura 10 la tensión que se debe generar en cada fase respecto al punto medio de  $E$ ).

- Dar la expresión del contenido armónico de la tensión compuesta de salida del inversor en función del ángulo  $\alpha$ .
- Calcular  $\alpha$  tal que se elimina el  $5^\circ$  armónico de tensión y se obtiene el máximo valor de tensión eficaz de primer armónico.
- Dibujar, para el valor calculado en la parte b, la corriente que pasa por el diodo en antiparalelo de la llave superior de una de las ramas del inversor.
- Calcular el valor medio de la corriente que entrega la fuente de continua  $E$ .

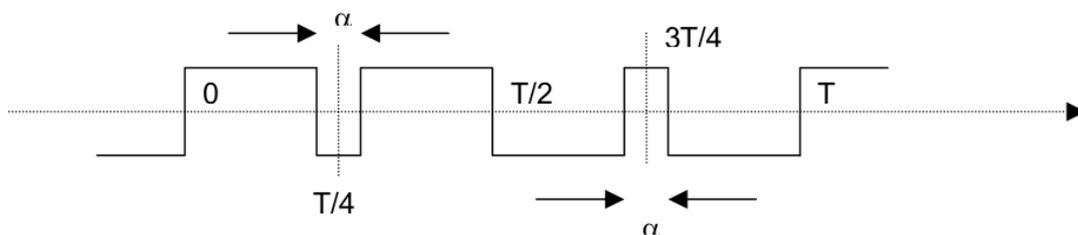


Figura 10

## Ejercicio 9

(Primer parcial - 11 de mayo de 2007)

Sea un inversor trifásico alimentado por una fuente de continua partida en dos valores iguales de valor  $\frac{E}{2}$ . La salida del inversor se conecta a una red trifásica equilibrada mediante tres inductancias iguales de valor  $L$ . Las tensiones de fase de la red trifásica son ondas cuadradas de amplitud  $+E^*$  y  $-E^*$ . El neutro del sistema trifásico se conecta al punto medio de las fuentes de continua que alimentan al inversor.

Por un lado el control se realiza de tal forma que el inversor nunca entrega potencia activa. Por otro lado la salida de cada rama inversora se controla haciendo una única conmutación a los efectos de controlar el valor del fundamental (y así controlar el intercambio de reactiva) o para eliminar algún armónico.

- 1) Calcular el ángulo de conmutación que determina la no existencia de corriente de tercer armónico entregada por el inversor al mismo tiempo que el intercambio de reactiva es máximo.
- 2) Calcular el valor medio de la corriente entregada por cada una de las fuentes de continua que alimentan el inversor (se deberá justificar el cálculo).

**Datos:**

$$E = 150V$$

$$E^* = 100V$$

## Ejercicio 10

(Primer parcial - 7 de mayo de 2008)

Sean los dos inversores monofásicos de la figura 11 conectados en paralelo a la red eléctrica mediante las correspondientes inductancias de desacople  $L$ . El objetivo de los inversores es entregar o consumir equitativamente y en conjunto sólo potencia reactiva de la red. Se considerará que la red es ideal de tensión eficaz  $U$  y frecuencia  $f$ . El comando de los inversores está desfasado entre ellos en un tiempo  $T_0$ . Cada inversor genera un pulso rectangular de tensión mediante un control por desfasaje.

- a) Mostrar con un esquema fasorial que ambos inversores entregan o consumen la misma reactiva  $Q$  si la tensión de red está en la bisectriz que forman las tensiones que generan. Incluir en el esquema fasorial las tensiones  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V$ ,  $V_{L1}$ ,  $V_{L2}$  (tensiones de cada inductancia) y la corriente  $I_o$ . No es necesario calcular los valores de los módulos de cada variable.

- b) Dar una expresión para el espectro de  $I_o$  en función del espectro de  $V_1$ .
- c) Calcular  $T_0$  tal que la corriente  $I_o$  no tenga armónico 5°.
- d) Para el valor genérico con que se dibujó el esquema fasorial de la parte a y un valor genérico de  $E$ , dibujar la tensión de salida de cada rama del inversor 1, la tensión  $V_1$ , la corriente fundamental de  $I_1$  y las corrientes por los diodos  $D_1$  y  $D_2$ . Se asumirá en este caso que la única corriente armónica presente en  $I_o$  es la de frecuencia fundamental. No es necesario calcular los valores de los módulos de cada variable.

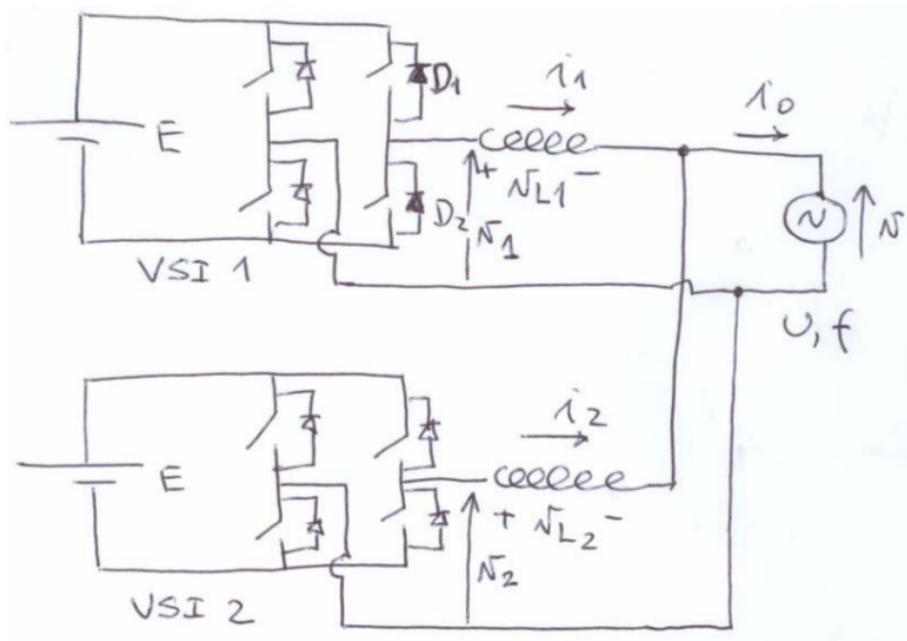


Figura 11

## Ejercicio 11

(Primer parcial - 6 de mayo de 2009)

Sean los dos inversores de la figura 12-1 cuyas salidas se conectan en serie obteniéndose la tensión final de salida  $V_{ac}$ . Se considerará que la carga de alterna es una fuente de corriente  $I_{ac}$  puramente sinusoidal con valor eficaz  $I$  y retrasada un ángulo  $\varphi$  de  $80^\circ$  respecto al fundamental de tensión  $V_{ac}$ . Las relaciones de vueltas de los transformadores son  $\delta$  y  $\beta$  respectivamente y se verifica que  $\beta = 1 - \delta$ .

Los inversores se comandan de tal forma de generar en el primario de cada transformador pulsos rectangulares tal como se muestra en la figura 12-2.

- Calcular el máximo valor que puede tomar el valor del fundamental de  $V_{ac}$ . Determinar para qué valores de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  se obtiene dicho valor.
- Determinar la expresión del espectro de  $V_{ac}$  en función de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\delta$  el cual se expresará relativo al valor máximo hallado en la parte a. Sea  $\gamma$  el valor relativo correspondiente a la frecuencia fundamental.
- Expresar el sistema de ecuaciones que determina  $\delta$ ,  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  que hace que se obtenga un determinado valor  $\gamma$  de fundamental y que elimine el quinto y séptimo armónico.
- Para un valor deseado de  $\gamma = 0,7$ , la solución del sistema de ecuaciones es  $\alpha_1 = 23^\circ$ ,  $\alpha_2 = 58^\circ$  y  $\delta = 0,42$ . Dibujar  $v_{ac}(t)$ ,  $i_{ac}(t)$  y  $i_{D1}(t)$  siendo esta última la corriente por el diodo en antiparalelo de la llave  $L1$ .
- Calcular para las condiciones establecidas en d y en función de  $E$ ,  $I$  y  $\varphi$  el valor medio de la corriente que entrega la fuente de continua  $E$ .

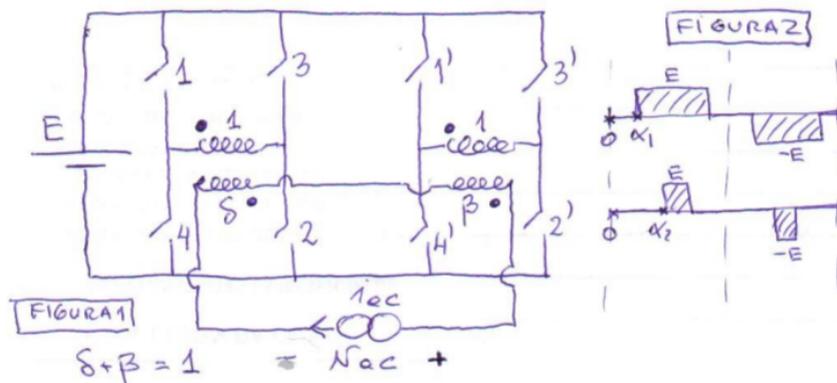


Figura 12

## Ejercicio 12

(Primer parcial - 4 de mayo de 2010)

Sea un inversor monofásico compuesto por dos ramas inversoras que se alimenta de una tensión  $E$ . Su salida se conecta con una red eléctrica monofásica de tensión  $U$  mediante un transformador 1 : 1, potencia aparente  $S$  e impedancia de cortocircuito  $X_{cc}$ .

- a) Dibujar una tensión de salida del inversor que, con mínimas conmutaciones y mínimo valor eficaz permitan eliminar el armónico 3 y controlar el valor eficaz del primer armónico de tensión.
- b) Dar las expresiones del sistema de ecuaciones que determina los ángulos de conmutación del inversor.
- c) ¿Qué hay que hacer para que el inversor sólo intercambie reactiva con la red? Dar un esquema fasorial del fundamental que muestre cuándo la red ve un condensador o ve una carga inductiva.
- d) Dar una expresión de la potencia reactiva intercambiada.

## Ejercicio 13

(Primer parcial - 2012)

Sean los dos inversores INV 1 e INV 2, cuyas salidas  $U_{AC1}$  y  $U_{AC2}$  se conectan en serie obteniéndose la tensión  $U_{AC}$ . La salida  $U_{AC}$  es conectada a la red eléctrica mediante una inductancia de desacople  $L$ . Se considera que la red es ideal de tensión eficaz  $U_{RED}$  y frecuencia  $f$  y que la tensión  $U_{RED}$  está retrasada un ángulo  $\varphi$  respecto de la tensión  $U_{AC}$ . Ver figura 13.

Ambos transformadores son de relación 1 : 1.

El comando de INV 1 es una onda cuadrada de frecuencia  $f$  y el de INV 2 es una onda cuasi-cuadrada. Para el caso de INV 2, para  $0 < t < \frac{T}{2}$ , cuando  $U_{AC2} = 0$ , conducen las llaves 5 y 7, y para  $\frac{T}{2} < t < T$ , conducen las llaves 6 y 8.

Se pide:

- a) Determinar el contenido armónico eficaz de la tensión de salida  $U_{AC}$ .
- b) Hallar el ángulo eléctrico  $\alpha$  asociado a  $t_\alpha$  tal que la corriente  $i$  no tenga 7º armónico y que a la vez el 1º armónico de la tensión  $U_{AC}$  sea máximo.
- c) Calcular  $\langle i_{dc} \rangle$ .
- d) Indicar para  $0 < t < \frac{T}{2}$  qué componentes conducirán la corriente  $i$  cuando la misma sea positiva o negativa. Completar la siguiente tabla:

	$0 < t < t_\alpha$	$t_\alpha < t < T/2 - t_\alpha$	$T/2 - t_\alpha < t < T/2$
$i > 0$	INV 1: INV 2:	INV 1: INV 2:	INV 1: INV 2:
$i < 0$	INV 1: INV 2:	INV 1: INV 2:	INV 1: INV 2:

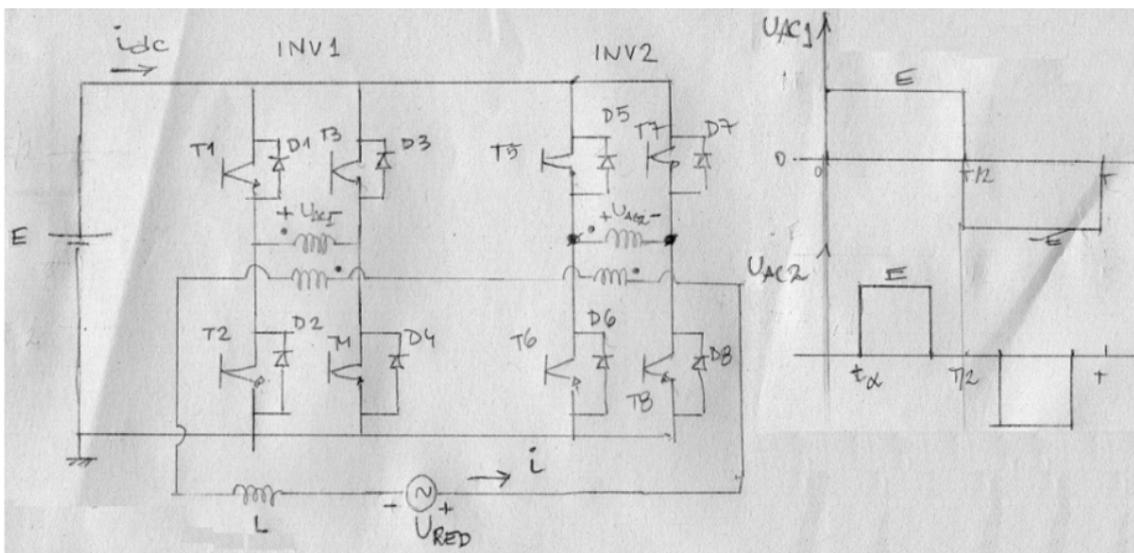


Figura 13

## Ejercicio 14

(Primer parcial - 15 de mayo de 2013)

Una red trifásica fuerte de tensión  $U = 400V_{ac}$  y frecuencia  $50Hz$ , alimenta a una carga lineal trifásica y equilibrada la cual consume una potencia activa  $P = 16kW$  y posee un factor de potencia  $FP = 0,8$ .

A efectos de compensar la energía reactiva consumida por dicha carga, se conecta a la red un rectificador trifásico controlado que alimenta a un VSI trifásico el cual se conecta a la red a través de un transformador trifásico (ver figura 14).

El rectificador mantiene la tensión de su salida ( $E$ ) constante y el inversor es comandado de forma que genera un sistema trifásico y equilibrado, ya que la rama de la fase  $s$  se comanda con la misma forma de onda que la fase  $r$  retrasada  $120^\circ$ , mientras que la rama de la fase  $t$  se comanda con la misma forma de onda que la de

la fase  $r$  adelantada  $120^\circ$ .

- Calcular el contenido armónico de la tensión entre las fases  $r - s$  (en la salida del inversor) en función del contenido armónico de la fase  $r$ .
- Dibujar la forma de onda y dar las expresiones del sistema de ecuaciones que determina los ángulos de conmutación de la tensión de fase  $r$  para que la tensión entre fases  $r - s$  tenga un valor eficaz  $U_{ef}$  y los armónicos 3, 5, 7 y 9 sean nulos.
- Determinar el valor  $U_{ef}$  y el desfase  $\theta$  entre la tensión de salida del inversor y la red que se necesita para que el inversor compense por completo la energía reactiva consumida por la carga lineal y no intercambie potencia activa con la red.
- En las condiciones del punto c), calcular la corriente media entregada por el rectificador al inversor.

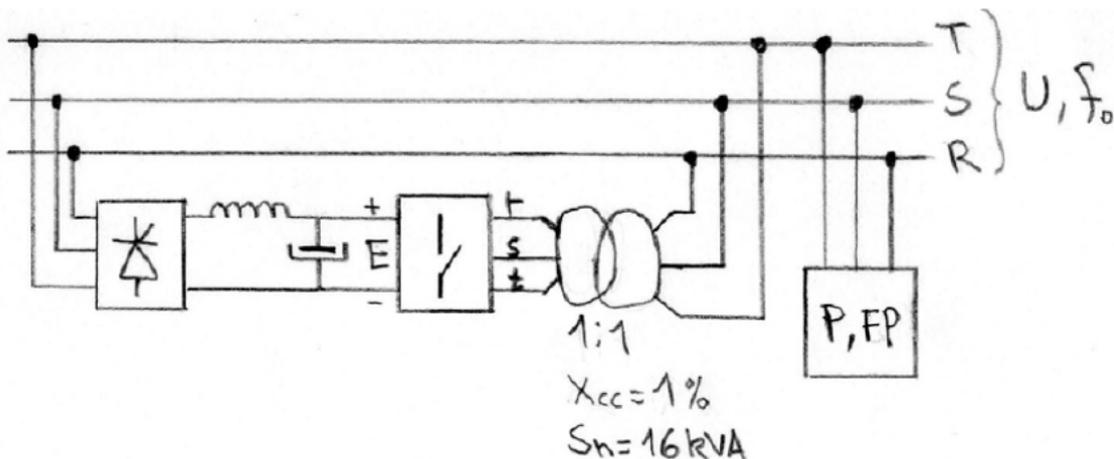


Figura 14

## Ejercicio 15

(Primer parcial - 21 de mayo de 2014)

- Explique brevemente qué es un inversor y cuáles pueden ser sus aplicaciones.

Considere el inversor monofásico de la figura 15. El mismo se alimenta de una fuente de continua ideal constante de valor  $V_{dc}$ .

- b) ¿Cómo se debe comandar el inversor para que el valor rms de la fundamental sea máximo? ¿Cuál es dicho valor?
- c) Explique qué es el control por desfasaje de ondas.
- d) Calcule el desfasaje que se debe imponer para eliminar el tercer armónico en la tensión de salida  $V_{ac}$ . En esas condiciones calcule el valor rms de la fundamental.

**Considere el inversor trifásico de la figura 16.**

- e) ¿Cómo son los armónicos de la tensión entre fases de un inversor trifásico en función de la tensión de fase  $R$ ? Determine la expresión matemática.
- f) ¿Cómo es la tensión  $U_n$  si las corrientes de salida son equilibradas?
- g) Dibujar la forma de onda y dar las expresiones del sistema de ecuaciones que determinan los ángulos de conmutación de la tensión de fase  $r$  para que la tensión entre fases  $r - s$  tenga un valor eficaz  $U_{ef}$  y que los armónicos 2 a 9 sean nulos.
- h) Explique cualitativamente qué es la conexión Fork y para qué sirve.

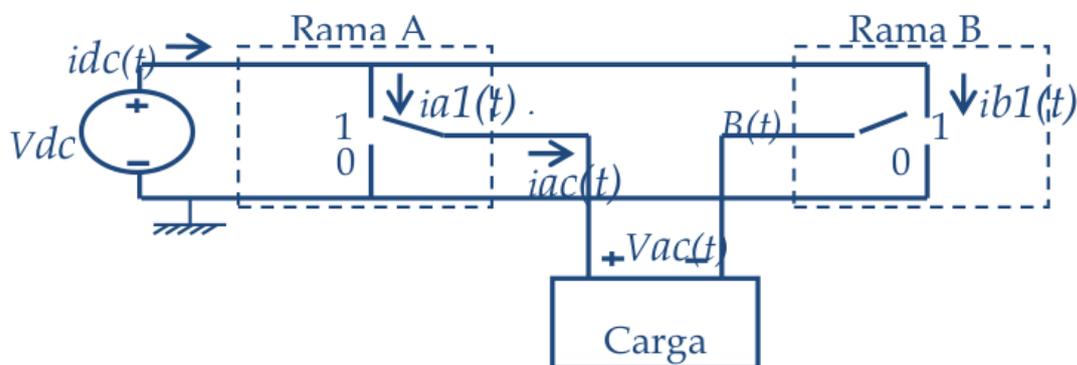


Figura 15

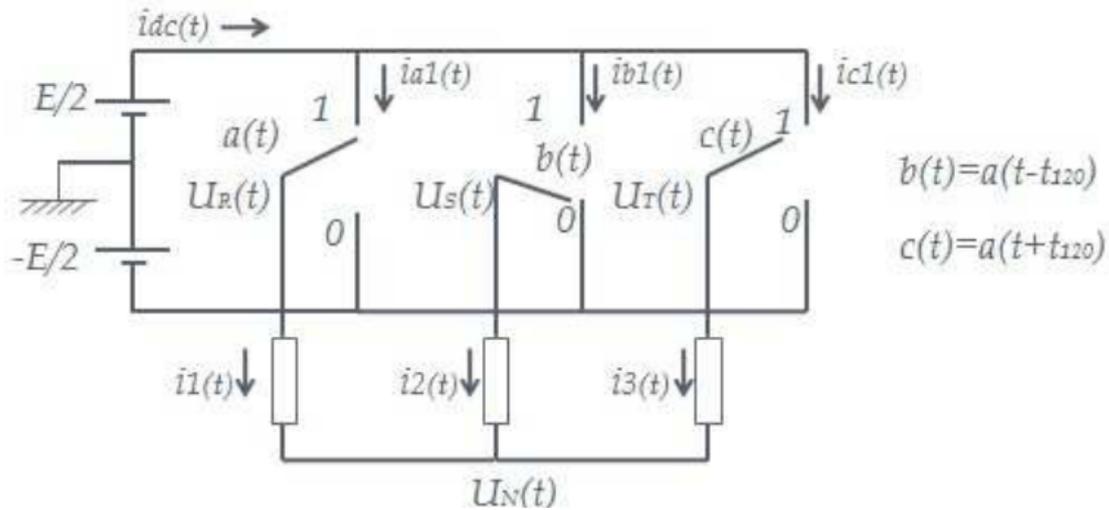


Figura 16

## Ejercicio 16

(Primer parcial - 14 de mayo de 2015)

Sea el convertidor FORK de la figura 17. Las tensiones  $(X, Y, Z)$  y  $(U, V, W)$  son equilibradas y de rotación horaria estando las últimas  $30^\circ$  eléctricos retrasadas o adelantadas respecto a las primeras. Calcular el contenido armónico de la tensión  $T$  en función del contenido armónico de la tensión  $X$ . Demostrar para qué caso, retraso o adelanto, y en qué condición de  $N_1$  y  $N_2$  se eliminan armónicos relevantes.

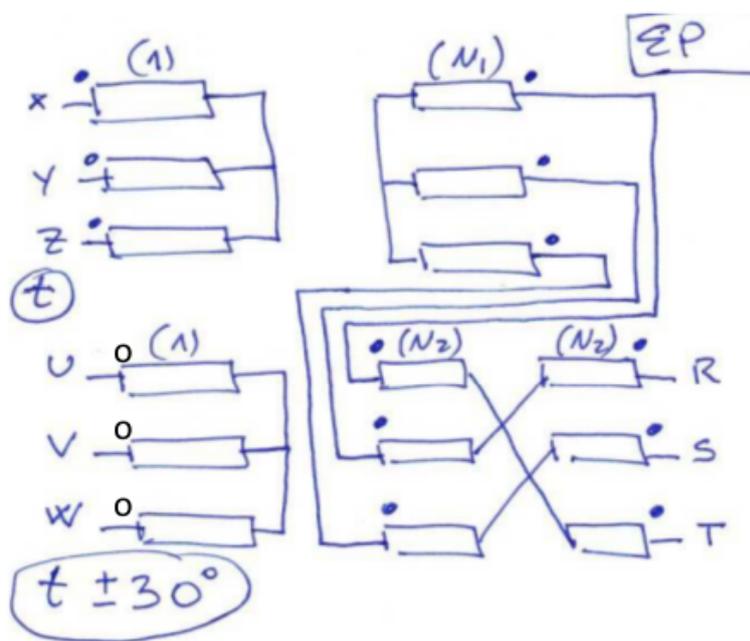


Figura 17