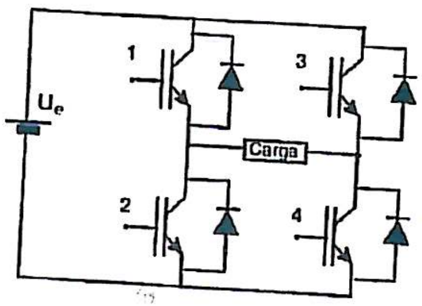
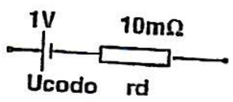
Problema

El circuito de la figura es un inversor monofásico controlado por ancho de pulso alimentado desde una fuente de tensión de 400V. La duración del pulso de tensión aplicado a la carga es de 120 º y la frecuencia de conmutación de 10kHz.

Sabiendo que la carga consume una intensidad puramente senoidal, con un cos φ = 0,866 respecto al armónico fundamental de la tensión aplicada, y una potencia activa de 2 kW, se pide:

a) Dibujar los pulsos de disparo de puerta de los cuatro IGBT
b) Dibujar la forma de onda de tensión e intensidad en la carga, acotando sus valores más significativos (especifique claramente el valor de pico de la intensidad).
c) Dibujar la forma de onda de tensión e intensidad en todos los semiconductores de potencia.
d) Calcular el valor medio y eficaz de la intensidad por cada uno de los dispositivos.
e) Sabiendo que tanto los diodos como los IGBT presentan el mismo equivalente eléctrico en conducción (representado en la figura), y que las pérdidas por conmutación son despreciables, calcule las pérdidas en todos los dispositivos.
f) Calcule si sería posible, y en caso afirmativo conveniente, sustituir los IGBT por MOSFET de $R_{DSon} = 100\ m\Omega$
g) Comente brevemente qué repercusión tendría un incremento en el cos φ de la carga sobre las potencias activa y reactiva consumidas por la carga.

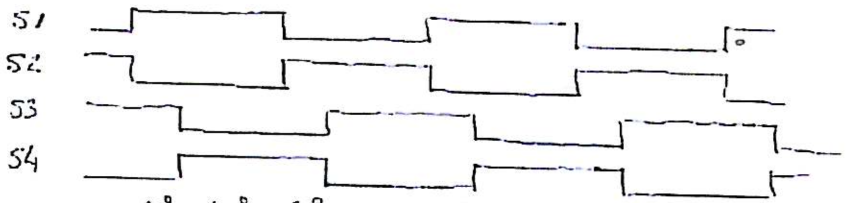




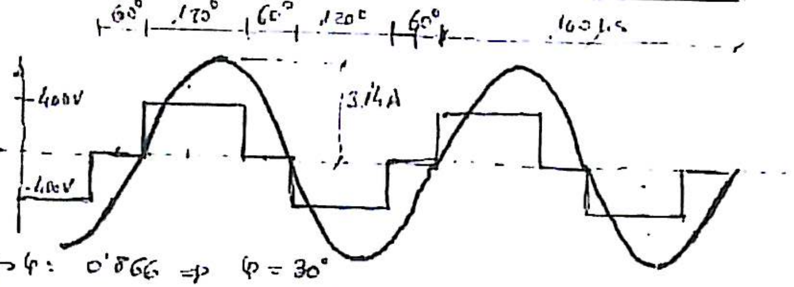
CEI UPM

Problema

a)



b)



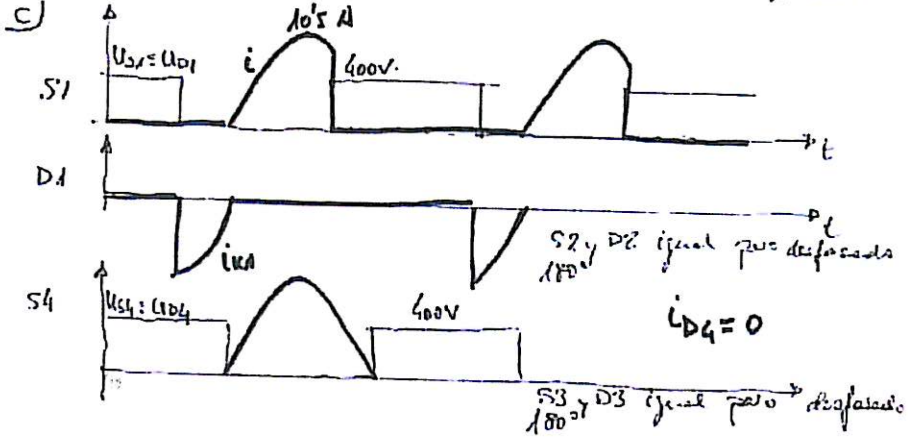
$U_{ef} = 326,4\,V.$

$\cos\varphi = 0'866 \Rightarrow \varphi = 30°$

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u\,i\,dt = \frac{1}{\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{3}} 400\cdot I_p\cdot \sin\omega t\; d\omega t = 2kW$$

$$2kW = \frac{400\cdot I_p}{\pi}\cdot\left[-\cos\omega t\right]_0^{2\pi/3} = \frac{400\,I_p}{\pi}\cdot\left(1+\frac{1}{2}\right) \Rightarrow \boxed{I_p = 10'5A}$$

c)



Problema

d) $I_{S1} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi/3} 10'5 \cdot \operatorname{sen}\omega t \, d\omega t = \frac{10'5}{2\pi}\left[1 + \cos\frac{2\pi}{3}\right] = \frac{10'5}{4\pi}\cdot 3$

$\boxed{I_{S1} = 2'5A = I_{S2}}$

$i_{ef\,S1} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi/3} 10'5^2 \operatorname{sen}^2\omega t \, d\omega t} = \sqrt{\frac{10'5^2}{2\pi}\cdot\frac{1}{2}\left[\frac{2\pi}{3}+\frac{\sqrt{3}}{4}\right]} = 4'7A$

$\boxed{i_{ef\,S1} = i_{ef\,S2} = 4'7A.}$ $\quad i_{ef\,D1} = \sqrt{\frac{10'5^2}{2\pi}\cdot\frac{1}{2}\left[\frac{\pi}{3}-\frac{\sqrt{3}}{4}\right]}$

$\boxed{I_{D1} = I_{D2} = \frac{10'5}{\pi} - 2'5 = 0'84A}$ $\boxed{i_{ef\,D1} = i_{ef\,D2} = 2'32}$

$I_{S4} = I_{S3} = \frac{10'5}{\pi} = 3'3A$

$i_{ef\,S4} = i_{ef\,S3} = \frac{10'5}{\sqrt{2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{2}} = \boxed{5'25A}$

$\boxed{I_{D3} = I_{D4} = i_{ef\,D3} = i_{ef\,D4} = 0}$

e) $P = I \cdot V_{codo} + i_{ef}^2 \cdot r_d = I \cdot 1V + i_{ef}^2 \cdot 10\,m\Omega$

$= I + 0'01\, i_{ef}^2$

$P_{S1} = P_{S2} = 2'547$

$P_{S3} = P_{S4} = 3'35$

$P_{D1} = P_{D2} = 0'86$

$P_{D3} = P_{D4} = 0$

f) Los niveles de intensidad son aceptables para un MOSFET

Calculamos las pérdidas.

$P_{S1} = P_{S2} = i_{ef}^2\, R_{DSon} = 4'7^2 \cdot 0'1 = 2'2\,W$

$P_{S3} = P_{S4} = \quad " \quad = 5'25^2 \cdot 0'1 = 2'7\,W$ } sí conviene.

Problema 7.19

PROBLEMA 7.19 El inversor de la Figura 7.19.1 emplea la técnica PWM bipolar para generar una tensión alterna cuyo armónico fundamental es de 100 Hz y se aplica a una carga inductiva. El índice de modulación de frecuencia es $m_f = 200$ y el índice de modulación de amplifud $m_a = 0{,}5$.
Suponiendo que los semiconductores del circuito son ideales:

1) Dibujar la forma de onda de la tensión de salida e indicar cómo se disparan los IGBT del circuito.
2) Calcular y dibujar el primer armónico de la corriente por la carga, indicando por qué semiconductores circula.

$V_G = 400$ V; $R = 20\ \Omega$; $L = 0{,}1$ H

15
0 1 C

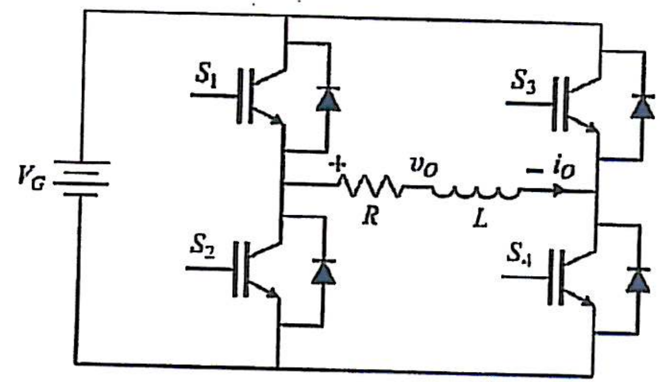


FIGURA 7.19.1 Inversor monofásico en puente completo que alimenta a una carga RL.

Problema 7.19

SOLUCIÓN

Apartado 1)

De forma aproximada, la tensión de salida, v_O, es la indicada:

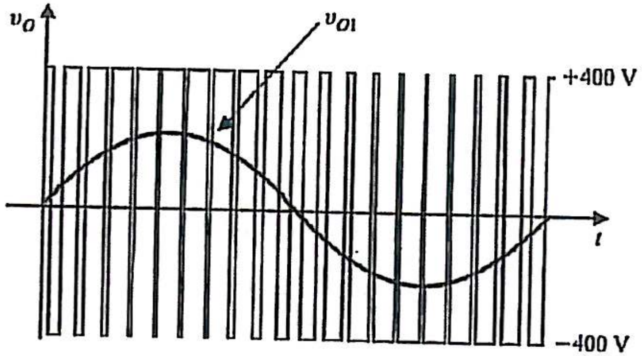


FIGURA 7.19.2 Tensión de salida del inversor, v_O, primer armónico de la tensión de salida, v_{O1}.

La amplitud del primer armónico de la tensión de salida se puede calcular a partir de m_a, de forma que:

$$V_{O1p} = V_G \cdot m_a = 400\ \text{V} \cdot 0{,}5 = 200\ \text{V}$$

Problema 7.19

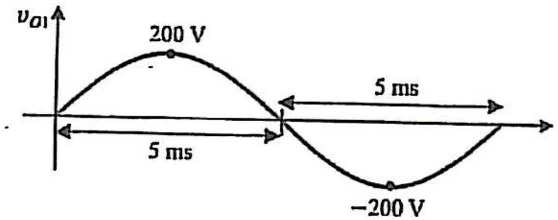


FIGURA 7.19.3 Primer armónico de la tensión de salida, v_{O1}.

Los IGBT se disparan por parejas, de modo que el disparo de los transistores S_1 y S_4 produce una v_O positiva (en valor instantáneo), mientras que S_2 y S_3 producen v_O negativa. La secuencia de disparo de estas dos parejas se obtiene en el circuito de control a partir de la comparación de una referencia sinusoidal de 100 Hz de frecuencia y una señal triangular de frecuencia m_f veces la frecuencia de la sinusoidal (en este caso de 20 kHz). La evolución de los disparos es tal que el valor medio de V_O va describiendo la sinusoide anteriormente dibujada.

Apartado 2)

La impedancia de la carga a 100 Hz es:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{20^2 + (2\pi \cdot 100)^2 \cdot 0{,}1^2} \approx 66\ \Omega$$

por tanto, el valor de pico del primer armónico de la corriente será:

$$I_{O1p} = \frac{V_{O1p}}{Z} = \frac{200\ \text{V}}{66\ \Omega} = 3\ \text{A}$$

y el desfase:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R} = \operatorname{arctg} \frac{2\pi \cdot 100 \cdot 0{,}1}{20} = 72^\circ$$

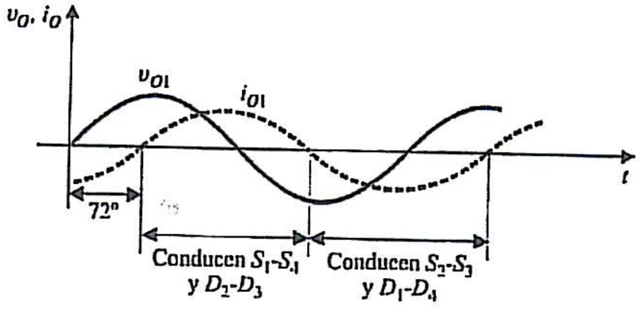


FIGURA 7.19.4 Primer armónico de la tensión de salida, v_{O1}, y primer armónico de la corriente por la carga, i_{O1}.

Enunciado. Problema 7.2.

En el circuito de la Figura 7.2.1, $R = 20\ \Omega$ y $L = 50$ mH. Los transistores se controlan para generar una onda de tensión cuadrada de 100 Hz de frecuencia (siendo T su periodo), de manera que:

$$0 \leqslant t \leqslant T/2 \;\Rightarrow\; S_1 \text{ ON}, \qquad S_2 \text{ OFF}$$
$$T/2 \leqslant t \leqslant T \;\Rightarrow\; S_1 \text{ OFF}, \qquad S_2 \text{ ON}$$

16
DIC.

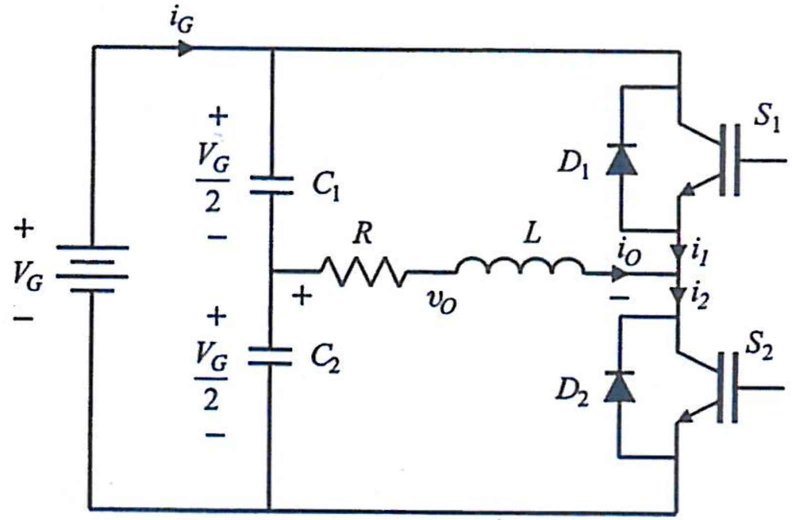


FIGURA 7.2.1 Inversor monofásico en medio puente que alimenta a una carga *RL*.

Se pide:

1) Dibujar, cualitativamente, la tensión y la corriente en la carga, i_O.
2) ¿Cuánto vale V_G si el valor eficaz de la componente fundamental de la tensión en la carga es 220 V?
3) Calcular, aproximadamente, la potencia media que se consume en la carga.
4) Calcular, aproximadamente, la corriente media de las baterías, I_{Gm}.
5) ¿Cuánto valen las corrientes máximas por los semiconductores?

Solución. Problema 7.2

Apartado 1)

En la Figura 7.2.2 se representan las formas de onda de la tensión de salida del inversor, v_O, y de la corriente en la carga, i_O.

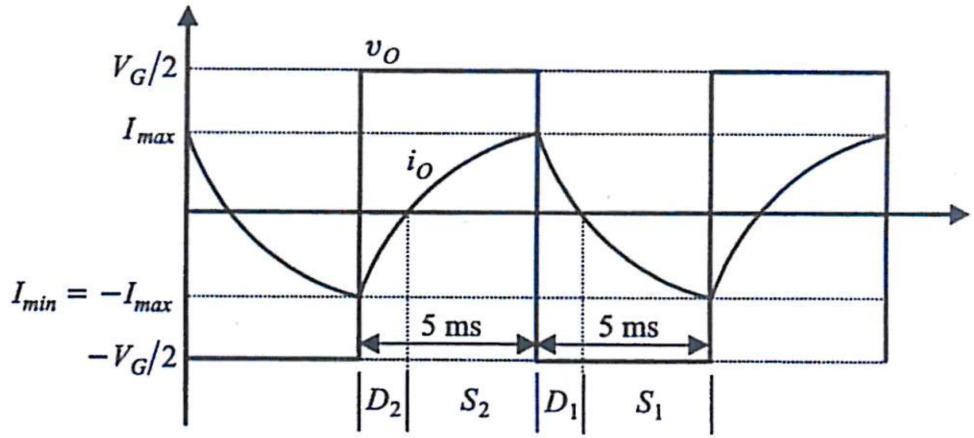


FIGURA 7.2.2 Formas de onda de la tensión de salida del inversor, v_O, y de la corriente en la carga, i_O.

El inversor aplica a la carga una forma de onda cuadrada, con ciclo de trabajo 0,5 y cuyos valores máximos coinciden con la tensión en los condensadores C_1 y C_2. Cuando la carga *RL* recibe tensión continua positiva, su corriente crece de forma exponencial, con una constante de tiempo $\tau = L/R$, desde el valor I_{min} hasta el valor I_{max}.

Durante el intervalo en que tanto v_O como i_O son positivas, conduce el IGBT S_2. A partir del instante en que se apaga S_2, y puesto que la corriente i_O no puede variar bruscamente de valor, la conducción se establece a través de D_1, pasando a conducir S_1 cuando v_O e i_O se hacen negativas.

CEI UPM

POLITÉCNICA

Solución. Problema 7.2

Apartado 2)

La tensión v_O puede describirse matemáticamente mediante la serie de Fourier que se recoge en (7.2.1):

$$v_O(t) = \frac{4}{\pi}\frac{V_G}{2}\sum_{n=1,3,5,\dots}\frac{1}{n}\,\mathrm{sen}\,(n\omega t) \qquad (7.2.1)$$

Por lo tanto, el valor eficaz del armónico enésimo viene dado por (7.2.2):

$$V_{O n ef} = \frac{2V_G}{\pi\sqrt{2}}\frac{1}{n} \qquad (7.2.2)$$

A partir de (7.2.2) se puede deducir el valor de V_G necesario para que el armónico fundamental tenga un valor eficaz de 220 V.

$$V_G = 220\ \mathrm{V}\,\frac{\pi\sqrt{2}}{2} = 488{,}72\ \mathrm{V} \qquad (7.2.3)$$

Solución. Problema 7.2

Apartado 3)

La potencia consumida en la carga viene dada por (7.2.4):

$$P = I_{O\,ef}^2 \cdot R \tag{7.2.4}$$

El valor eficaz de la corriente por la carga, puede calcularse aplicando el principio de superposición, ya que la carga RL es lineal. El valor eficaz de cada armónico de corriente puede obtenerse como el cociente entre el valor eficaz de cada armónico de la tensión v_O entre la impedancia qué, a esa frecuencia presenta la carga RL. Este proceso se recoge en (7.2.5):

$$I_{O\,ef}^2 = \sum_{n=1,3,5,\ldots} I_{O\,n}^2$$

$$I_{O\,n} = \frac{V_{O\,n}}{Z_n}$$

$$V_{O\,n} = \frac{2 \cdot V_G}{n\pi\sqrt{2}}$$

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (n\omega_1 L)^2} \tag{7.2.5}$$

Sustituyendo los valores del enunciado se obtiene:

$$V_{O\,1} = 220 \text{ V} \Rightarrow I_{O\,1} = \frac{220 \text{ V}}{\sqrt{20\ \Omega^2 + (200 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^{-3}\ \Omega)^2}} = 5{,}9073 \text{ A} \Rightarrow I_{O\,1}^2 = 34{,}8965 \text{ A}^2$$

$$V_{O\,3} = \frac{220 \text{ V}}{3} = 73{,}333 \text{ V} \Rightarrow I_{O\,3} \frac{73{,}333 \text{ V}}{\sqrt{20\ \Omega^2 + (200 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^{-3}\ \Omega)^2}} = 0{,}7611 \text{ A} \Rightarrow I_{O\,3}^2 = 0{,}5793 \text{ A}^2 \tag{7.2.6}$$

Comparando los valores eficaces del primer y tercer armónico, se deduce que la serie de Fourier puede ser truncada de manera que se considere únicamente el primer armónico. Por tanto, la potencia puede calcularse de forma aproximada por:

$$I_{O\,ef}^2 \approx I_{O\,1}^2 = 34{,}8865 \text{ A}$$

$$P = 34{,}8865 \cdot 20 = 697{,}9291 \text{ W} \tag{7.2.7}$$

Si se considera también el tercer armóncio:

$$P = ((6{,}01 \text{ A})^2 + (0{,}7611 \text{ A})^2) \times 20\ \Omega = 734 \text{ W}$$

lo que supone un error de un 4,9%.

Solución. Problema 7.2

Apartado 4)

La potencia media que consume la carga, P_O, la suministran las baterías, P_G, ya que los condensadores no consumen potencia media. Esto se recoge en (7.2.8):

$$\begin{aligned} P_G &= P_O \\ P_G &= V_G \cdot I_{Gm} \end{aligned} \tag{7.2.8}$$

por tanto, el valor de la corriente media que ceden las baterías, I_{Gm}, viene dado por (7.2.9):

$$I_{Gm} = \frac{P}{V_G} = \frac{697{,}9291\ \text{W}}{488{,}7171\ \text{V}} = 1{,}4281\ \text{A} \tag{7.2.9}$$

Solución. Problema 7.2

Apartado 5)

Según la Figura 7.2.2, las corrientes máximas en los diodos y los transistores son: $I_{S\,max} = I_{max}$ e $I_{D\,max} = I_{max}$; de manera que el cálculo de las corrientes máximas en los semiconductores se reduce al cálculo de la corriente en la carga para $t = T/2$.
En cada semiperiodo, la corriente en la carga es una exponencial de valor inicial I_{min} (I_{max}) y valor final $V_G/2R(-V_G/2R)$. Por tanto,

$$i_O = \begin{cases} \dfrac{V_G}{2R} + \left(I_{min} - \dfrac{V_G}{2R}\right)e^{-t/\tau} & \text{para } 0 \leqslant t \leqslant \dfrac{T}{2} \\ -\dfrac{V_G}{2R} + \left(I_{max} + \dfrac{V_G}{2R}\right)e^{-(t-T/2)/\tau} & \text{para } \dfrac{T}{2} \leqslant t \leqslant T \end{cases} \quad \left(\tau = \frac{L}{R} = 2{,}5 \text{ ms}\right) \tag{7.2.10}$$

Teniendo en cuenta que $I_{max} = -I_{min}$, y considerando las expresiones de i_O recogidas en (7.2.10) para cada semiciclo e igualándolas para el instante $t = T/2$, se obtiene el valor de I_{max}:

$$I_{max} = -I_{min} = \frac{V_G}{2R}\left(\frac{1-e^{-T/2\tau}}{1+e^{-T/2\tau}}\right) = \frac{488{,}7171 \text{ V}}{2 \cdot 20\ \Omega}\left(\frac{1-e^{-5/(2\cdot 5)}}{1+e^{-5/(2\cdot 5)}}\right) = 9{,}305 \text{ A}$$

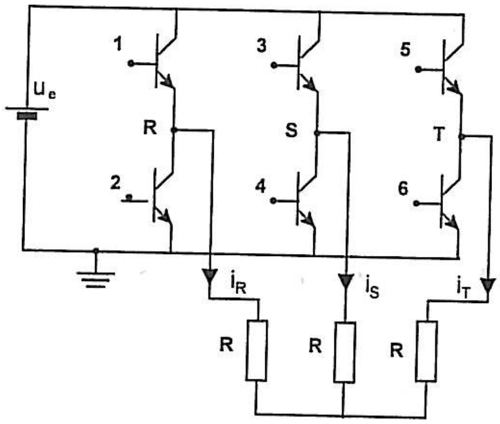
$$I_{S\,max} = I_{D\,max} = 9{,}305 \text{ A} \tag{7.2.11}$$

EX. C. INDUSTRIAL
ING. ELECTR.
19/9/2006

PROBLEMA 3. (4 puntos)

El inversor trifásico de la figura, alimenta a una carga resistiva, conectada en estrella. Cada transistor se mantiene disparado la mitad del período y de forma que en los puntos *R*, *S* y *T*, las tensiones sean idénticas pero desfasadas 120º entre ellas. La frecuencia de las ondas de salida es de 50Hz.

13
DIC



a) Dibujar las tensiones U_R, U_S, U_T (respecto a masa) y las tensiones de línea U_{RS}, U_{ST} y U_{TR}.

b) Dibujar, indicando los valores más significativos, la corriente por la fase $R(i_R)$.

c) Suponiendo que los transistores bipolares trabajan en la zona de saturación, calcular las pérdidas en uno de ellos.

d) Calcular la potencia entregada a la carga.

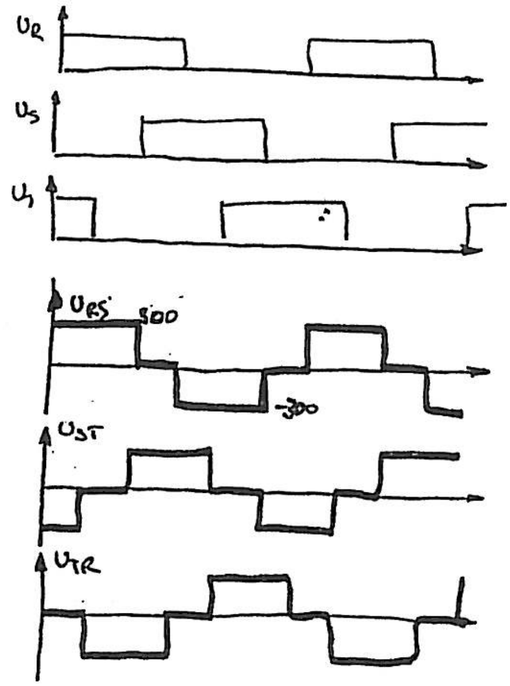
e) Si la carga se conecta en triángulo, calcular nuevamente la potencia que se entrega a la carga.

Datos:

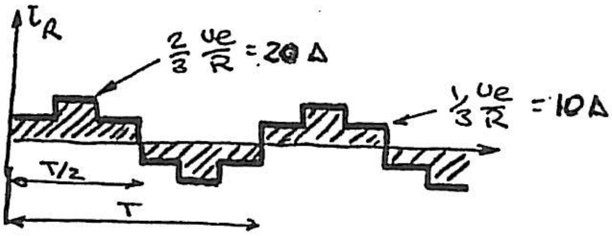
$R = 10\Omega$ $u_e = 300V$ $f = 50Hz$ $U_{CE\ SAT} = 0,5V$

PROBLEMA 3

a)

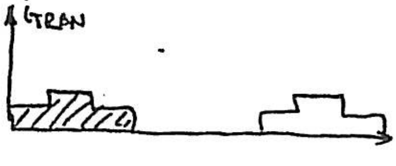


b)



c) $P = U_{CEsat} \cdot I_{TR,MED}$

$$I_{TR,MED} = \frac{1}{T}\left[2\,\frac{1}{3}\,\frac{Ue}{R}\cdot\frac{T}{6} + \frac{2}{3}\,\frac{Ue}{R}\,\frac{T}{6}\right] =$$



$$I_{TRAN,MED} = \frac{2}{9}\,\frac{Ue}{R} = 6'66\,A$$

$P = 0.5 \cdot 2\,\frac{300}{} = 3'33\,W$

d) Para calcular la potencia entregada a la carga se puede calcular la corriente media que sale de la batería

$$i_{BAT,MED} = i_{TR1,MED} + i_{TR3,MED} + i_{TR5,MED} = 3 \cdot i_{TR1,MED} = 3\,\frac{2}{9}\,\frac{U_e}{R} = \frac{2}{3}\,\frac{U_e}{R}$$

$$P_{\lambda} = U_e \cdot i_{BAT,MED} = \frac{2}{3}\,\frac{U_e}{R} \cdot U_e = 6000\,W$$

e) En triángulo, la potencia se puede calcular de forma inmediata, ya que se conocen las tensiones de línea.

$$P = 3 \cdot \frac{U_{RS,EF}^2}{R} \qquad U_{RS,EF} = 300\sqrt{2/3}$$

$$\Rightarrow P_{\Delta} = 18000\,W$$