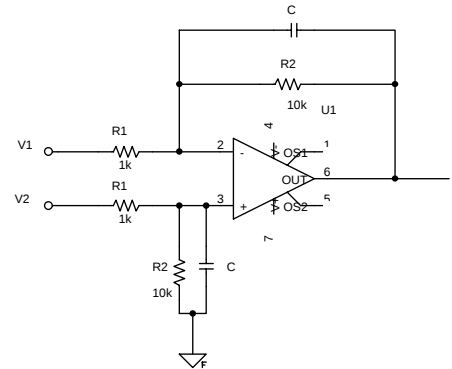


Primer ejercicio

Para el amplificador diferencial de la figura determine:

1. Diagrama de Bode de $u_s = u_s(u_1, u_2)$ suponiendo el amplificador operacional ideal.
2. Curva de respuesta en bucle cerrado, suponiendo el amplificador operacional real y $u_1 = 0$.
3. Estabilidad del circuito y en el caso de resultar inestable sugiera como compensarlo.
4. Error máximo en continua a la salida
5. Descripción textual en PSPICE para respuesta en frecuencia.

Datos



$$AO : A_{do}(0) = 80 \text{ dB}; f_{p1} = 100 \text{ Hz}; f_{p2} = 100 \text{ kHz}; V_{IO} = 1 \text{ mV}; I_{IB} = 1 \mu\text{A}; I_{IO} = 100 \text{ nA}$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega; R_2 = 10 \text{ k}\Omega; C = 100 / (2\pi) \text{ nF}$$

Segundo ejercicio

Se quiere controlar la temperatura de un depósito aprovechando la dependencia de la caída de tensión en una unión PN de la temperatura. Para ello se utiliza un transistor conectado como se muestra en la figura 1. Las características de la respuesta de este circuito se dan al final de este enunciado. El rango de temperatura del depósito va desde los 248 K a los 348 K, y, dado el volumen del depósito, las componentes del espectro de la señal son prácticamente despreciables por encima de los 10 Hz. La salida del sensor se quiere adaptar para su digitalización por medio de un CAD. Se pide:

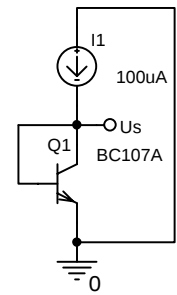


Figura 1

1. Si el rango de entrada del convertidor es de 0 V a 10 V, diseñar el circuito de adaptación necesario, indicando los valores de todos los componentes empleados.
2. Para minimizar el efecto de las perturbaciones, se quiere restringir al máximo la banda pasante del circuito. En concreto, se quiere que las frecuencias iguales o superiores a 50 Hz sean atenuadas un mínimo de 40 dB. Elegir el tipo de filtro más adecuado, establecer su plantilla y diseñarlo, indicando el valor de todos sus componentes.
3. Si se quiere una precisión de 0,1 K en la lectura del convertidor, determinar el número de bits necesarios.
4. La señal, una vez adaptada y filtrada, se emplea también en un control todo-nada con una característica entrada-salida como la mostrada en la figura 2. Diseñar un circuito con dicha característica, indicando el valor de todos sus componentes.
5. Dibuje el esquema eléctrico resultante de interconectar todas las etapas diseñadas en los apartados anteriores.

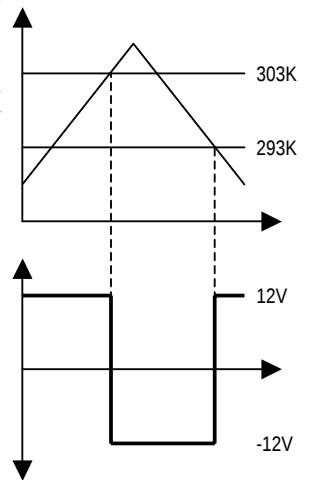


Figura 2

Datos:

Tensión de alimentación: $\pm 12 \text{ V}$

$$\frac{du_{be}}{dT} = -1,94 \frac{\text{mV}}{\text{K}} \quad u_{be}(298 \text{ K}) = 608,25 \text{ mV}$$

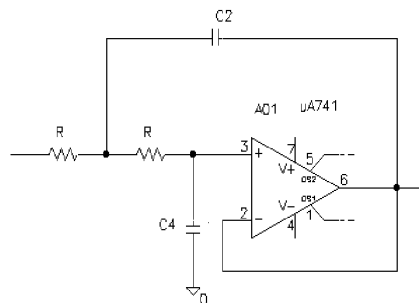
$$D = \frac{10^{0,1 \times A_{\min}} - 1}{10^{0,1 \times A_{\max}} - 1}$$

Butterworth

TChebyshev

$$n \geq \frac{\log D}{2 \log \frac{1}{k}}$$

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{D}}{\cosh^{-1} \frac{1}{k}}$$



$$A_0 = 1$$

$$\omega_0 = \frac{1}{R \sqrt{C_2 C_4}}$$

$$Q = \frac{1}{2 \sqrt{\frac{C_4}{C_2}}}$$



n	$D(s)$
1	$s+1$
2	$s^2+1.41s+1$
3	$(s+1)(s^2+s+1)$
4	$(s^2+0.76s+1)(s^2+1.85s+1)$
5	$(s+1)(s^2+0.62s+1)(s^2+1.62s+1)$
6	$(s^2+0.52s+1)(s^2+1.42s+1)(s^2+1.93s+1)$

Polinomios de Butterworth

n	$N(s)$	$D(s)$	ω_c
1	1.96	$(s+1.96)$	1
2	0.98	$(s^2+1.09s+1.10)$	1.12
3	0.49	$(s+0.49)(s^2+0.49s+0.99)$	1.09
4	0.25	$(s^2+0.67s+0.28)(s^2+0.27s+0.99)$	1.05
5	0.12	$(s+0.28)(s^2+0.46s+0.42)(s^2+0.18s+0.98)$	1.02
6	0.061	$(s^2+0.12s+0.99)(s^2+0.34s+0.55)(s^2+0.46s+0.13)$	1.023

Polinomios de TChebyshev

Tercer ejercicio

Se pretende controlar la velocidad de un motor de CC a través de la tensión aplicada a su estator. Para ello se va a utilizar un rectificador controlado de media onda conectado a una red hexafásica de 380 V. La inductancia del devanado del estator es tan grande que se puede considerar que la corriente a su través es constante. Se pide:

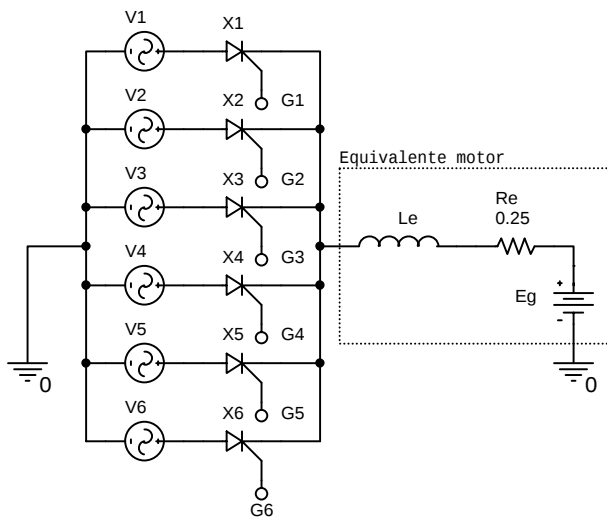
1. Dibujar durante 20 ms las tensiones de fase, las corrientes de fase y la tensión sobre la carga para un ángulo de disparo de 30° y un par de 30 N·m. Indicar los valores instantáneos más significativos.
2. Calcular la tensión media en función del ángulo de disparo α .
3. Calcular el ángulo de disparo necesario para mantener el motor a 1500 rpm a la vez que genera un par de 30 N·m.
4. Establecer la tensión inversa máxima que tienen que soportar los tiristores.
5. Calcular la resistencia térmica de los disipadores necesarios para que el rectificador pueda trabajar por tiempo indefinido a una temperatura ambiente máxima de 70°C suministrando un par de 60 N·m.

Despreciese la caída de tensión en los tiristores en todos los apartados salvo el último.

Fórmulas del motor de CC (todos los valores son medios):

$$E_g = 1,05 \frac{V \cdot s}{\text{rad}} \times \omega \quad V$$

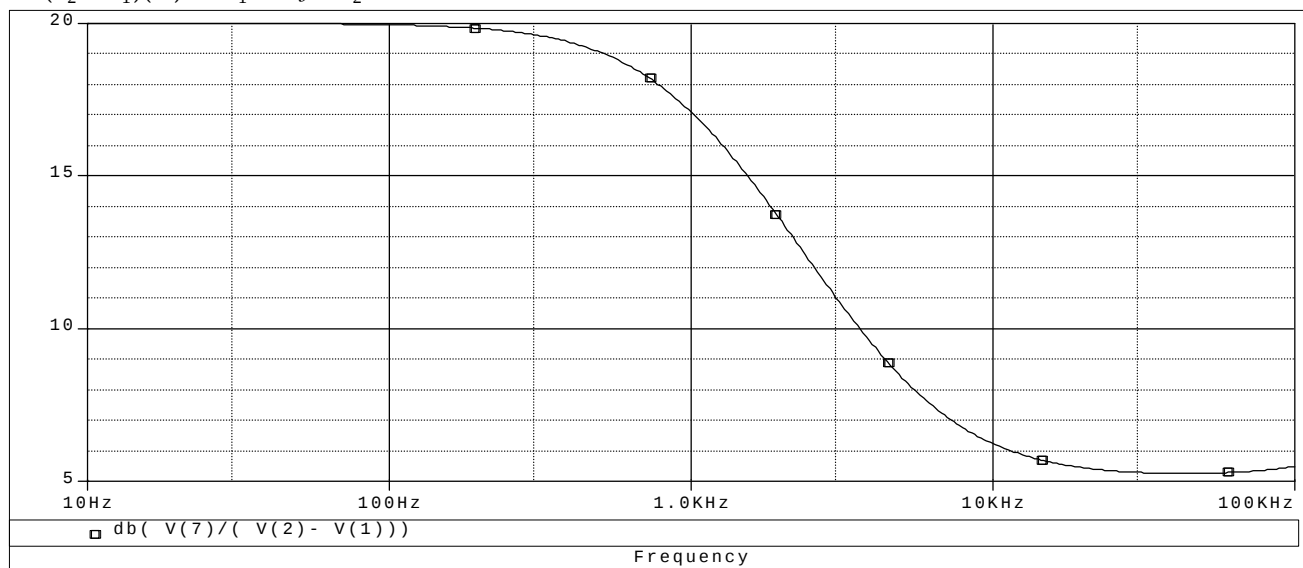
$$M = 1,05 \frac{N \cdot m}{A} \times I_{\text{estator}} \quad N \cdot m$$



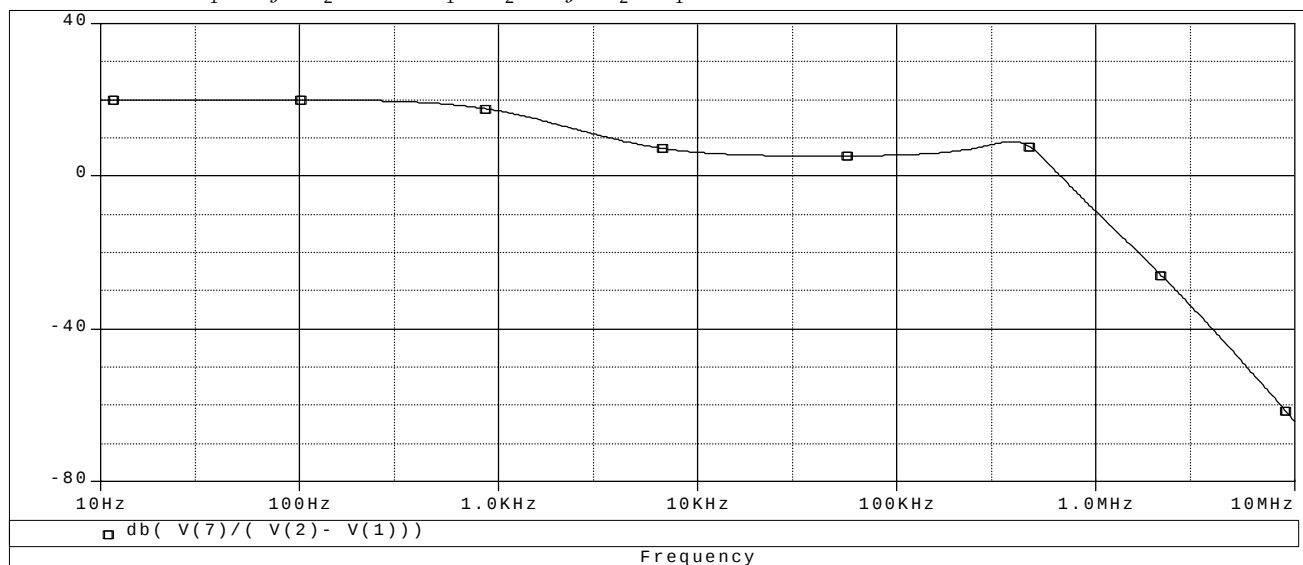
Características tiristores	
Tensión de codo (V_T)	1 V
Resistencia dinámica (r_d)	12 mΩ
Temperatura máx. de la unión ($T_{j\max}$)	125 °C
Resistencia térmica unión-encapsulado ($R_{\theta jc}$)	1,1 K/W
Resistencia térmica encapsulado-disipador ($R_{\theta cs}$)	0,5 K/W

Resolución de examen**Primer ejercicio**

$$1. \frac{u_s(\omega)}{(u_2 - u_1)(\omega)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_2 C}$$



$$2. A_v(Ideal) = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_2 C}; \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1 + j\omega R_2 C}{1 + j\omega R_2 // R_1 C}$$



3. MF < 45. Habrá de cambiar el operacional de forma que tenga el segundo polo por debajo de los 0dB.

$$4. V_s = \frac{A_{do}(0)}{1 + A_{do}(0) \frac{R_1}{R_1 + R_2}} (V_{IO} + I_{IO} R_1 // R_2) \cong 10mV$$

5.

Descripción textual del amplificador diferencial (Junio01)

R1	1	3	1k
R2	2	4	1k
R3	4	0	10k
R4	3	7	10k
C1	3	0	15.9n



```

C2      3      7      15.9n
XAO1    4      3      5      6      7      uA741
VCC     5      0      DC      15
VEE     6      0      DC      -15
V1      1      0      AC      0
V2      2      0      AC      1
.LIB    NOM.LIB
.AC     DEC    100    10      10MEG
.PROBE
.END

```

Segundo ejercicio

1. La tensión de salida del sensor disminuye linealmente con la temperatura según:

$$u_s(T) = u_{be}(T) = 608,25 \text{ mV} - 19,4 \frac{\text{mV}}{\text{K}} \times (T - 298 \text{ K}),$$

Para que a la salida de la etapa de acondicionamiento se obtenga el rango de variación que pide el enunciado es necesario sumar un valor constante para desplazar el origen y amplificar la señal para ajustar la pendiente. Por otro lado, el circuito de adaptación debe tener una impedancia de entrada elevada, ya que, si no, una parte importante de la corriente se desvía a través de él y la medida queda afectada. Un circuito que reúne todas estas características (restar, amplificar y alta impedancia de entrada) es el amplificador de instrumentación. Puesto que la pendiente de la señal es negativa y se desea una pendiente positiva, la señal del sensor se introduce por la entrada inversora. La ganancia y el valor constante necesarios se obtendrán de:

$$\left. \begin{aligned} u_s(248 \text{ K}) &= 705,25 \text{ mV} \\ u_s(348 \text{ K}) &= 511,25 \text{ mV} \\ 0 \text{ V} &= A_d \times (U_{\text{off}} - 705,25 \text{ mV}) \\ 10 \text{ V} &= A_d \times (U_{\text{off}} - 511,25 \text{ mV}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} A_d &= 51,54 \\ U_{\text{off}} &= 705,25 \text{ mV} \end{aligned}$$

Para generar U_{off} se emplea un divisor de tensión conectado a la alimentación positiva:

$$705,25 \text{ mV} = 12 \text{ V} \times \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} \Rightarrow R_{11} = 16,015 \cdot R_{12} \Rightarrow \begin{cases} R_{12} = 500 \Omega \\ R_{11} = 8 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

Elegimos $R_{11} = 8,2 \text{ k}\Omega$ y para R_{12} empleamos un potenciómetro de $1 \text{ k}\Omega$ que permita el ajuste fino de la tensión. En cuanto al amplificador, le damos a todas las resistencias, excepto a la que determina la ganancia, un valor de $10 \text{ k}\Omega$; para ésta última empleamos un potenciómetro de $1 \text{ k}\Omega$ que permita el ajuste fino ($a = 0,039573$).

2. Del enunciado se desprende que se necesita un filtro paso-bajo con las siguientes características:

$$f_b = 10 \text{ Hz} \quad f_s = 50 \text{ Hz} \quad A_{\text{min}} = 40 \text{ dB} \quad k = f_b / f_s = 0,2$$

Estudiamos el orden del filtro necesario:

$$\begin{aligned} \text{Butterworth: } D &= \frac{10^{0,1 \times 40} - 1}{10^{0,1 \times 3} - 1} = 10046,6 \quad n \geq \frac{\log 10046,6}{2 \log 5} = 2,86 \quad n = 3 \\ \text{TChebyshev: } D &= \frac{10^{0,1 \times 40} - 1}{10^{0,1 \times 1} - 1} = 38617,3 \quad n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{38617,3}}{\cosh^{-1} 5} = 2,6 \quad n = 3 \end{aligned}$$

A igualdad de orden, elegimos Butterworth, porque introduce una distorsión menor en la señal. Entonces:



$$G_{pb}(s_n) = \frac{1}{s_n^2 + s_n + 1} \cdot \frac{1}{s_n + 1} \Rightarrow G_{pb}(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{20\pi}\right)^2 + \frac{s}{20\pi} + 1} \cdot \frac{1}{\frac{s}{20\pi} + 1}$$

Bloque de 2º orden:

$$\left. \begin{aligned} \omega_0 &= \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_3}} = 20\pi \text{ rad/s} \\ Q &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_3}} = 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} C_1 &= 4C_3 \\ R &= \frac{1}{2\omega_0 C_3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} C_3 &= 56 \text{ nF} \\ C_1 &= 220 \text{ nF} \\ R_7 = R_6 &= 142 \text{ k}\Omega \approx 150 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Bloque de 1º orden:

$$\omega_0 = \frac{1}{R_4 C_2} = 20\pi \text{ rad/s} \Rightarrow R_4 C_2 = 0,016 \Rightarrow \begin{aligned} C_2 &= 330 \text{ nF} \\ R_4 &= 48 \text{ k}\Omega \approx 47 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

3.

$$\left. \begin{aligned} MD_{sist} &= \frac{348 \text{ K} - 248 \text{ K}}{0,1 \text{ K}} = 1000 \\ MD_{CAD} &= \frac{1}{2^{-n}} \\ MD_{CAD} &\geq MD_{sist} \end{aligned} \right\} \Rightarrow 2^n \geq MD_{sist} \Rightarrow n \geq \log_2 MD_{sist} = 9,96 \Rightarrow n = 10 \text{ bits}$$

4. A la vista de la grafica de la figura 2, se deduce que el circuito necesario es un comparador con histéresis. Entonces:

$$\left. \begin{aligned} u^-(293\text{K}) &= \frac{10 \text{ V} - 0 \text{ V}}{348 \text{ K} - 248 \text{ K}} \times (293 \text{ K} - 248 \text{ K}) = 4,5 \text{ V} \\ u^-(303\text{K}) &= \frac{10 \text{ V} - 0 \text{ V}}{348 \text{ K} - 248 \text{ K}} \times (303 \text{ K} - 248 \text{ K}) = 5,5 \text{ V} \\ u^+(303\text{K}^-) &= \frac{G_{13} \times 12 \text{ V} + G_{14} \cdot U_{ref}}{G_{13} + G_{14}} = 5,5 \text{ V} \\ u^+(293\text{K}^+) &= \frac{G_{13} \times (-12 \text{ V}) + G_{14} \cdot U_{ref}}{G_{13} + G_{14}} = 4,5 \text{ V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} R_{13} &= 23R_{14} \\ U_{ref} &= 5,2174 \text{ V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} U_{ref} &= 5,2174 \text{ V} \\ R_{13} &= 180 \text{ k}\Omega \\ R_{14} &= 7,8 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

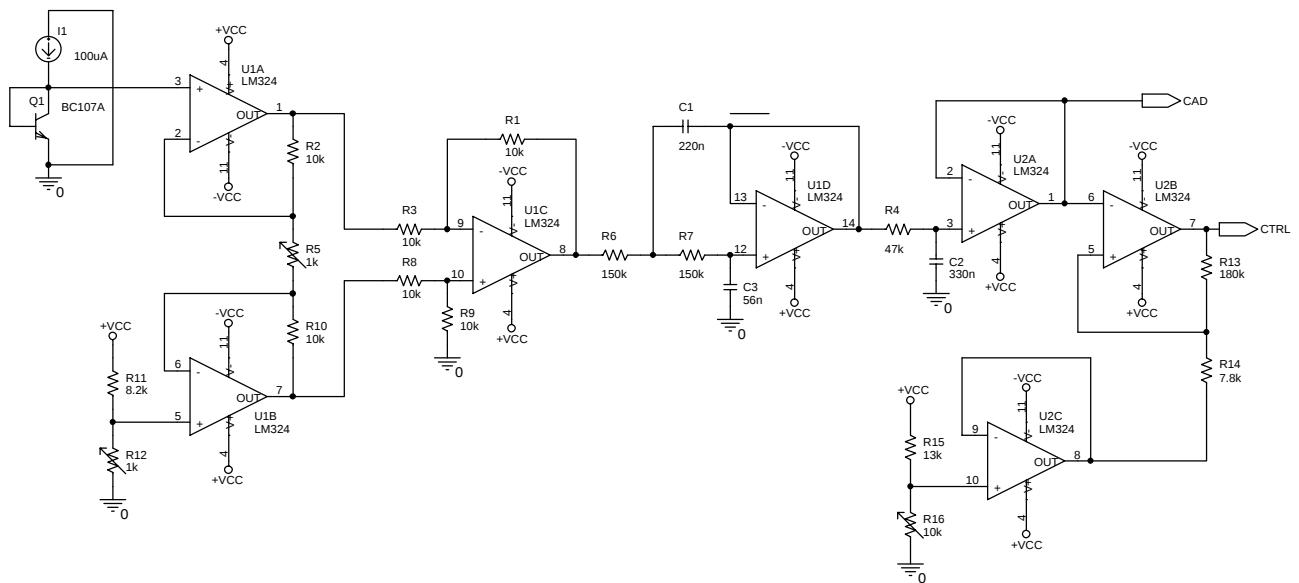
Para obtener la tensión de referencia, U_{ref} , se emplea un divisor de tensión y, para que el valor de las resistencias del comparador no influya en el cálculo, un seguidor de emisor:

$$5,2174 \text{ V} = 12 \text{ V} \times \frac{R_{16}}{R_{15} + R_{16}} \Rightarrow R_{15} = 2,3 \cdot R_{16} \Rightarrow \begin{cases} R_{16} = 5 \text{ k}\Omega \\ R_{15} = 11,5 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

Elegimos $R_{15} = 12 \text{ k}\Omega$ y para R_{16} empleamos un potenciómetro de $10 \text{ k}\Omega$ que permita el ajuste fino de la tensión.

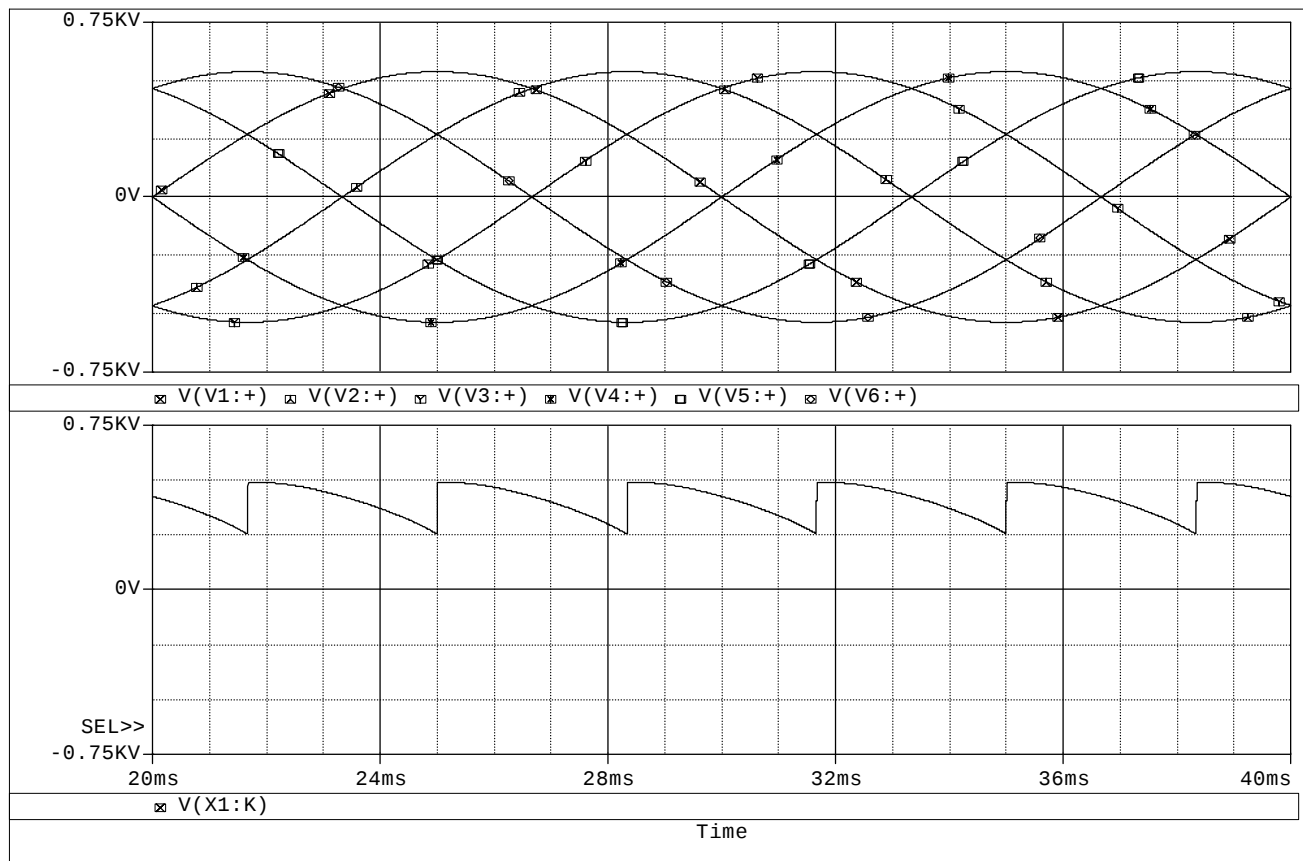


5.



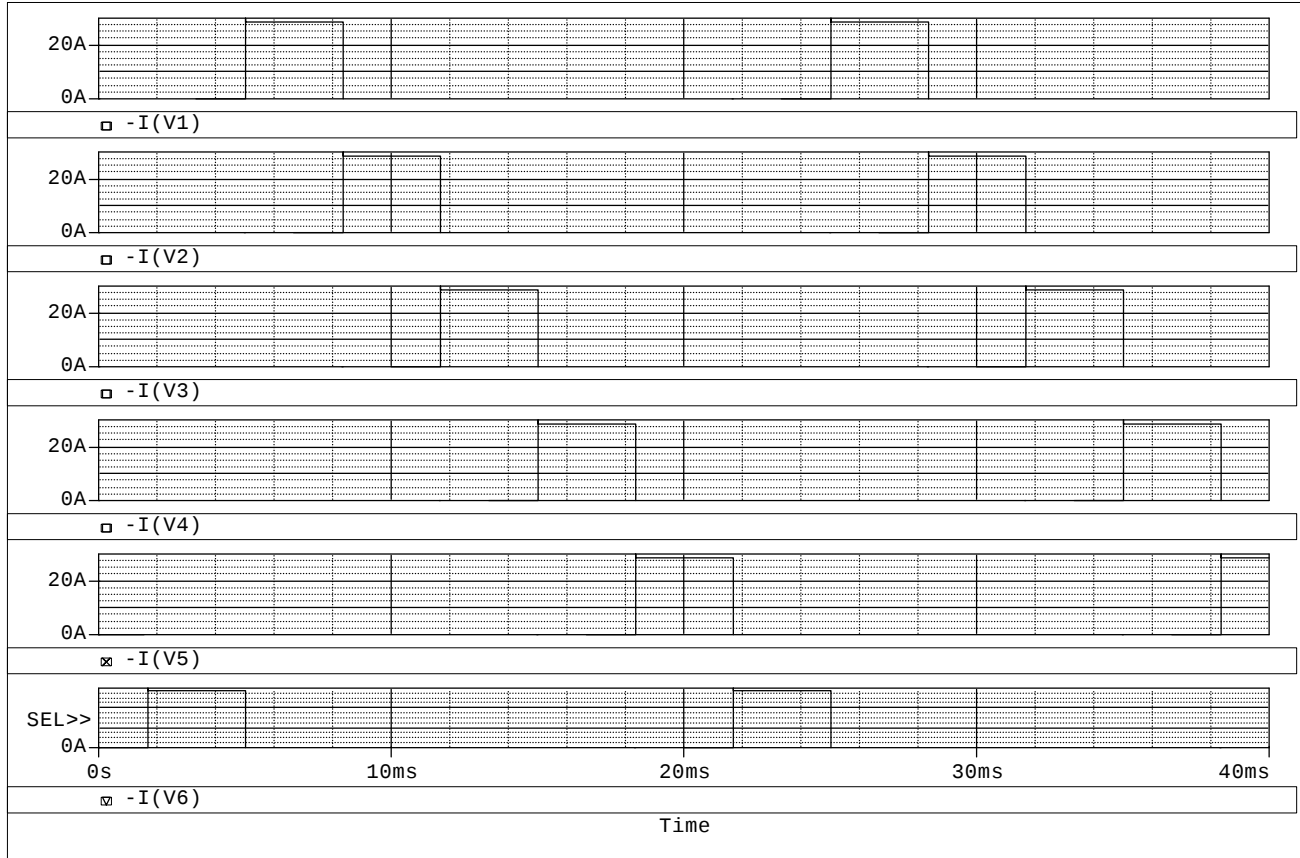
Tercer ejercicio

1.



El valor de pico de la tensión de fase y los valores máximo y mínimo de la tensión sobre la carga son:

$$U_{carga\ max} = \hat{U} = 380\sqrt{2}\ \text{V} = 537,4\ \text{V} \quad U_{carga\ min} = 380\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{6}\ \text{V} = 268,7\ \text{V}$$



La corriente por los tiristores será: $\bar{I}_e = \frac{30\ \text{N} \cdot \text{m}}{1,05 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}}} = 28,57\ \text{A}$

2.

$$\bar{U}_{carga} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\theta) \cdot d\theta = \frac{6}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \hat{U} \cos \theta \cdot d\theta = \frac{6\hat{U}}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha = \frac{6 \times 380\sqrt{2}\ \text{V}}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos \alpha = 513,18 \cos \alpha\ \text{V}$$

3.

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_g &= 1,05 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{rad}} \times \frac{1500\ \text{rpm} \times 2\pi\ \text{rad}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 164,93\ \text{V} \\ \bar{I}_e &= \frac{30\ \text{N} \cdot \text{m}}{1,05 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}}} = 28,57\ \text{A} \\ \bar{U}_{carga} &= R_e \bar{I}_e + \bar{E}_g = 0,25\ \Omega \times 28,57\ \text{A} + 164,93\ \text{V} = 172,07\ \text{V} \\ \bar{U}_{carga} &= 513,18 \cos \alpha\ \text{V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \cos \alpha = \frac{172,07\ \text{V}}{513,18\ \text{V}} \Rightarrow \alpha = 1,23\ \text{rad} = 70,4^\circ$$



4.

Cuando el número de fase es par, siempre hay dos tensiones en contrafase (desfasadas 180°). El peor caso posible será aquel en el que el tiristor de la fase de mayor tensión esté conduciendo cuando ésta pase por su máximo, y, por tanto, todos los cátodos de los tiristores queden a esa tensión, y lo sufrirá el tiristor cuyo ánodo esté conectado a la fase de menor tensión, que estará pasando por su mínimo. Ese tiristor tendrá que soportar una tensión inversa máxima de:

$$V_{RRM} = -2 \times 380 \sqrt{2} \text{ V} = -1075 \text{ V}$$

5.

$$\left. \begin{aligned} i_T(\theta) &= \bar{I}_e = \frac{60 \text{ N} \cdot \text{m}}{1,05 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}}} = 57,14 \text{ A} \\ u_T(\theta) &= V_T + r_d i_e(\theta) = 1 \text{ V} + 0,012 \Omega \times 57,14 \text{ A} = 1,686 \text{ V} \\ \bar{P}_T &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_T(\theta) \cdot i_T(\theta) \cdot d\theta = \frac{1,686 \text{ V} \times 57,14 \text{ A}}{6} = 16,06 \text{ W} \\ R_{\theta_s} &\leq \frac{T_{jmax} - T_{amax}}{\bar{P}_T} - R_{\theta_c} - R_{\theta_{cs}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_{\theta_s} \leq \frac{125^\circ \text{C} - 70^\circ \text{C}}{16,06 \text{ W}} - 1,1 \frac{\text{K}}{\text{W}} - 0,5 \frac{\text{K}}{\text{W}} = 1,82 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

