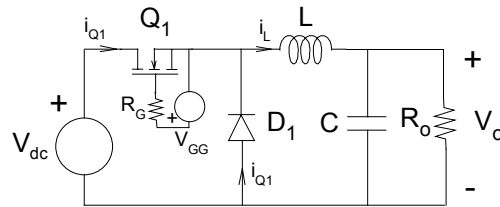
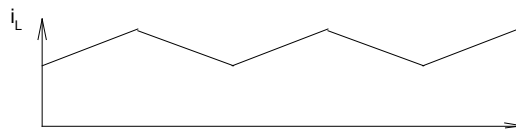




1.- Un convertidor reductor sin aislamiento tiene una frecuencia de conmutación  $f_s=100\text{kHz}$ , tensión de entrada  $V_{dc}=40\text{ V}$  y  $L=200\mu\text{H}$  con el ciclo de trabajo  $D=0,5$ . La carga varía entre  $20\Omega$  y  $800\Omega$ . Dibujar la tensión de salida en función de la carga.

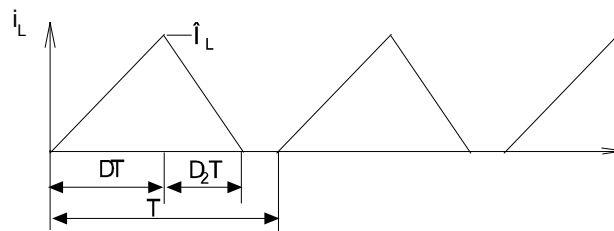


Conducción continua



$V_o = D V_{dc}$  Sin considerar pérdidas  $V_o=20\text{V}$

Conducción discontinua



$$I_p = \frac{V_{dc} - V_o}{L} DT = \frac{V_o}{L} D_2 T \quad ; \quad D_2 = D \frac{V_{dc} - V_o}{V_o}$$

$$I_o = \frac{I_p (D + D_2)}{2} \quad ; \quad I_o = \frac{1}{2} DT \frac{V_{dc} - V_o}{L} (D + D_2) \quad ; \quad V_o = I_o \cdot R_o$$

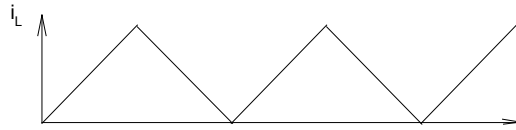
$$\frac{V_o}{R_o} = \frac{DT}{2} \frac{V_{dc} - V_o}{L} (D + D_2) \quad ; \quad V_o^2 = \frac{RD^2 T}{2L} (V_i - V_o) V_i \quad ; \quad K = \frac{RD^2 T}{2L}$$

;

$$V_o = \frac{V_{dc} K}{2} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{4}{K}} \right]$$



*Límite entre continua y discontinua*



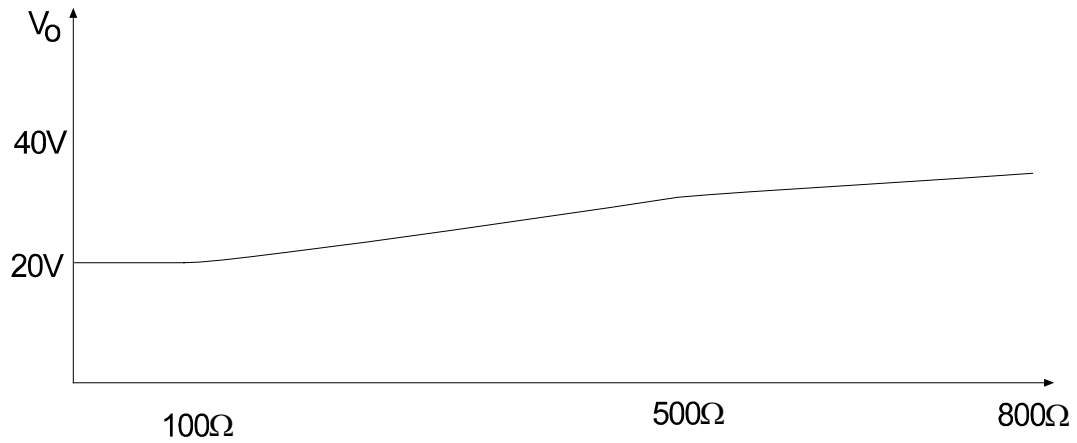
$$V_o = DV_{dc} \quad ; \quad V_{dc} - V_o = L \frac{\hat{I}}{DT} \quad ; \quad \hat{I} = 0,5A \quad ; \quad I_o = \frac{\hat{I}}{2} = 0,25A$$

$$; \quad V_o = 20V$$

Con  $R = \frac{20V}{0,25A} = 80\Omega$  existe límite entre conducción continua y discontinua.

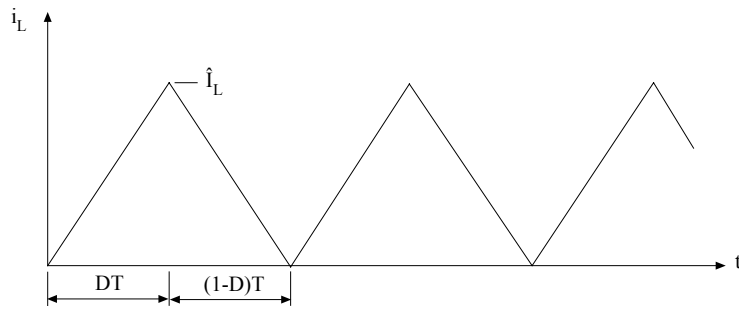
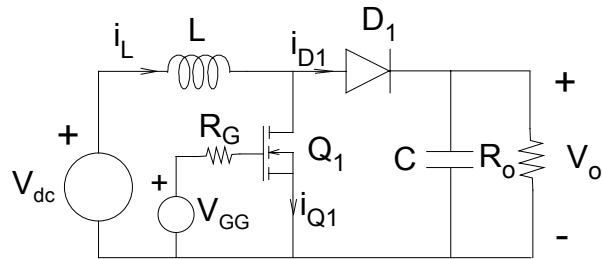
$R < 80\Omega$  conducción continua  $V_o = 20V$ ,  $R > 80\Omega$  conducción discontinua

$R = 100\Omega$ ,  $V_o = 21,5V$ ,       $R = 500\Omega$ ,  $V_o = 31,9V$ ,       $R = 800\Omega$ ,  $V_o = 34,2V$





2.- Establecer, para el convertidor elevador sin aislamiento, la relación entre el ciclo de trabajo  $D$ , la inductancia  $L$ , el periodo de conmutación  $T$  y la carga  $R$  que impone que la intensidad a través de  $L$  esté en el límite entre conducción continua y discontinua.



$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad ; \quad V_{dc} = L \frac{\hat{I}}{DT} \quad ; \quad V_{dc} - V_o = -L \frac{\hat{I}}{(1-D)T}$$

$$V_o = V_{dc} \frac{1}{1-D}$$

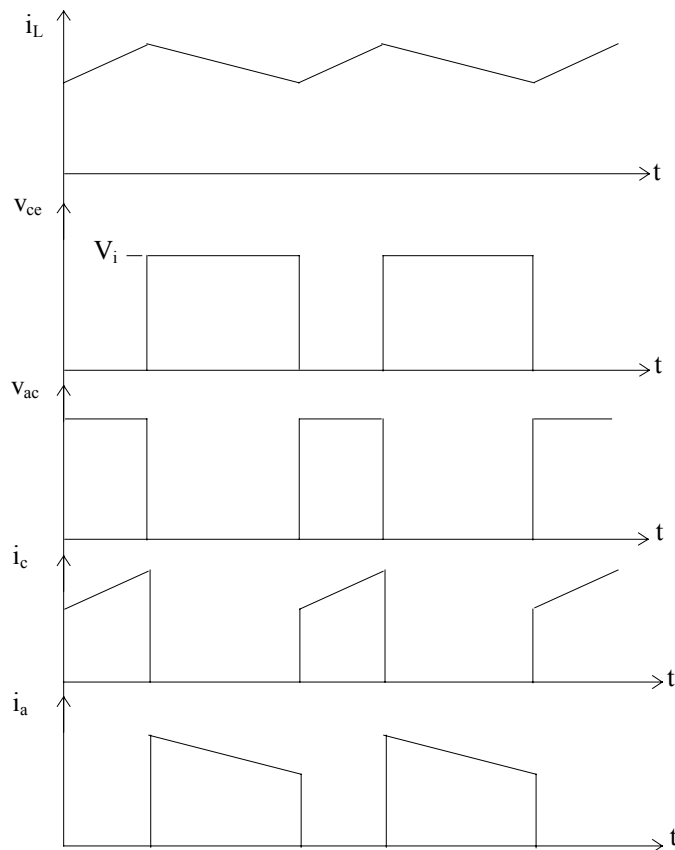
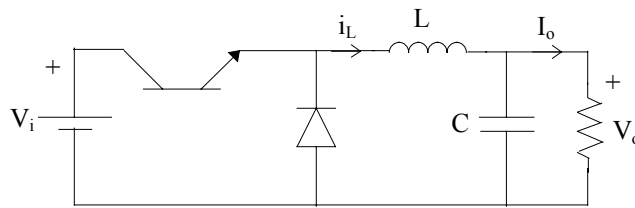
$$I_o = \frac{1}{T} \frac{(1-D)T}{2} \hat{I} \quad ; \quad V_o = \frac{(1-D)\hat{I}}{2} R_o \quad ; \quad V_o = \frac{(1-D)V_{dc}DT}{2L} R$$

$$V_{dc} \frac{1}{1-D} = \frac{(1-D)V_{dc}DT}{2L} R \quad ; \quad (1-D)^2 D = \frac{2L}{RT}$$



3.- Diseño de un convertidor cc/cc reductor sin aislamiento: Tensión de entrada  $V_{in} = 15 - 30 V$ , Tensión de salida  $V_o = 12 V$ , Intensidad de salida nominal,  $I_o = 5 A$ , rizado de intensidad  $\Delta I_o = 1,2 A$  ( $V_{in}=30V$ ). Frecuencia de conmutación,  $f_s=100kHz$ . Rizado de tensión  $\Delta V_o=1\%$ ,  $C_oESR = 100 \cdot 10^{-6}$ . Amplitud de la señal triangular del circuito de mando  $V_s=5V$ .

Determinar: Tensión e intensidad por los semiconductores. Filtro de salida, valor de la inductancia, condensador de salida. Diagrama de bode del regulador para estabilizar la tensión  $V_o$  de forma que el sistema tenga una frecuencia de corte de  $1kHz$  y un margen de fase de  $60^\circ$ .





En las condiciones propuestas, conducción continua

$$V_o = DV_i \quad ; \quad V_i = 30 \text{ V} \quad ; \quad D = 0,4$$

$$\text{Con } V_i = 30\text{V}, \quad \Delta I_L = \frac{1}{L} DT(V_i - V_o); \quad L = \frac{DT}{\Delta I_L}(V_i - V_o) = 60 \mu\text{H}$$

$$\Delta V_o = 120\text{mV} = \Delta I_L \text{ ESR} \quad ; \quad \text{ESR} = 0,1 \Omega \quad ; \quad C_o = 1000 \mu\text{F} \quad (1)$$

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad ; \quad \Delta V_o = \frac{1}{C} \frac{T}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \frac{1}{2} \quad ; \quad C_o \frac{\Delta I_L}{8 f_s \Delta V_o} = 12,5 \mu\text{F} \quad (2)$$

$$C_o = 1000 \mu\text{F}$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_c} = \frac{V_i}{V_s} \frac{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_z}\right)}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_p}\right)^2} \quad ; \quad \omega_z = \frac{1}{\text{ESR} \cdot C_o} \quad ; \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC_o}}$$

$$\frac{V_i}{V_s} = 6 = 15,56\text{dB}, (V_i=30\text{V}) \text{ en DC} \quad ; \quad \frac{V_i}{V_s} = 6,46\text{dB}, (V_i=30\text{V}) \text{ en AC a } f=f_c=1\text{kHz}$$

regulador de tipo 3 para que a  $f_c = 1\text{kHz}$  la pendiente de  $G(s)H(s)$  sea de  $-20\text{dB/dec}$

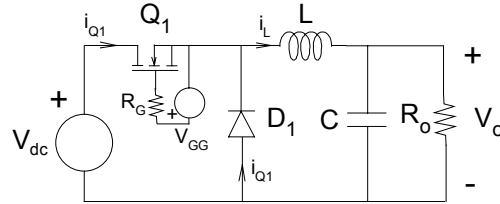
$$\theta_{G(s)} = -\text{tg}^{-1} \frac{\omega_c}{\omega_z} + 2 \text{tg}^{-1} \left( \frac{\omega_c}{\omega_p} \right) = 81,80^\circ \quad ; \quad \theta_{G(s)} + \theta_{H(s)} + MF \leq 180^\circ \quad ;$$

$$\theta_{H(s)} \leq 38,2^\circ \quad ; \quad \theta_{H(s)} = 90 - 2 \text{tg}^{-1} k + 2 \text{tg}^{-1} \left( \frac{1}{k} \right) \quad ; \quad k=2, \theta_{H(s)} = 16^\circ$$

$$f_z = 500 \text{ Hz} \quad ; \quad f_p = 2\text{kHz}, a f=f_c = 1\text{kHz } H(s) = -6,46\text{dB}$$

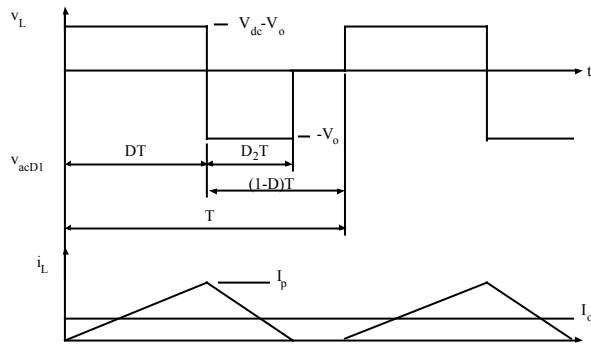


4.- En un convertidor reductor  $V_{dc} = 25 V$ ,  $L = 500 \mu H$ ,  $R_o = 2 \Omega$ ,  $f_s = 1 kHz$  y  $D = 0,2$ . Calcular y dibujar la intensidad por la inductancia  $i_L$ . Determinar  $V_o$ . Determinar el valor de  $D_{crit}$  en el que se produce la transición de conducción continua a discontinua.



Modo de conducción continua:  $V_o = D V_{dc}$

Modo de conducción discontinua:



$$I_p = \frac{V_{dc} - V_o}{L} DT = \frac{V_o}{L} D_2 T \quad ; \quad V_o = V_{dc} \frac{D}{D + D_2} \quad ; \quad D_2 = D \frac{V_{dc} - V_o}{V_o}$$

$$I_o = \frac{I_p (D + D_2)}{2} \quad ; \quad I_o = \frac{1}{2} DT \frac{V_{dc} - V_o}{L} (D + D_2) \quad ; \quad V_o = I_o \cdot R_o$$

$$\frac{V_o}{R_o} = \frac{DT}{2} \frac{V_{dc} - V_o}{L} (D + D_2) \quad ; \quad V_o = \frac{RDT}{2L} (V_{dc} - V_o) \left( D + D \frac{V_{dc} - V_o}{V_o} \right)$$

$$V_o^2 = \frac{RDT}{2L} (V_{dc} - V_o) [DV_o + D(V_{dc} - V_o)] \quad ; \quad V_o^2 = \frac{RD^2 T}{2L} (V_{dc} - V_o) V_o$$

$$V_o^2 + V_o \frac{V_{dc} RD^2 T}{2L} - \frac{V_{dc}^2 RD^2 T}{2L} = 0$$

con  $D = D_{crit}$  sustituimos en el la expresión anterior  $V_o = D_{crit} V_{dc}$  obteniendo:



$$(1 - D_{crit}) = \frac{2L}{RT}; \quad D_{crit} = 0,5$$

Para  $D=0,2$  existe conducción discontinua. Aplicando la relación entre  $V_{dc}$  y  $V_o$ ,

$$V_o^2 + V_o \frac{V_{dc} R D^2 T}{2L} - \frac{V_{dc}^2 R D^2 T}{2L} = 0$$

$$V_o = 6,14 \text{ V}$$

Según la figura:

$$D = 0,2; \quad I_p = \frac{V_{dc} - V_o}{L} D T = \frac{V_o}{L} D_2 T \quad ; \quad I_p = 7,54 \text{ A} \quad ; \quad D_2 = 0,614$$



5.- Para el convertidor anterior, dibujar la función de transferencia de un regulador que estabilice la tensión de salida  $V_o = 15\text{ V}$  y  $R=2\Omega$  indicando el criterio de margen de fase. Datos. Rizado de  $v_o = 5\%$ .  $C \cdot ESR = 65 \cdot 10^{-6}$ . La señal de mando se obtiene por comparación con una señal triangular de amplitud  $\Delta V_s = 4\text{ V}$ . Frecuencia de corte  $f_c = 300\text{ Hz}$

Con  $V_o = 15\text{ V}$  y  $R=2\Omega$  existe conducción continua, por tanto:

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L} (1-D) T = 12\text{ A} \quad ; \quad \Delta I_L \cdot ESR \leq 0,05 \cdot V_o \quad ; \quad ESR \leq 62,5\text{ m}\Omega$$

$$C \cdot ESR = 65 \cdot 10^{-6} \quad ; \quad C \geq 1040\text{ }\mu\text{F}$$

Por otro lado

$$\frac{\Delta I_L T}{8C} = \Delta v_o \quad ; \quad \text{por lo que es necesario } C = 2000\text{ }\mu\text{F} \text{ y entonces } ESR = 32,5\text{ m}\Omega.$$

$$\text{La ganancia del convertidor a bajas frecuencias es } \frac{\partial v_o}{\partial v_c} = \frac{V_{dc}}{\Delta V_s} = 6,25 = 15,92\text{ dB}$$

$$\text{existe un polo de segundo orden en } f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 159\text{ Hz} \text{ y un cero en}$$

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi RC} = 2449\text{ Hz}. \text{ Para } f_c = 300\text{ Hz} \text{ se utiliza un regulador de tipo 3.}$$

$$\text{La ganancia del convertidor a } f_c \text{ es } G_{fc}. \quad G_{fc} \cong 15,92 - 40 \log \left| 1 + \frac{f_c}{f_{LC}} \right| = 2,74\text{ dB}$$

Margen de fase,  $MF = 60^\circ$

La fuente conmutada aporta un retraso en  $f_c$ ,  $\theta_{\text{filtro}}$

$$\theta_{\text{filtro}} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{f_c}{f_{LC}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{f_c}{f_{RC}} \right) = 117^\circ \quad ; \quad \theta_{\text{filtro}} + MF + \theta_H = 180^\circ \quad ; \quad \text{por lo}$$

que  $\theta_H = 3^\circ$

Utilizando el factor  $k$ ,  $\theta_H = 90^\circ - 2 \tan^{-1}(k) + 2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{k} \right)$ ;  $k=2$  hace que  $\theta_H = 16^\circ$  y  $k=3$  hace que

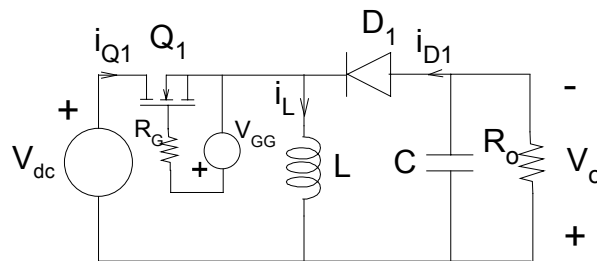
$\theta_H = -16^\circ$ , por tanto  $k=3$ , así  $f_z = 100\text{ Hz}$  y  $f_p = 900\text{ Hz}$ . La ganancia a la frecuencia  $f_c$  del regulador es  $H_{fc} = 2,74\text{ dB}$



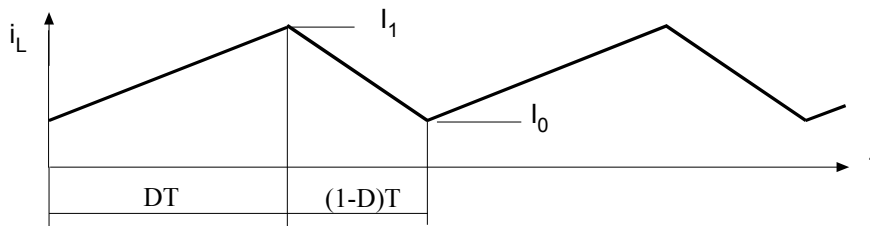




6.- Para un convertidor reductor - elevador, calcular el valor de la inductancia crítica  $L_{crit}$  en el que la intensidad está en el límite entre conducción continua y discontinua en función de la resistencia de carga  $R_L$ , el ciclo de trabajo  $D$  y el periodo de conmutación  $T$ . Calcular el rizado de la tensión de salida  $\Delta V_o$  sin considerar la ESR, en función de la propia tensión de salida  $V_o$ , la tensión de entrada  $V_i$ , la intensidad de salida  $I_o$  la capacidad  $C$  y el periodo de conmutación  $T$  considerando el caso de conducción continua y discontinua.



Conducción continua con bajo rizado (intensidad mínima por la inductancia mayor que  $I_o$ ):

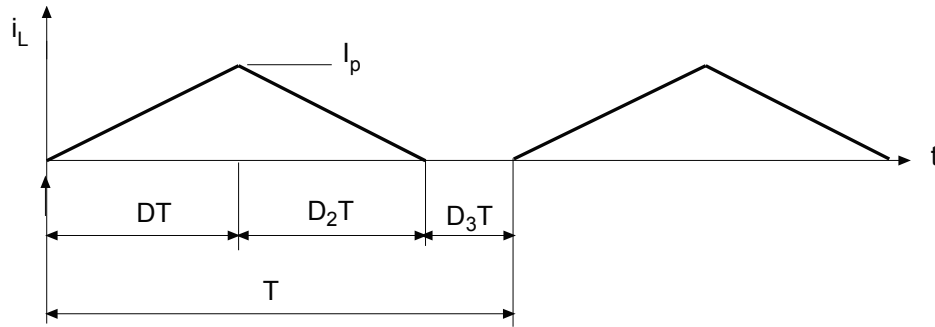


$$\frac{V_i}{L}DT - \frac{V_o}{L}(1-D)T = 0 ; V_o = V_i \frac{D}{1-D} ; D = \frac{V_o}{V_i + V_o}$$

En el tiempo  $DT$  la intensidad que circula por el condensador  $C$  a la carga es  $I_o$ .

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} I_o DT ; \Delta V_o = \frac{T}{C} I_o \frac{V_o}{V_i + V_o}$$

Conducción discontinua:



$$\frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} L I_p^2 \right) = \frac{V_o^2}{R} ; \frac{1}{T} \left[ \frac{1}{2} L \left( \frac{V_i}{L} DT \right)^2 \right] = \frac{V_o^2}{R} ; V_o = V_i D \sqrt{\frac{RT}{2L}} ; D = \frac{V_o}{V_i} \sqrt{\frac{2L}{RT}}$$

En el tiempo  $(D+D_3)T = (1-D_2)T$  el condensador suministra a la carga  $I_o$

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} I_o (1 - D_2) T ; \Delta V_o = \frac{T}{C} I_o \left( 1 - \frac{V_i}{V_o} D \right) ; \Delta V_o = \frac{T}{C} I_o \left( 1 - \sqrt{\frac{2L}{RT}} \right)$$

Para calcular  $L_{crit}$  igualamos el valor de  $V_o$  para el caso de conducción continua y discontinua.

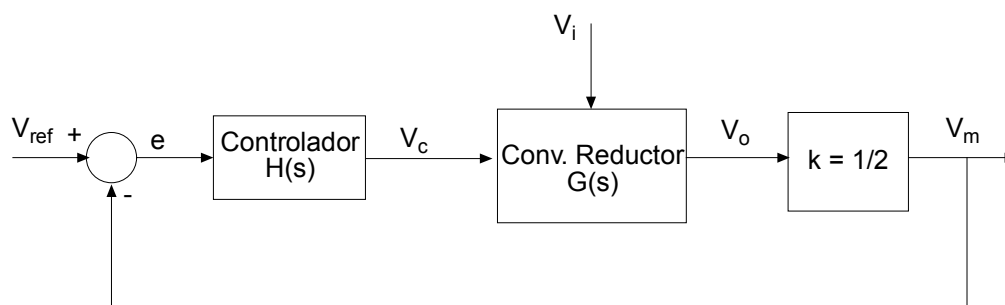
$$V_i D \sqrt{\frac{RT}{2L_{crit}}} = V_i \frac{D}{1 - D} ; L_{crit} = \frac{(1 - D)^2 RT}{2}$$

Nota: el rizado de tensión en conducción discontinua tiene un error correspondiente al tiempo en que conduciendo  $D_1$  su intensidad es menor que la de carga  $I_o$ . En el cálculo descrito no se ha tenido en cuenta este tiempo en el que el condensador también disminuye su tensión.



7.- Diseñar la función de compensación para que en bucle cerrado el convertidor reductor que a continuación se describe tenga un comportamiento estable con un margen de fase de  $45^\circ$ , siendo la frecuencia a la que la ganancia es unidad  $5\text{kHz}$ . Utilizar el factor  $k$  como parámetro, siendo  $k$  un número entero.

Datos del convertidor: Tensión de entrada  $V_i = 12\text{V}$ . Tensión de salida regulada  $V_o = 5\text{V}$ . Filtro de salida  $L = 100\mu\text{H}$ ,  $C = 100\mu\text{F}$   $\text{ESR} = 1\text{m}\Omega$ . Amplitud de la señal triangular del regulador  $3\text{V}$ . Para tomar una muestra de la tensión de salida se utiliza un divisor de tensión formado por dos resistencias de  $100\text{k}\Omega$ .



Se determina la ganancia en baja frecuencia de convertidor y se sitúan los polos y ceros dominantes que corresponden al filtro de salida.

$$V_o = V_i D ; V_o = V_i \frac{V_c}{\hat{V}_s} ; \left[ \frac{ZV_o}{ZV_c} \right]_{V_o=5\text{V}} = \frac{V_i}{\hat{V}_s} = 4 ; \frac{ZV_m}{ZV_c} = 2 = 6 \text{ dB}$$

Frecuencia del polo doble  $f_p$  y del cero  $f_c$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} ; f_p = 1592 \text{ Hz} ; f_c = \frac{1}{2\pi \text{ESR} C} ; f_c = 1592 \text{ kHz}$$

La ganancia de  $G(s)$  a  $5\text{kHz}$  es  $-14,73 \text{ dB}$

$$[G(s)]_{5\text{kHz}} = 6 \text{ dB} - 40 \log \left| 1 + j \frac{5 \text{ kHz}}{1592 \text{ Hz}} \right| + 20 \log \left| 1 + j \frac{5 \text{ kHz}}{1592 \text{ kHz}} \right|$$

Para compensar la función  $G(s)$  de forma que  $G(s) * H(s)$  tenga una pendiente de  $-20 \text{ dB/dec}$  a  $5\text{kHz}$  es necesario un regulador de tipo 3 cuya ganancia a  $5\text{kHz}$  sea  $14,73 \text{ dB}$ .

Utilizando el parámetro  $k$

$$\theta_{G \text{ lag}} + \theta_{H \text{ lag}} + \text{M.F.} = 180^\circ ; \theta_{H \text{ lag}} = -10^\circ ; k = 3$$



*El cero doble  $f_z$  y el polo doble  $f_p$  de la función  $H(s)$  estarán localizados en*

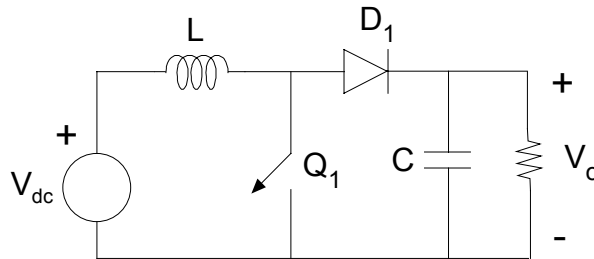
$$\frac{5 \text{ kHz}}{f_z} = 3 \ ; \ f_z = 1670 \text{ Hz} \ ; \ \frac{5 \text{ kHz}}{f_p} = \frac{1}{3} \ ; \ f_p = 15 \text{ kHz}$$

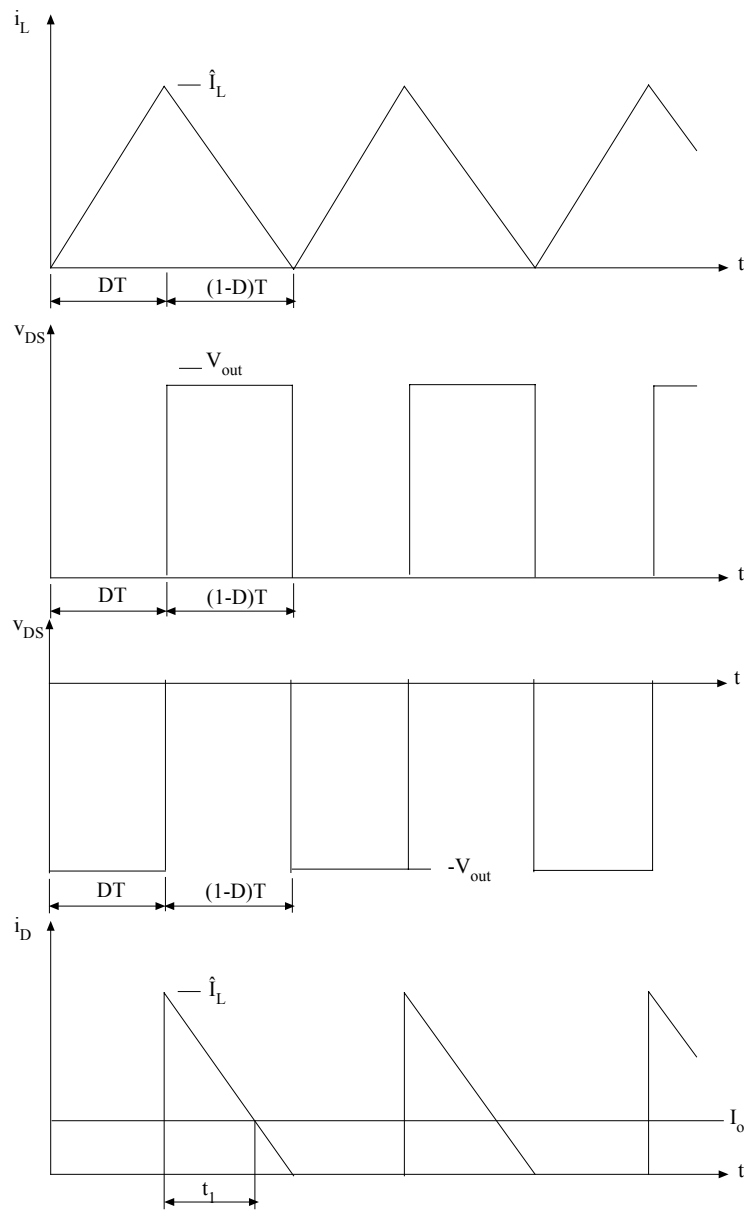


8.- Se diseña un convertidor elevador “boost” para conseguir las siguientes especificaciones:  $V_{out} = 400$  V,  $\Delta V_{out} = 5\%$ ,  $P_{out} = 200$  W,  $V_{in} = 220$  V,  $f_s = 100$  kHz. En estas condiciones el convertidor debe trabajar en el límite entre conducción continua y discontinua.

Determinar: Valor de la inductancia  $L$ , máxima tensión soportada por los semiconductores.

Condensador de salida  $C_{out}$ . Dato:  $C \cdot ESR = 50 \cdot 10^{-6}$ .





$$P_o = 200W \quad ; \quad I_o = 0,5A \quad ; \quad V_o = \frac{V_{in}}{1-D} \quad ; \quad D = 0,45$$

$$I_o = \frac{(1-D)T\hat{I}}{2T} \quad ; \quad \hat{I} = 1,82A \quad ; \quad L = \frac{V_{in}DT}{\hat{I}} \quad ; \quad L = 544,5\mu H$$

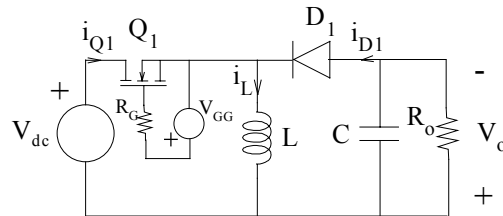
$$V_{DS,max} = V_{out} = 400V \quad ; \quad V_{AK,max} = V_{out} = 400V$$

$$\Delta v_{out} = \frac{1}{C} \frac{t_1(\hat{I} - I_o)}{2} \quad ; \quad \frac{(\hat{I} - I_o)(1-D)T}{\hat{I}} = t_1 \quad ; \quad t_1 = 4\mu s \quad ; \quad C = 132nF$$

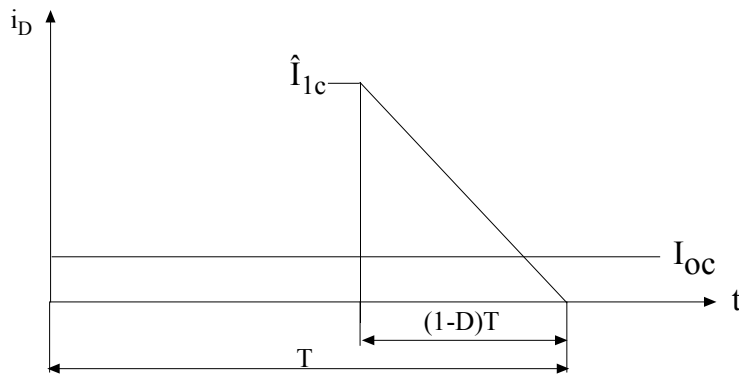
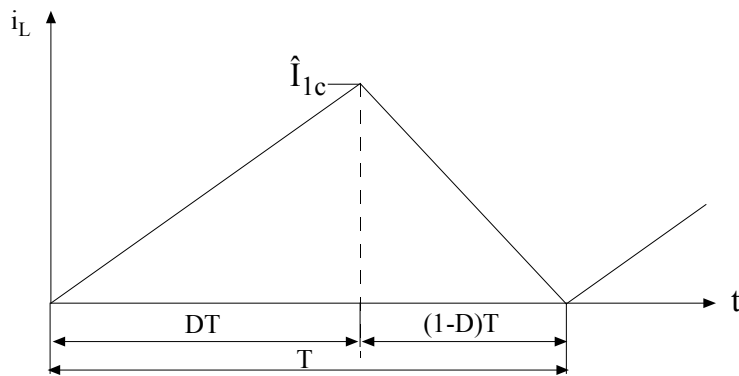
$$\Delta v_{out} = \hat{I}ESR \quad ; \quad ESR = 11\Omega \quad ; \quad C_{out} = 4,55\mu F$$



9.- Convertidor reductor-elevador sin aislamiento. Frecuencia de conmutación  $f_s = 100\text{kHz}$ , tensión de entrada  $V_{dc} = 12\text{V}$ ,  $L = 200\mu\text{H}$ , ciclo de trabajo  $D = 0,6$ . Dibujar la tensión de salida en función de la carga que varía entre  $100\Omega$  y  $1\text{k}\Omega$ .



Asumiendo rendimiento unidad, se calcula la carga que consigue una situación límite entre conducción continua y discontinua: (se utiliza el subíndice "c" para condiciones límite entre conducción continua y discontinua).



$$\hat{I}_{1c} = \frac{V_{dc}DT}{L} \quad ; \quad \hat{I}_{1c} = 360\text{mA} \quad ; \quad I_{oc} = \frac{(1-D)\hat{I}_{1c}}{2} \quad ; \quad I_{oc} = 72\text{mA}$$

$$V_{oc} = V_{dc} \frac{D}{1-D} \quad ; \quad V_{oc} = 18\text{V}; \quad R_c = \frac{V_{oc}}{I_{oc}} \quad ; \quad R_c = 250\Omega$$





$R < R_c$  conducción continua ( $V_o = 18V$ ),  $R > R_c$  conducción discontinua.

En conducción discontinua  $V_o = V_{dc} D \sqrt{\frac{RT}{2L}}$  :

$$R = 300\Omega \quad V_o = 19,72 V$$

$$R = 500\Omega \quad V_o = 25,46 V$$

$$R = 750\Omega \quad V_o = 31,18 V$$

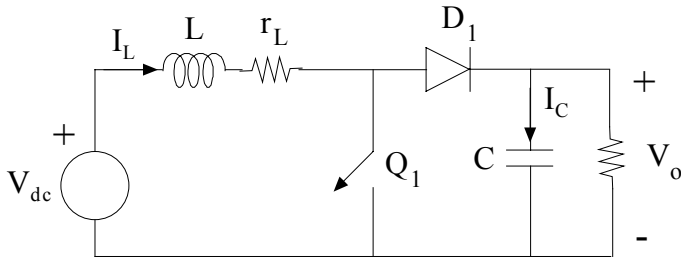
$$R = 1k\Omega \quad V_o = 36 V$$



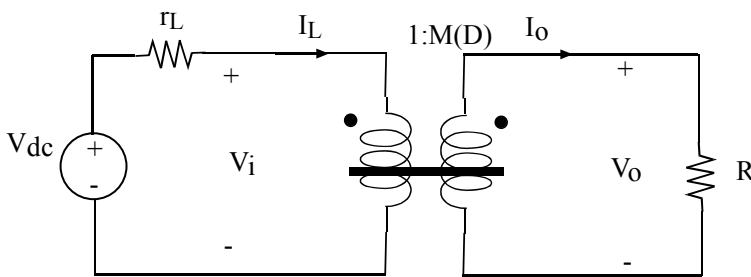
Se diseña un convertidor elevador para obtener a la salida  $V_o=24V$  y  $P_o=30W$  a partir de una tensión de alimentación  $V_i=15V$ . Se desea que el rizado de la intensidad de la fuente  $V_i$  no supere el 30%. La frecuencia de conmutación  $f_s$  es 100kHz. El factor de calidad de la inductancia  $Q_s$  a la frecuencia de conmutación es 50.

Determinar el rendimiento del convertidor considerando sólo las pérdidas en la inductancia.

$$Q_s = \frac{Z_L}{ESR} \quad \text{Nota: determinar el valor de la inductancia sin considerar la ESR.}$$



$$V_{dc} = L \frac{\Delta i_L}{DT} \quad ; \quad L \geq 93,8 \mu H \quad ; \quad L = 100 \mu H$$



$$R=19,2\Omega, r_L=1,26\Omega \quad ; \quad V_o = \frac{V_{dc}}{(1-D)} \frac{1}{1 + \frac{r_L}{(1-D)^2 R}} \quad ; \quad D=0,51$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{(1-D)^2 R}} \quad \eta = 78,3\%$$