

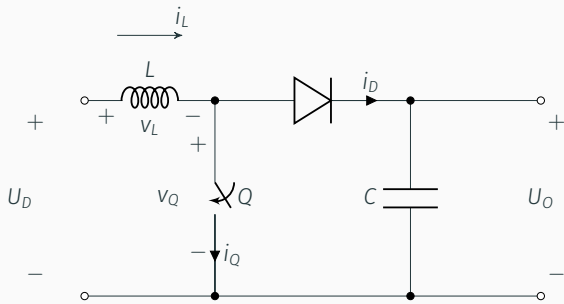
Ejercicios DC-DC, manejo de llaves

Isabel Briozzo

13/5/2020

Instituto de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Problema 2 del Examen de julio 2014



- $U_O = 300 \text{ V}$
- $P_O = 2 \text{ kW}$
- $U_D \in [100 \text{ V}, 231 \text{ V}]$
- $f = 100 \text{ kHz}$
- $T_{jmax} = 120^\circ\text{C}$

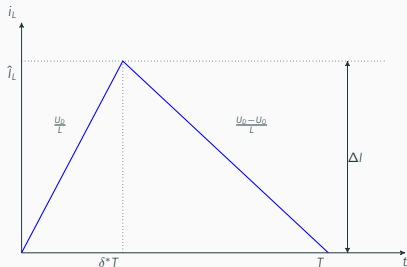
Parte a) Determinar L

Determinar L tal que se opere en MCC para toda corriente $I_0 \geq \frac{1}{3}I_{Omax}$

Parte a) Determinar L

Determinar L tal que se opere en MCC para toda corriente $I_O \geq \frac{1}{3}I_{Omax}$

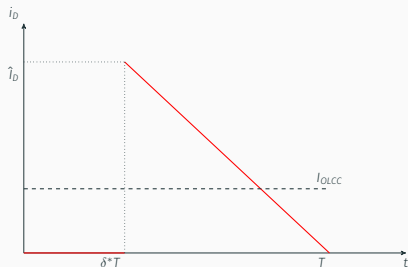
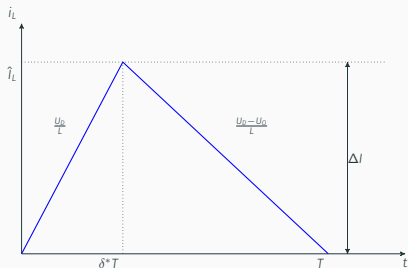
\Rightarrow Impongo que en el LCC $I_O = \frac{1}{3}I_{Omax}$



Parte a) Determinar L

Determinar L tal que se opere en MCC para toda corriente $I_O \geq \frac{1}{3}I_{Omax}$

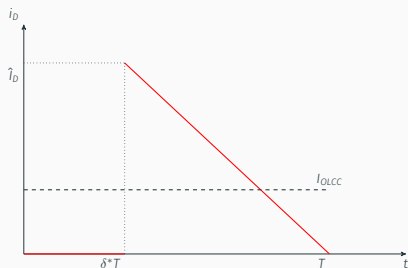
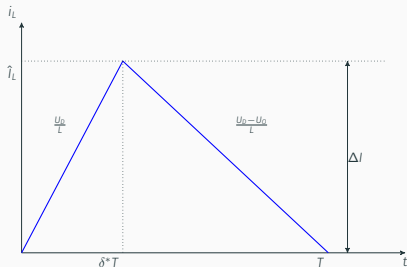
\Rightarrow Impongo que en el LCC $I_O = \frac{1}{3}I_{Omax}$



Parte a) Determinar L

Determinar L tal que se opere en MCC para toda corriente $I_O \geq \frac{1}{3}I_{Omax}$

\Rightarrow Impongo que en el LCC $I_O = \frac{1}{3}I_{Omax}$



$$I_{OLCC} = \frac{1}{T}(1 - \delta^*)T \frac{U_D}{L} \delta^*T \frac{1}{2}$$

Parte a) Determinar L

Transferencia en MCC:

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{1}{1 - \delta}$$

Parte a) Determinar L

Transferencia en MCC:

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{1}{1 - \delta}$$

$$\Rightarrow I_{OLCC} = (1 - \delta)^2 \delta \frac{U_O}{2fL}$$

Parte a) Determinar L

Transferencia en MCC:

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{1}{1 - \delta}$$

$$\Rightarrow I_{OLCC} = (1 - \delta)^2 \delta \frac{U_O}{2fL}$$

Máxima para $\delta^* = 1/3$

Parte a) Determinar L

Transferencia en MCC:

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{1}{1 - \delta}$$

$$\Rightarrow I_{OLCC} = (1 - \delta)^2 \delta \frac{U_O}{2fL}$$

Máxima para $\delta^* = 1/3$

Variación de δ

$$\frac{U_O}{U_{Dmax}} = \frac{300V}{231V} = \frac{1}{1 - \delta_{min}} \Rightarrow \delta_{min} = 0,23$$

$$\frac{U_O}{U_{Dmin}} = \frac{300V}{100V} = \frac{1}{1 - \delta_{max}} \Rightarrow \delta_{max} = 0,67$$

Parte a) Determinar L

Transferencia en MCC:

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{1}{1 - \delta}$$

$$\Rightarrow I_{OLCC} = (1 - \delta)^2 \delta \frac{U_O}{2fL}$$

$$I_{OLCCmax} = (1 - \delta^*)^2 \delta^* \frac{U_O}{2fL}$$

Máxima para $\delta^* = 1/3$

Parte a) Determinar L

Transferencia en MCC:

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{1}{1 - \delta}$$

$$\Rightarrow I_{OLCC} = (1 - \delta)^2 \delta \frac{U_O}{2fL}$$

$$I_{OLCCmax} = (1 - \delta^*)^2 \delta^* \frac{U_O}{2fL} = \frac{1}{3} \frac{P_O}{U_O}$$

Máxima para $\delta^* = 1/3$

Parte a) Determinar L

Transferencia en MCC:

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{1}{1 - \delta}$$

$$\Rightarrow I_{OLCC} = (1 - \delta)^2 \delta \frac{U_O}{2fL}$$

Máxima para $\delta^* = 1/3$

$$I_{OLCCmax} = (1 - \delta^*)^2 \delta^* \frac{U_O}{2fL} = \frac{1}{3} \frac{P_O}{U_O}$$

$$I_{OLCCmax} = \frac{1}{3} \frac{P_O}{U_O} = \frac{1}{3} \frac{2kW}{300V}$$

Parte a) Determinar L

Transferencia en MCC:

$$\frac{U_O}{U_D} = \frac{1}{1 - \delta}$$

$$\Rightarrow I_{OLCC} = (1 - \delta)^2 \delta \frac{U_O}{2fL}$$

Máxima para $\delta^* = 1/3$

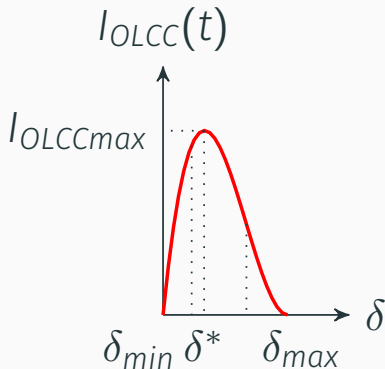
$$I_{OLCCmax} = (1 - \delta^*)^2 \delta^* \frac{U_O}{2fL} = \frac{1}{3} \frac{P_O}{U_O}$$

$$I_{OLCCmax} = \frac{1}{3} \frac{P_O}{U_O} = \frac{1}{3} \frac{2kW}{300V}$$

$$\Rightarrow \boxed{L = 100 \mu H}$$

Parte a) Un poco más de la condición en el LCC

Limite de Conducción Continua en función de δ

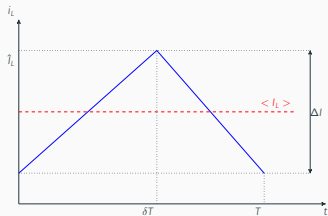
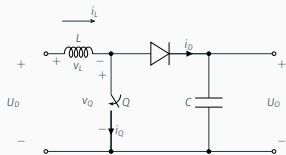


Observemos que:

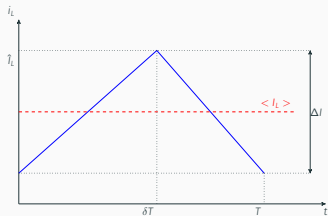
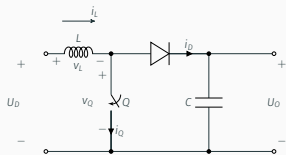
- Si imponemos que $I_{OLCC}(\delta^*) = \frac{I_{omax}}{3}$, para cualquier otro U_D (cualquier δ) I_{OLCC} es más chica y por tanto estamos en MCC siempre para todo mi rango de carga.
- Si imponemos que $I_{OLCC}(\delta_{max}) = \frac{I_{omax}}{3}$, para otro U_D más chico (δ más chico) I_{OLCC} es más grande y por tanto estamos en MCD para parte de mi rango de carga.

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET

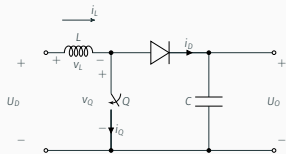


Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET

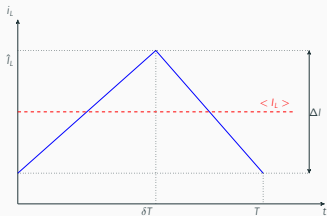


$$\hat{i}_Q = \hat{i}_L$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET

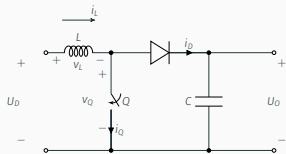


$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T$$

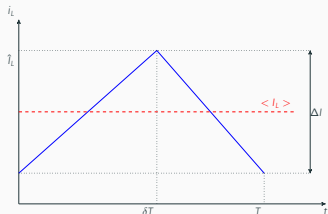


$$\hat{I}_Q = \hat{I}_L = \langle I_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET

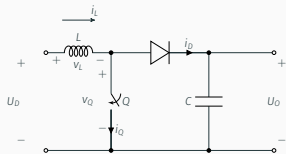


$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1-\delta)U_O}{L} \delta T$$



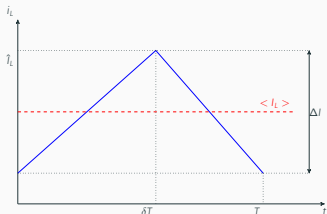
$$\hat{i}_Q = \hat{i}_L = \langle i_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET



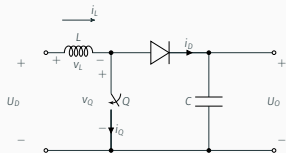
$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1-\delta)U_o}{L} \delta T$$

$$\Delta I \text{ máximo con } \delta = \frac{1}{2}$$



$$\hat{i}_Q = \hat{i}_L = \langle i_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

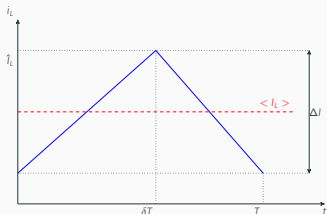
Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET



$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1-\delta)U_o}{L} \delta T$$

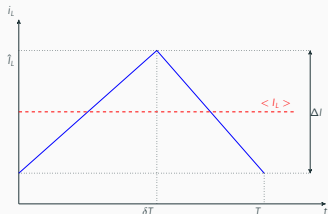
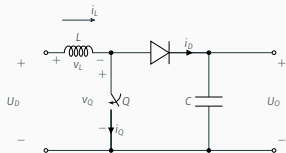
$$\Delta I \text{ máximo con } \delta = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow U_D = 150 \text{ V}$$



$$\hat{i}_Q = \hat{i}_L = \langle i_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET



$$\hat{I}_Q = \hat{I}_L = \langle I_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

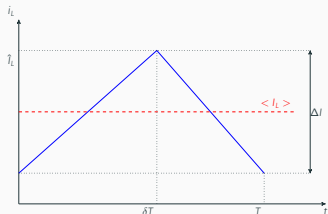
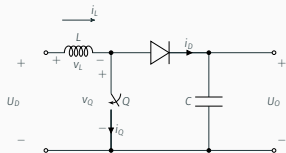
$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1-\delta)U_o}{L} \delta T$$

$$\Delta I \text{ máximo con } \delta = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow U_D = 150 \text{ V}$$

$$\langle I_L \rangle$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET



$$\hat{i}_Q = \hat{i}_L = \langle i_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1 - \delta) U_o}{L} \delta T$$

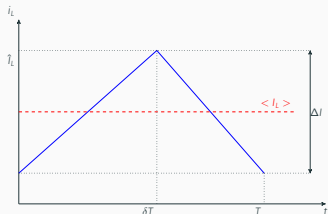
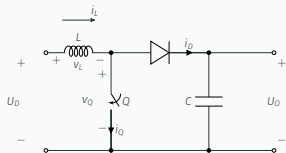
$$\Delta I \text{ máximo con } \delta = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow U_D = 150 \text{ V}$$

$$\langle I_L \rangle$$

$$P_{in}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET



$$\hat{i}_Q = \hat{i}_L = \langle i_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1-\delta)U_o}{L} \delta T$$

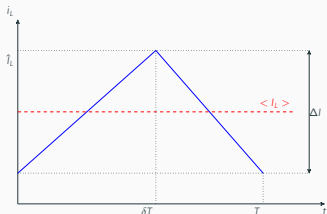
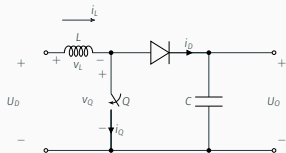
$$\Delta I \text{ máximo con } \delta = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow U_D = 150 \text{ V}$$

$$\langle i_L \rangle$$

$$P_{in} = U_D \langle i_L \rangle = P_{out}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET



$$\hat{I}_Q = \hat{I}_L = \langle I_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1-\delta)U_o}{L} \delta T$$

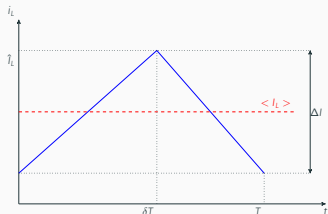
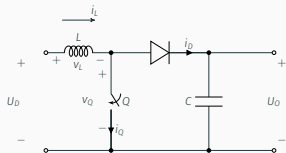
ΔI máximo con $\delta = \frac{1}{2}$

$$\Rightarrow U_D = 150 \text{ V}$$

$$\langle I_L \rangle$$

$$P_{in} = U_D \langle I_L \rangle = P_{out} = 2 \text{ kW}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET



$$\hat{I}_Q = \hat{I}_L = \langle I_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1-\delta)U_O}{L} \delta T$$

$$\Delta I \text{ máximo con } \delta = \frac{1}{2}$$

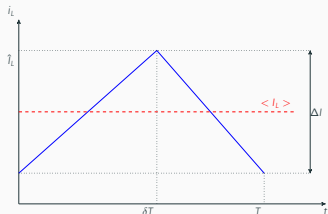
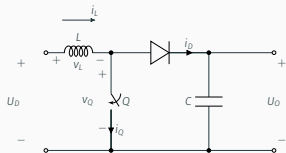
$$\Rightarrow U_D = 150 \text{ V}$$

$$\langle I_L \rangle$$

$$P_{in} = U_D \langle I_L \rangle = P_{out} = 2 \text{ kW}$$

$$\langle I_L \rangle = \frac{2 \text{ kW}}{U_D}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET



$$\hat{I}_Q = \hat{I}_L = \langle I_L \rangle + \frac{\Delta I}{2}$$

$$\Delta I = \frac{U_D}{L} \delta T \quad \underbrace{=}_{\text{Transf. en MCC}} \quad \frac{(1-\delta)U_o}{L} \delta T$$

$$\Delta I \text{ máximo con } \delta = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow U_D = 150 \text{ V}$$

$$\langle I_L \rangle$$

$$P_{in} = U_D \langle I_L \rangle = P_{out} = 2 \text{ kW}$$

$$\langle I_L \rangle = \frac{2 \text{ kW}}{U_D}$$

$$\langle I_L \rangle \text{ máximo con } U_{Dmin} = 100 \text{ V}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET

$$\hat{I}_Q \Big|_{\delta=0,5} = 17,1 \text{ A}$$

$$\hat{I}_Q \Big|_{U_{Dmin}} = 23,3 \text{ A}$$

Parte b) Pico máximo de la corriente por el MOSFET

$$\hat{I}_Q \Big|_{\delta=0,5} = 17,1 \text{ A}$$

$$\hat{I}_Q \Big|_{U_{Dmin}} = 23,3 \text{ A}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{I}_Q = 23,3 \\ I_{Qmin} = \hat{I}_Q - \Delta I = 16,6 \text{ A} \\ U_D = 100 \text{ V} \\ \delta = 0,67 \end{array} \right.$$

Parte c) Condensador a la salida

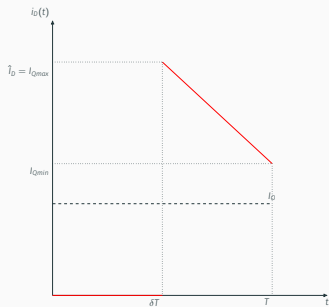
Determinar el condensador a la salida para que el *ripple* de tensión sea menor al 1%.

Parte c) Condensador a la salida

Determinar el condensador a la salida para que el *ripple* de tensión sea menor al 1%.

Corriente por el diodo,

$$I_O = \frac{2kW}{300V} = 6,67 \text{ A}$$

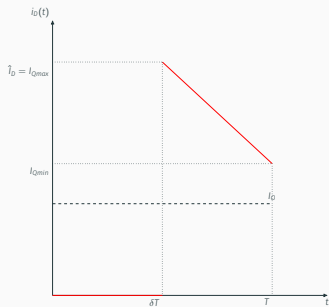


Parte c) Condensador a la salida

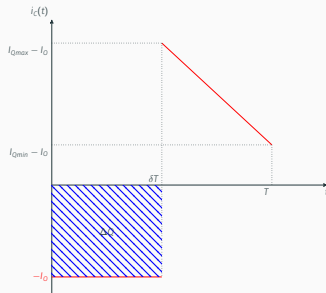
Determinar el condensador a la salida para que el *ripple* de tensión sea menor al 1%.

Corriente por el diodo,

$$I_O = \frac{2kW}{300V} = 6,67 \text{ A}$$



Corriente por el condensador:



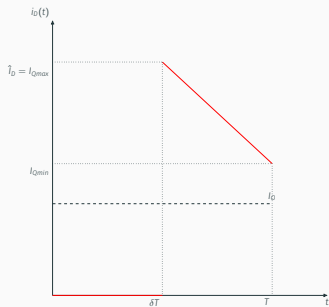
$$\Delta Q = I_O \delta T$$

Parte c) Condensador a la salida

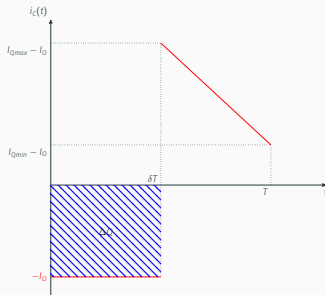
Determinar el condensador a la salida para que el *ripple* de tensión sea menor al 1%.

Corriente por el diodo,

$$I_O = \frac{2kW}{300V} = 6,67 \text{ A}$$



Corriente por el condensador:

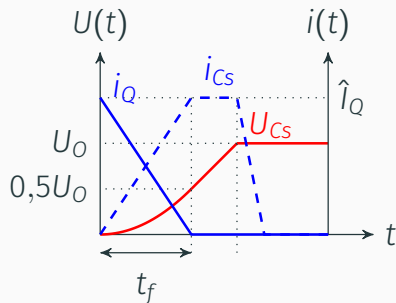
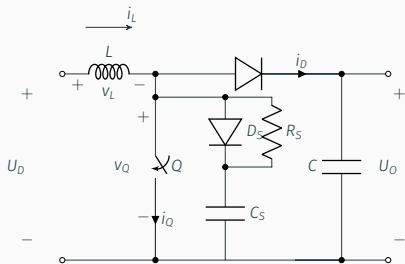


$$\Delta Q = I_O \delta T$$

$$\Delta U_O = \frac{\Delta Q}{C} \leq 3V \Rightarrow \boxed{C_{min} = 14,9 \mu F}$$

Parte d) Determinar componentes del *snubber* de apagado

Condición: cuando la corriente por la llave se hace cero la tensión en el condensador debe ser la mitad de la tensión final.



Parte d) Determinar componentes del *snubber* de apagado

$$\frac{dU_{C_s}}{dt} = \frac{1}{C_s} i_{C_s} = \frac{1}{C_s} \hat{I}_Q t$$

Parte d) Determinar componentes del *snubber* de apagado

$$\frac{dU_{C_s}}{dt} = \frac{1}{C_s} i_{C_s} = \frac{1}{C_s} \frac{\hat{I}_Q}{t_f} t$$

$$\Rightarrow U_{C_s}(t) = \frac{1}{C_s} \frac{\hat{I}_Q}{2t_f} t^2$$

Parte d) Determinar componentes del *snubber* de apagado

$$\frac{dU_{Cs}}{dt} = \frac{1}{C_s} i_{Cs} = \frac{1}{C_s} \hat{I}_Q t$$

$$\Rightarrow U_{Cs}(t) = \frac{1}{C_s} \frac{\hat{I}_Q}{2t_f} t^2$$

$$U_{Cs}(t_f) \leq 0,5U_0 = 150 \text{ V}$$

$t_f = 67 \text{ ns}$, De hoja de datos

Parte d) Determinar componentes del *snubber* de apagado

$$\frac{dU_{Cs}}{dt} = \frac{1}{C_s} i_{Cs} = \frac{1}{C_s} \hat{I}_Q t$$

$$\Rightarrow U_{Cs}(t) = \frac{1}{C_s} \frac{\hat{I}_Q}{2t_f} t^2$$

$$U_{Cs}(t_f) \leq 0,5U_0 = 150 \text{ V}$$

$t_f = 67 \text{ ns}$, De hoja de datos

$$C_{Smin} = 5,2 \text{ nF}$$

Parte d) Determinar componentes del *snubber* de apagado

$$\frac{dU_{Cs}}{dt} = \frac{1}{C_s} i_{Cs} = \frac{1}{C_s} \hat{I}_Q t$$

$$\Rightarrow U_{Cs}(t) = \frac{1}{C_s} \frac{\hat{I}_Q}{2t_f} t^2$$

El condensador se tienen que descargar en $\delta_{min} T$

$$3R_s C_s \leq \delta_{min} T$$

$$U_{Cs}(t_f) \leq 0,5U_0 = 150 \text{ V}$$

$t_f = 67 \text{ ns}$, De hoja de datos

$$C_{Smin} = 5,2 \text{ nF}$$

Parte d) Determinar componentes del *snubber* de apagado

$$\frac{dU_{Cs}}{dt} = \frac{1}{C_s} i_{Cs} = \frac{1}{C_s} \hat{I}_Q t$$

$$\Rightarrow U_{Cs}(t) = \frac{1}{C_s} \frac{\hat{I}_Q}{2t_f} t^2$$

$$U_{Cs}(t_f) \leq 0,5U_0 = 150 \text{ V}$$

$t_f = 67 \text{ ns}$, De hoja de datos

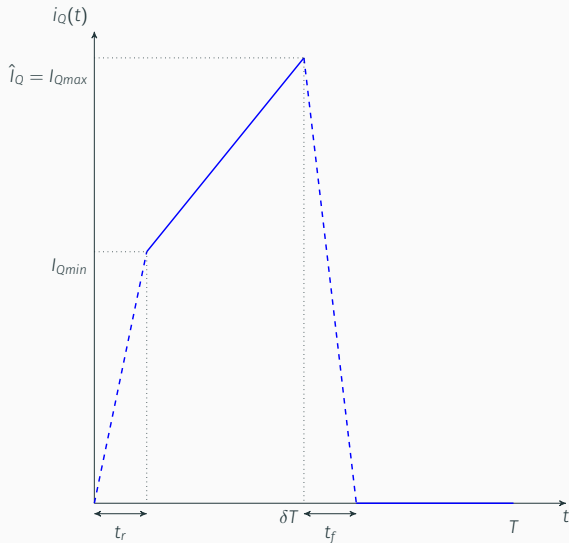
$$C_{Smin} = 5,2 \text{ nF}$$

El condensador se tienen que descargar en $\delta_{min}T$

$$3R_S C_S \leq \delta_{min}T$$

$$R_{Smax} = 147,3 \Omega$$

Parte e) Calcular eficiencia del convertidor con y sin snubber



$$\eta = \frac{P_O}{P_O + P_{perd}}$$

$$P_{perd} = P_{ON} + P_{COND} + P_{OFF}$$

Parte e) Pérdidas en la llave, sin considerar el *snubber*

De hoja de datos obtengo: $R_{DSon} = 0,2\Omega \times 2,2$, $t_f = 67 \text{ ns}$, $t_r = 79 \text{ ns}$

Parte e) Pérdidas en la llave, sin considerar el *snubber*

De hoja de datos obtengo: $R_{DSon} = 0,2\Omega \times 2,2$, $t_f = 67 \text{ ns}$, $t_r = 79 \text{ ns}$

$$P_{ON} = \frac{1}{2} U_O I_{Qmin} t_r f = 19,7 \text{ W}$$

Parte e) Pérdidas en la llave, sin considerar el *snubber*

De hoja de datos obtengo: $R_{DSon} = 0,2\Omega \times 2,2$, $t_f = 67 \text{ ns}$, $t_r = 79 \text{ ns}$

$$P_{ON} = \frac{1}{2} U_O I_{Qmin} t_r f = 19,7 \text{ W}$$

$$P_{COND} = R_{DSon} I_{Qeff}^2$$

Parte e) Pérdidas en la llave, sin considerar el *snubber*

De hoja de datos obtengo: $R_{DSon} = 0,2\Omega \times 2,2$, $t_f = 67 \text{ ns}$, $t_r = 79 \text{ ns}$

$$P_{ON} = \frac{1}{2} U_O I_{Qmin} t_r f = 19,7 \text{ W}$$

$$P_{COND} = R_{DSon} I_{Qeff}^2 = R_{DSon} \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} \left(I_{Qmin} + \frac{\Delta I}{\delta T} t \right)^2 dt = 118,43 \text{ W}$$

Parte e) Pérdidas en la llave, sin considerar el snubber

De hoja de datos obtengo: $R_{DSon} = 0,2\Omega \times 2,2$, $t_f = 67 \text{ ns}$, $t_r = 79 \text{ ns}$

$$P_{ON} = \frac{1}{2} U_O I_{Qmin} t_r f = 19,7 \text{ W}$$

$$P_{COND} = R_{DSon} I_{Qeff}^2 = R_{DSon} \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} \left(I_{Qmin} + \frac{\Delta I}{\delta T} t \right)^2 dt = 118,43 \text{ W}$$

$$P_{OFF} = \frac{1}{2} U_O \hat{I}_Q t_f f = 24,1 \text{ W}$$

Parte e) Pérdidas en la llave, sin considerar el snubber

De hoja de datos obtengo: $R_{DSon} = 0,2\Omega \times 2,2$, $t_f = 67 \text{ ns}$, $t_r = 79 \text{ ns}$

$$P_{ON} = \frac{1}{2} U_O I_{Qmin} t_r f = 19,7 \text{ W}$$

$$P_{COND} = R_{DSon} I_{Qeff}^2 = R_{DSon} \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} \left(I_{Qmin} + \frac{\Delta I}{\delta T} t \right)^2 dt = 118,43 \text{ W}$$

$$P_{OFF} = \frac{1}{2} U_O \hat{I}_Q t_f f = 24,1 \text{ W}$$

$$P_{perd} = 162,3 \text{ W} \Rightarrow \eta_{\text{sin snubber}} = 0,93$$

Parte e) Pérdidas en la llave, considerando el *snubber*

P_{ON} y P_{COND} no cambian

Parte e) Pérdidas en la llave, considerando el *snubber*

P_{ON} y P_{COND} no cambian

$$P_{OFF} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} U_Q(t) i_Q(t) dt$$

Parte e) Pérdidas en la llave, considerando el *snubber*

P_{ON} y P_{COND} no cambian

$$P_{OFF} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} U_Q(t) i_Q(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} \left(\frac{\hat{i}_Q}{2t_f C_S} t^2 \right) \left(\hat{i}_Q - \frac{\hat{i}_Q}{t_f} t \right) dt = 1,95 \text{ W}$$

Parte e) Pérdidas en la llave, considerando el *snubber*

P_{ON} y P_{COND} no cambian

$$P_{OFF} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} U_Q(t) i_Q(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} \left(\frac{\hat{I}_Q}{2t_f C_S} t^2 \right) \left(\hat{I}_Q - \frac{\hat{I}_Q}{t_f} t \right) dt = 1,95 \text{ W}$$

Hay que considerar las pérdidas en el *snubber*

$$P_{snubber} = \frac{E_{C_S}}{T} = \frac{1}{T} \frac{C_S U_0^2}{2} = 23,4 \text{ W}$$

Parte e) Pérdidas en la llave, considerando el *snubber*

P_{ON} y P_{COND} no cambian

$$P_{OFF} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} U_Q(t) i_Q(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} \left(\frac{\hat{I}_Q}{2t_f C_S} t^2 \right) \left(\hat{I}_Q - \frac{\hat{I}_Q}{t_f} t \right) dt = 1,95 \text{ W}$$

Hay que considerar las pérdidas en el *snubber*

$$P_{snubber} = \frac{E_{C_S}}{T} = \frac{1}{T} \frac{C_S U_0^2}{2} = 23,4 \text{ W}$$

Pérdidas con el *snubber*:

$$P_{perd} = 164,4 \text{ W} \Rightarrow \eta_{con snubber} = 0,92$$