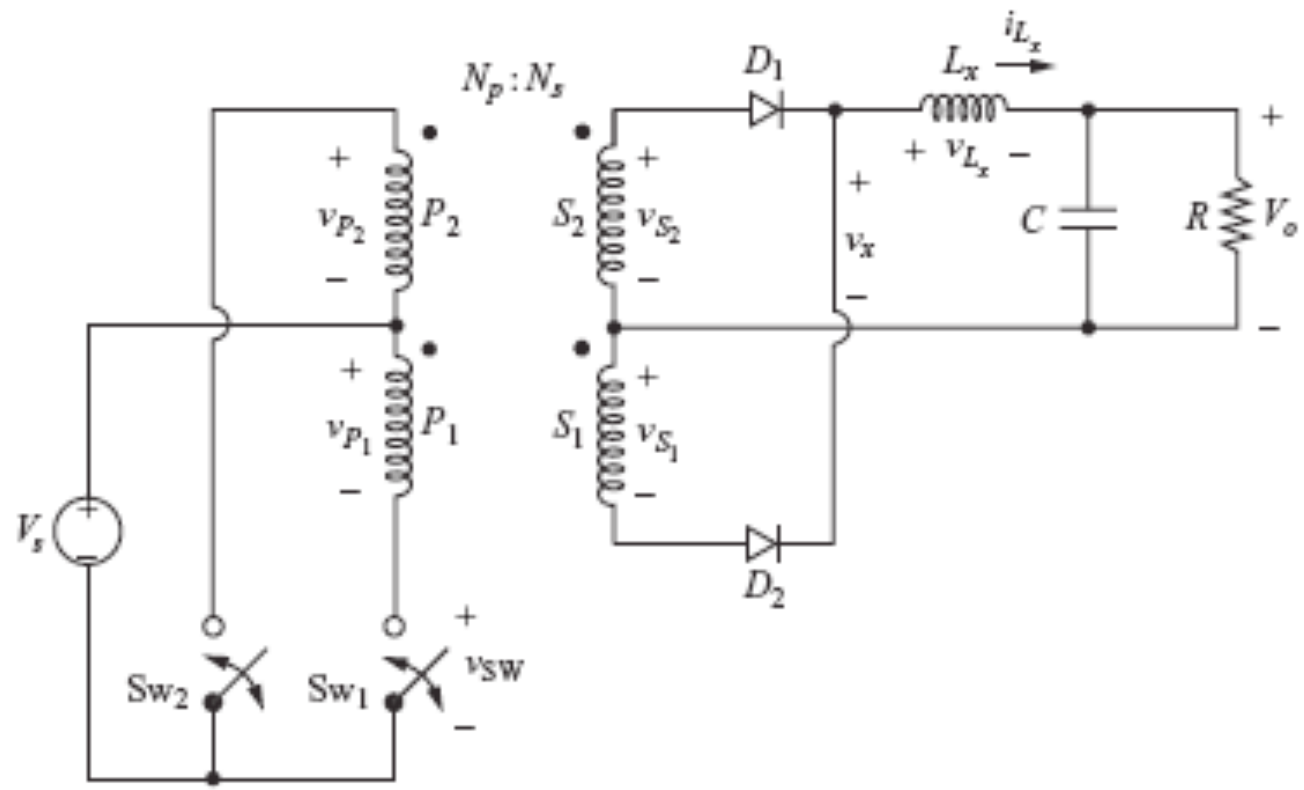
II-Convertidor “balancín” ("push-pull").



Configuración del circuito conversor "balancín" (push-pull).

Se asume operación en modo estacionario.

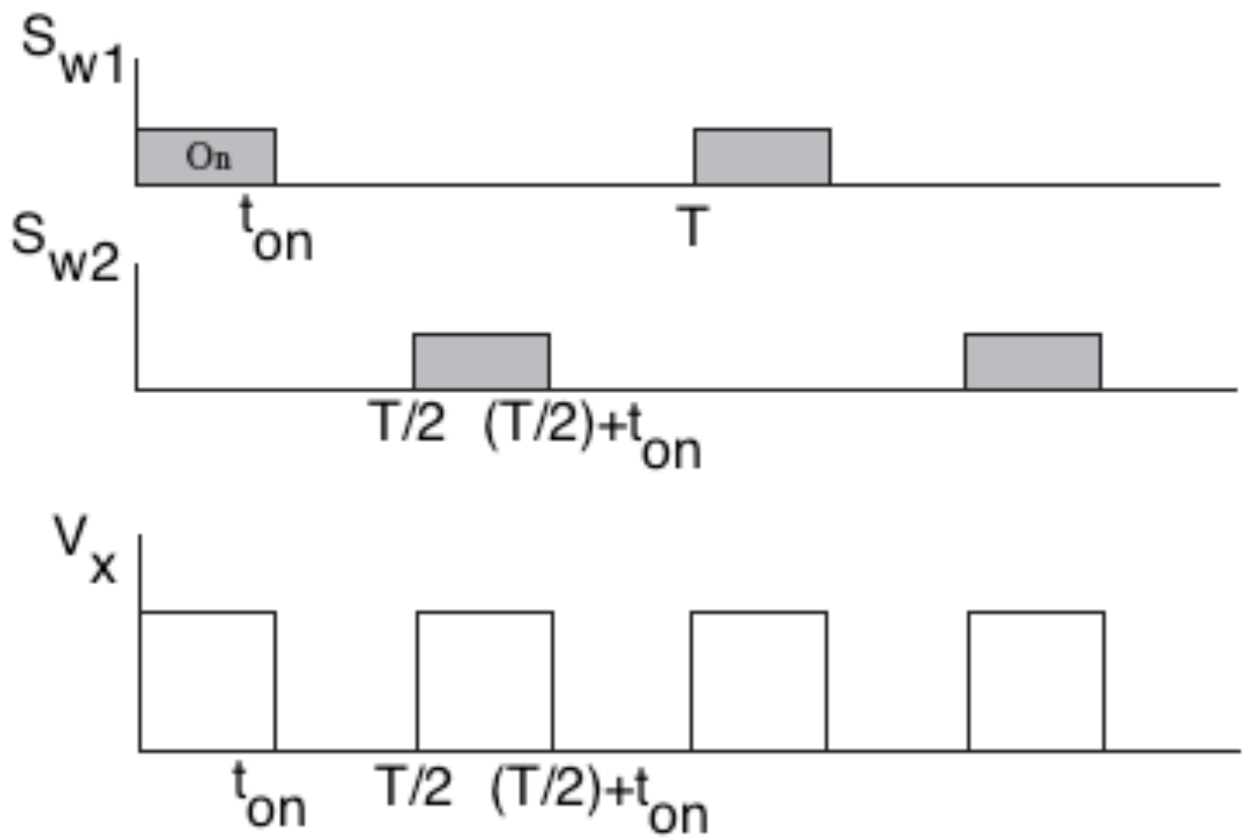
Los tiempos de conducción de los conmutadores son iguales:

$$t_{S_{w1}} = t_{S_{w2}} = t_{on}$$

La frecuencia de conmutación, f, es constante, y el tiempo de conducción de los conmutadores, en función del tiempo total de ciclo, T, es:

$$t_{S_{w1}} = t_{S_{w2}} = t_{on} = kT$$

Los intervalos de conducción de los conmutadores están separados entre si medio período de conducción, T/2.



Cuando S_1 cierra las tensiones son:

$$v_{p1} = V_s \quad (183)$$

$$v_{s1} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (184)$$

$$v_{s2} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (185)$$

y, por reflexión:

$$v_{p2} = V_s \quad (186)$$

$$v_{Sw2} = v_{p2} + V_s = 2V_s \quad (187)$$

En estas condiciones D_1 esta polarizado en directo y D_2 esta polarizado en inverso y bloquea.

$$v_x = v_{s2} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (188)$$

$$v_{Lx} = v_x - v_o(t) = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t) \quad (189)$$

$$v_L = L\frac{di_L(t)}{dt} \quad (190)$$

$$v_{Lx} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t) = L_x\frac{di_{Lx}(t)}{dt} \quad (191)$$

Si la tensión de salida es constante $\left(v_o(t) = V_o\right)$:

$$L_x \frac{di_{Lx}(t)}{dt} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \quad (192)$$

$$\frac{\Delta I_{Lxon1}}{\Delta t_{on1}} = \frac{1}{L_x}\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (193)$$

$$\frac{\Delta I_{Lxon1}}{kT} = \frac{1}{L_x}\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (194)$$

$$\Delta I_{Lxon1} = \frac{kT}{L_x}\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (195)$$

Cuando S_2 cierra las tensiones son:

$$v_{p2} = -V_s \quad (196)$$

$$v_{s2} = -V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (197)$$

$$v_{s1} = -V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (198)$$

y, por reflexión:

$$v_{p1} = -V_s \quad (199)$$

$$v_{Sw1} = V_s - v_{p1} = V_s - (-V_s) = 2V_s \quad (200)$$

En estas condiciones D_2 esta polarizado en directo y D_1 esta polarizado en inverso y bloquea.

$$v_x = -v_{s2} = -\left[-V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)\right] = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (201)$$

$$v_{Lx} = v_x - v_o(t) = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t)$$

$$v_{Lx} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \quad (202)$$

y todas las otras ecuaciones son iguales.

Cuando ambos transistores están apagados

$$v_x = 0 \quad (203)$$

Pero la corriente en la inductancia es distinta de cero, lo que fuerza a que los dos diodos estén conduciendo simultáneamente en paralelo; las corrientes en los dos secundarios son iguales por hipótesis de idealidad pero opuestas, así que su circulación crea campos magnéticos que se anulan y no producen reflexión sobre los primarios.

$$v_{Lx} = v_x - V_o = -V_o \quad (204)$$

$$L_x \frac{di_{Lx}(t)}{dt} = -V_o \quad (205)$$

$$\frac{di_{Lx}(t)}{dt} = -\frac{V_o}{L_x} \quad (59)$$

$$\frac{\Delta i_{Lxoff}}{\Delta t_{off}} = -\frac{V_o}{L_x} \quad (206)$$

$$\Delta i_{Lxoff} = -\frac{V_o}{L_x}\Delta t_{off} \quad (207)$$

donde el tiempo de apagado de los dos transistores es:

$$\Delta t_{off} = \frac{T}{2} - kT \qquad (208)$$

$$\Delta i_{Lxoff} = -\frac{V_o}{L_x}\left(\frac{T}{2} - kT\right) = \frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T \qquad (209)$$

Para operar en estado estacionario:

$$\left|\Delta I_{Lxon}\right| = \left|\Delta I_{Lxoff}\right| = \Delta I_{Lx} \quad (210)$$

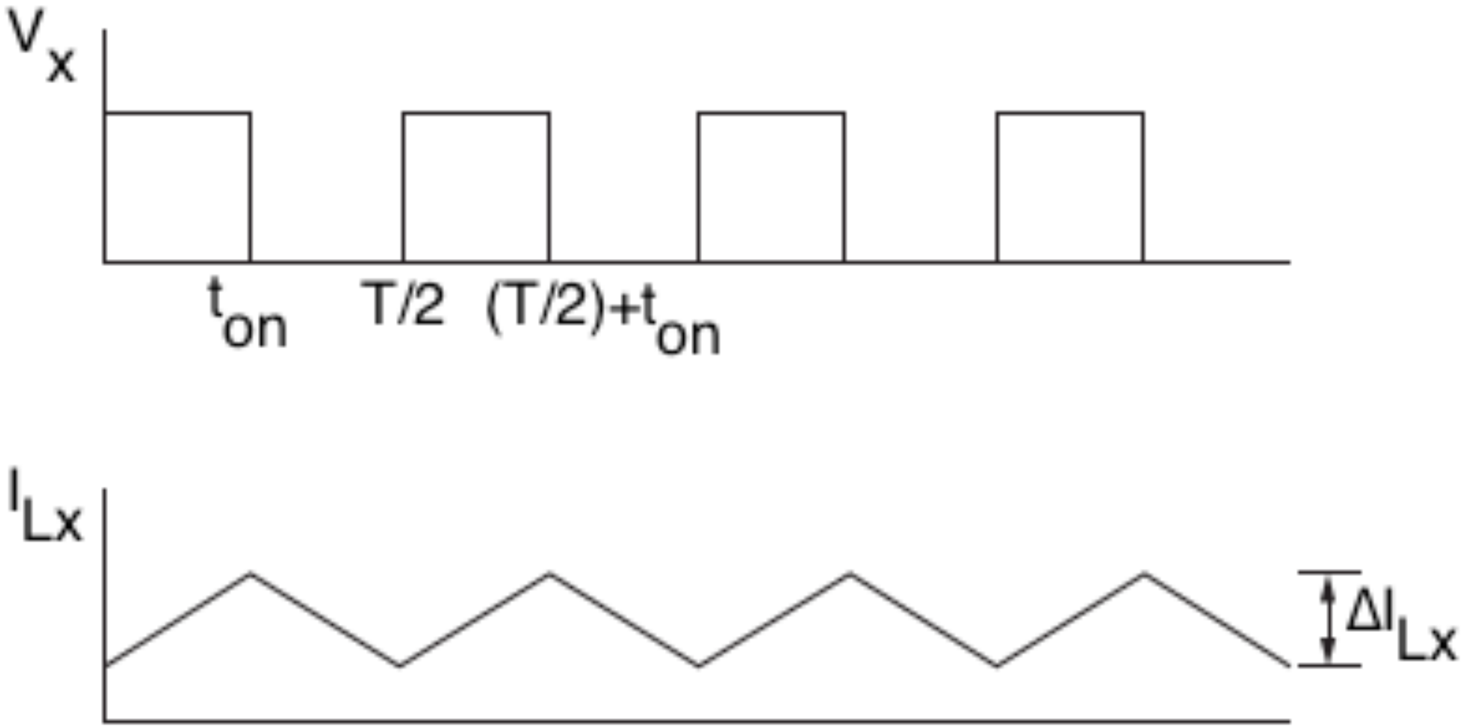
$$\frac{kT}{L_x}\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] = \frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T \quad (211)$$

Y la tensión de salida resulta:

$$V_o = 2kV_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (213)$$

La tensión de salida depende del ciclo de trabajo del conmutador, como en el conversor reductor, pero por supuesto está afectada por la relación de transformación del transformador de doble toma central, lo que permite obtener tensiones mayores o menores que la tensión de entrada.

Para calcular los componentes del filtro de salida es preciso tomar en cuenta que, desde el punto de vista de la salida, durante cada período T circulan dos pulsos de corriente por la inductancia (desde este punto de vista el conversor balancín se comporta como un arreglo entrelazado de dos conversores individuales.



Relación entre la corriente en la inductancia del filtro y los pulsos de tensión en el secundario.

$$\Delta I_{Lx} = \frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T = \left[\frac{2kV_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)}{L_x}\right]\left(\frac{1}{2} - k\right)T \quad (214)$$

$$\Delta I_{Lx} = \frac{2kV_sN_s}{L_xN_p}\left(\frac{1}{2} - k\right)T \quad (215)$$

$$\Delta I_{Lx} = \frac{2kV_sN_s}{L_xN_pf}\left(\frac{1}{2} - k\right) \quad (216)$$

$$L_x = \frac{2kV_sN_s}{\Delta I_{Lx}N_pf}\left(\frac{1}{2} - k\right) \quad (217)$$

Por supuesto, en estado estacionario:

$$\bar{I}_{Lx} = \frac{V_O}{R_O} \quad (218)$$

Y, por definición:

$$Q = CV_O \quad (219)$$

$$\Delta Q = C\Delta V_O = \int_0^t i_C(\tau)d\tau \quad (220)$$

La corriente en el condensador resulta:

$$i_c(t) = i_{Lx}(t) - I_{Ro} \quad (221)$$

$$i_c(t) = \bar{I}_{Lx}(+/-)\frac{\Delta I_{Lx}}{2} - I_{Ro} = (+/-)\frac{\Delta I_{Lx}}{2} \quad (222)$$

por geometría:

$$\Delta Q = \acute{A}rea \quad del \quad tri\acute{a}ngulo = \frac{b*a}{2} \quad (223)$$

$$\Delta V_o = \frac{b*a}{2C} \quad (224)$$

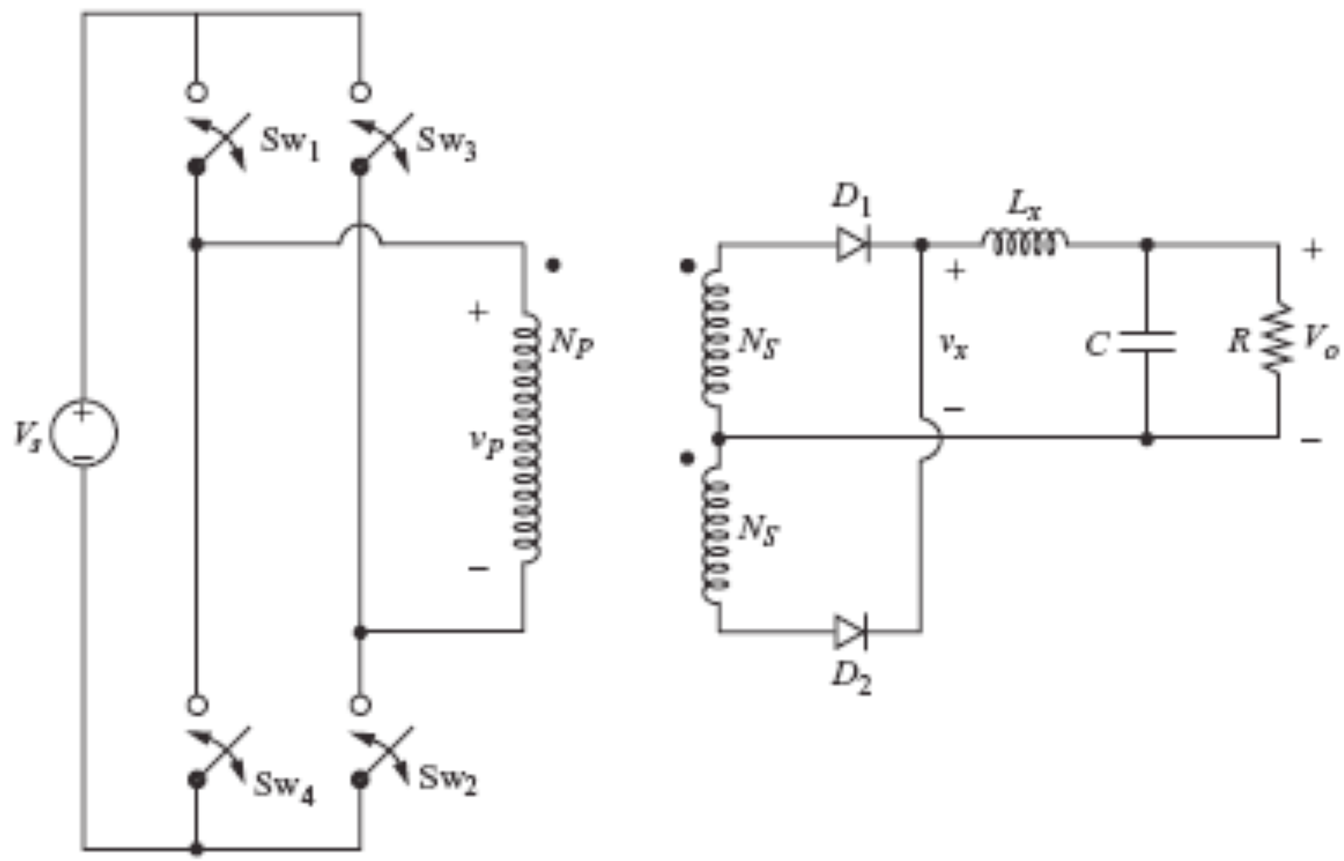
$$b = \frac{T}{4} \quad (225)$$

$$a = \frac{\Delta I_{Lx}}{2} \quad (226)$$

$$\Delta V_o = \frac{1}{2C}\left(\frac{T}{4}\right)\left[\frac{V_o}{2L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T\right] \quad (227)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o(1 - 2k)}{32CL_x f^2} \quad (228)$$

III-Conversor puente completo



Configuración del circuito conversor puente completo con transformador.

Por la estructura del puente, Sw_1 y Sw_4 no pueden conducir simultáneamente, tampoco Sw_3 y Sw_2.

La conducción a través del primario del transformador solo puede ocurrir cuando están conduciendo simultáneamente Sw_1 y Sw_2, lo que aplica corriente positiva en el primario, o Sw_3 y Sw_4, lo que aplica corriente negativa en el primario.

Se asume operación en modo estacionario.

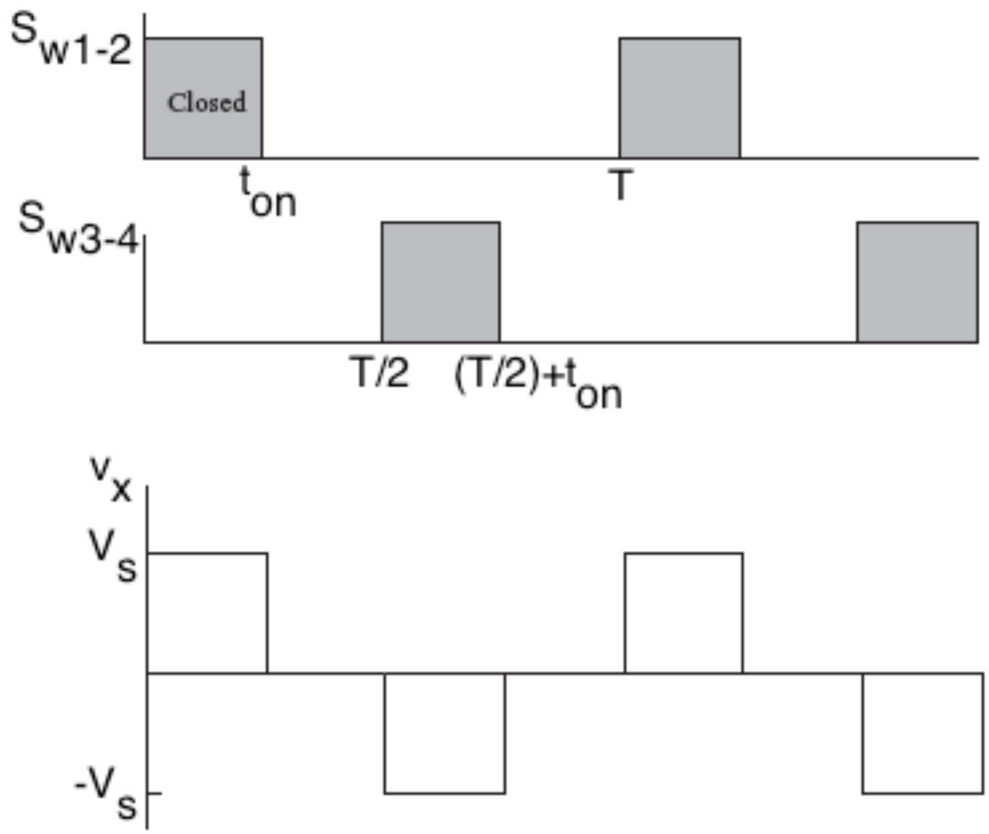
Los tiempos de conducción de los conmutadores son iguales:

$$t_{S_{w1-2}} = t_{S_{w3-4}} = t_{on}$$

La frecuencia de conmutación, f, es constante, y el tiempo de conducción de los conmutadores, en función del tiempo total de ciclo, T, es:

$$t_{S_{w1-2}} = t_{S_{w3-4}} = t_{on} = kT$$

Los intervalos de conducción de las parejas de conmutadores están separados entre si medio período de conducción, T/2.



Cuando S_1 y S_2 cierran, las tensiones son:

$$v_p = V_s \quad (229)$$

$$v_{s1} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (230)$$

$$v_{s2} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (231)$$

En estas condiciones D_1 esta polarizado en directo y D_2 esta polarizado en inverso y bloquea.

$$v_x = v_{s1} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (232)$$

$$v_{Lx} = v_x - v_o(t) = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t) \quad (233)$$

$$v_L = L\frac{di_L(t)}{dt} \quad (234)$$

$$v_{Lx} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t) = L_x\frac{di_{Lx}(t)}{dt} \quad (235)$$

Si la tensión de salida es constante $\left(v_o(t) = V_o\right)$:

$$L_x\frac{di_{Lx}(t)}{dt} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \quad (236)$$

$$\frac{\Delta I_{Lxon1}}{\Delta t_{on1}} = \frac{1}{L_x}\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (237)$$

como el intervalo de conducción es kT:

$$\frac{\Delta I_{Lxon1}}{kT} = \frac{1}{L_x}\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (238)$$

$$\Delta I_{Lxon1} = \frac{kT}{L_x}\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (239)$$

Cuando S_3 y S_4 cierran las tensiones son:

$$v_p = -V_s \quad (240)$$

$$v_{s1} = -V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (241)$$

$$v_{s2} = -V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (242)$$

En estas condiciones D_2 esta polarizado en directo y D_1 esta polarizado en inverso y bloquea.

$$v_x = -v_{s2} = -\left[-V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)\right] = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (243)$$

$$v_{Lx} = v_x - v_o(t) = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t)$$

$$v_{Lx} = V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \quad (244)$$

y todas las otras ecuaciones son iguales.

Cuando ambos transistores están apagados

$$v_x = 0 \quad (245)$$

Pero la corriente en la inductancia es distinta de cero, lo que fuerza a que los dos diodos estén conduciendo simultáneamente en paralelo; las corrientes en los dos secundarios son iguales por hipótesis de idealidad pero opuestas, así que su circulación crea campos magnéticos que se anulan y no producen reflexión sobre los primarios.

$$v_{Lx} = v_x - V_o = -V_o \quad (246)$$

$$L_x \frac{di_{Lx}(t)}{dt} = -V_o \quad (247)$$

$$\frac{di_{Lx}(t)}{dt} = -\frac{V_o}{L_x} \quad (248)$$

$$\frac{\Delta i_{Lxoff}}{\Delta t_{off}} = -\frac{V_o}{L_x} \quad (249)$$

$$\Delta i_{Lxoff} = -\frac{V_o}{L_x} \Delta t_{off} \quad (250)$$

El tiempo de apagado de los dos transistores es:

$$\Delta t_{off} = \frac{T}{2} - kT \qquad (251)$$

$$\Delta i_{Lxoff} = -\frac{V_o}{L_x}\left(\frac{T}{2} - kT\right) = \frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T \qquad (252)$$

Para operar en estado estacionario:

$$\left|\Delta I_{Lxon}\right| = \left|\Delta I_{Lxoff}\right| = \Delta I_{Lx} \quad (253)$$

$$\frac{kT}{L_x}\left[V_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)-V_o\right]=\frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2}-k\right)T \quad (254)$$

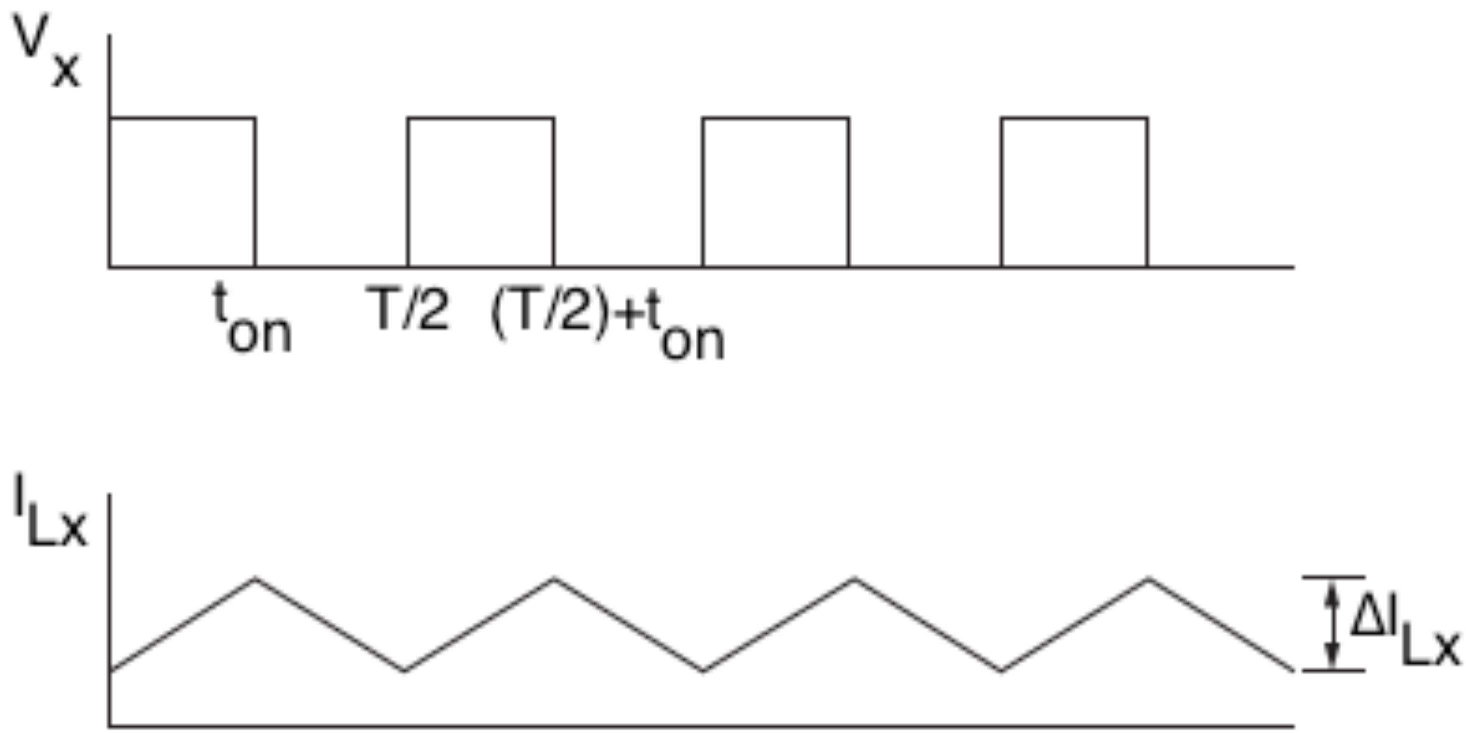
Y la tensión de salida resulta:

$$V_o = 2kV_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (255)$$

Como en el conversor balancín, la tensión de salida depende del ciclo de trabajo del conmutador, como en el conversor reductor, pero por supuesto está afectada por la relación de transformación del transformador de toma central, lo que permite obtener tensiones mayores o menores que la tensión de entrada.

Comparado con el conversor balancín, el puente con transformador requiere de dos interruptores controlados adicionales, pero el transformador es mas simple, por lo que esta configuración puede resultar menos costosa.

Para calcular los componentes del filtro de salida es preciso tomar en cuenta que, desde el punto de vista de la salida, durante cada período T circulan dos pulsos de corriente por la inductancia (desde este punto de vista el conversor puente con transformador se comporta como un arreglo entrelazado de dos conversores individuales.



Relación entre la corriente en la inductancia del filtro y los pulsos de tensión en el secundario.

$$\Delta I_{Lx} = \frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2}-k\right)T = \left[\frac{2kV_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)}{L_x}\right]\left(\frac{1}{2}-k\right)T \quad (256)$$

$$\Delta I_{Lx} = \frac{2kV_sN_s}{L_xN_p}\left(\frac{1}{2}-k\right)T \quad (257)$$

$$\Delta I_{Lx} = \frac{2kV_sN_s}{L_xN_pf}\left(\frac{1}{2}-k\right) \quad (258)$$

$$L_x = \frac{2kV_sN_s}{\Delta I_{Lx}N_pf}\left(\frac{1}{2}-k\right) \quad (259)$$

En estado estacionario:

$$\bar{I}_{Lx} = \frac{V_O}{R_O} \quad (260)$$

y por definición:

$$Q = CV_O \quad (261)$$

$$\Delta Q = C\Delta V_O = \int_0^t i_c(\tau)d\tau \quad (262)$$

La corriente en el condensador resulta:

$$i_c(t) = i_{Lx}(t) - I_{Ro} \quad (263)$$

$$i_c(t) = \bar{I}_{Lx}(+/-)\frac{\Delta I_{Lx}}{2} - I_{Ro} = (+/-)\frac{\Delta I_{Lx}}{2} \quad (264)$$

por geometría:

$$\Delta Q = \acute{A}rea \quad del \quad tri\acute{a}ngulo = \frac{b*a}{2} \quad (265)$$

$$\Delta V_o = \frac{b*a}{2C} \quad (266)$$

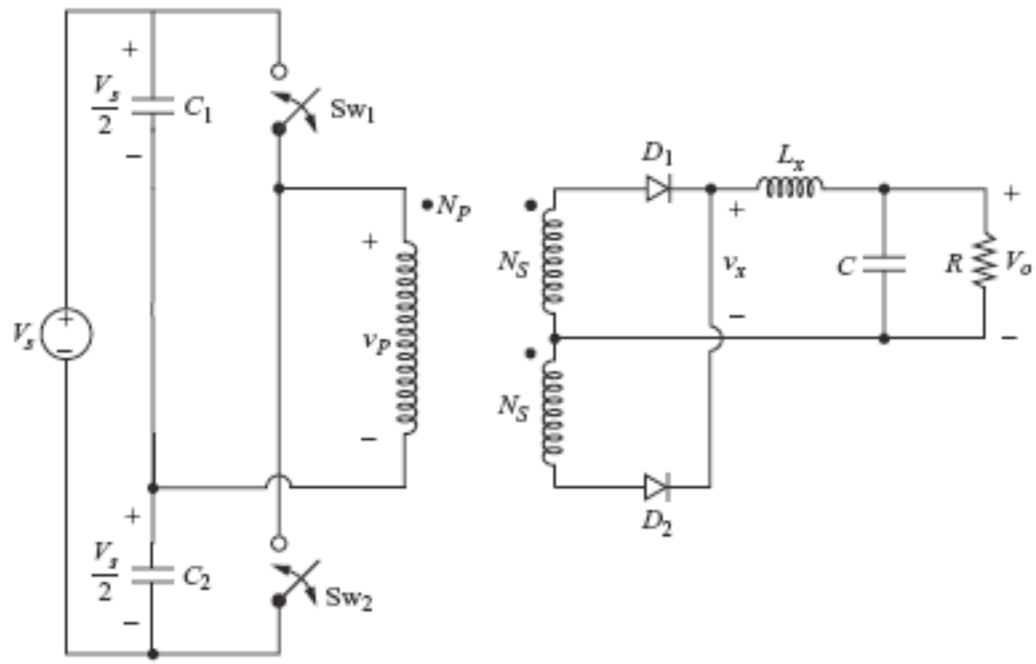
$$b = \frac{T}{4} \quad (267)$$

$$a = \frac{\Delta I_{Lx}}{2} \quad (268)$$

$$\Delta V_o = \frac{1}{2C}\left(\frac{T}{4}\right)\left[\frac{V_o}{2L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T\right] \quad (269)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o(1-2k)}{32CL_x f^2} \quad (270)$$

IV-Conversor semi-puente con transformador.



Configuración del circuito conversor semi-puente con transformador.

Por la estructura del puente, Sw_1 y Sw_2 no pueden conducir simultáneamente.

Los dos condensadores C_1 y C_2, del mismo valor son imprescindibles para la operación del conversor.

En primera aproximación se asume que estos condensadores son significativamente grandes, de forma que la tensión en cada uno de ellos es siempre $\frac{V_S}{2}$; cualquier desviación de este valor provocará directamente un cambio en la tensión de salida.

Cuando Sw_1 conduce la corriente en el primario del transformador es positiva y cuando Sw_2 conduce la corriente en el primario del transformador es negativa.

En general la operación de este conversor es igual a la del conversor puente completo, la única diferencia es que la tensión aplicada al primario del transformador es la mitad de la tensión de alimentación. Para obtener el mismo voltaje de salida se requiere un transformador con una relación de transformación igual al doble de la necesaria en un conversor puente equivalente desde el punto de vista de las tensiones de alimentación y salida.

La configuración medio puente requiere la mitad de conmutadores que requiere la configuración puente equivalente, pero estos son reemplazados por dos condensadores de tamaño significativo, lo que puede llevar a que sea mas costoso que un puente completo equivalente.

Se asume operación en modo estacionario.

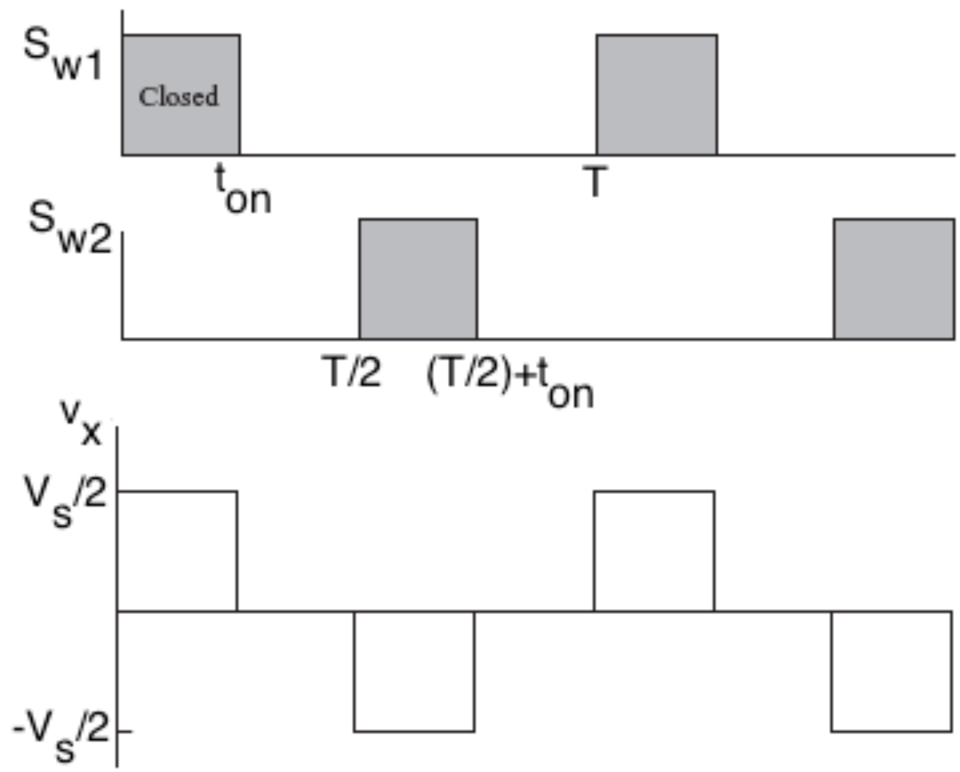
Los tiempos de conducción de los conmutadores son iguales:

$$t_{S_{w1}} = t_{S_{w2}} = t_{on}$$

La frecuencia de conmutación, f, es constante, y el tiempo de conducción de los conmutadores, en función del tiempo total de ciclo, T, es:

$$t_{S_{w1}} = t_{S_{w2}} = t_{on} = kT$$

Los intervalos de conducción de los conmutadores están separados entre si medio período de conducción, T/2.



Cuando S_1 cierra, las tensiones son:

$$v_p = V_s - \frac{V_s}{2} = \frac{V_s}{2} \quad (271)$$

$$v_{s1} = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (272)$$

$$v_{s2} = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (273)$$

En estas condiciones D_1 esta polarizado en directo y D_2 esta polarizado en inverso y bloquea.

$$v_x = v_{s1} = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (274)$$

$$v_{Lx} = v_x - v_o(t) = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t) \quad (275)$$

$$v_L = L\frac{di_L(t)}{dt} \quad (276)$$

$$v_{Lx} = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t) = L_x \frac{di_{Lx}(t)}{dt} \quad (277)$$

Si la tensión de salida es constante $\left(v_o(t) = V_o\right)$:

$$L_x \frac{di_{Lx}(t)}{dt} = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \quad (278)$$

$$\frac{\Delta I_{Lxon1}}{\Delta t_{on1}} = \frac{1}{L_x}\left[\frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (279)$$

como el intervalo de conducción es kT:

$$\frac{\Delta I_{Lxon1}}{kT} = \frac{1}{L_x}\left[\frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (280)$$

$$\Delta I_{Lxon1} = \frac{kT}{L_x}\left[\frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o\right] \quad (281)$$

Cuando S_2 cierra las tensiones son:

$$v_p = -V_s + \frac{V_s}{2} = -\frac{V_s}{2} \quad (282)$$

$$v_{s1} = -\frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (283)$$

$$v_{s2} = -\frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (284)$$

En estas condiciones D_2 esta polarizado en directo y D_1 esta polarizado en inverso y bloquea.

$$v_x = -v_{s2} = -\left[-\frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right)\right] = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (285)$$

$$v_{Lx} = v_x - v_o(t) = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - v_o(t) = \frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \quad (286)$$

y todas las otras ecuaciones son iguales.

Cuando ambos transistores están apagados

$$v_x = 0 \quad (287)$$

$$v_{Lx} = v_x - V_o = -V_o \quad (288)$$

$$L_x \frac{di_{Lx}(t)}{dt} = -V_o \quad (289)$$

$$\frac{di_{Lx}(t)}{dt} = -\frac{V_o}{L_x} \quad (290)$$

$$\frac{\Delta i_{Lxoff}}{\Delta t_{off}} = -\frac{V_o}{L_x} \quad (291)$$

$$\Delta i_{Lxoff} = -\frac{V_o}{L_x} \Delta t_{off} \quad (292)$$

El tiempo de apagado de los dos transistores es:

$$\Delta t_{off} = \frac{T}{2} - kT \qquad (293)$$

$$\Delta i_{Lxoff} = -\frac{V_o}{L_x}\left(\frac{T}{2} - kT\right) = \frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T \qquad (294)$$

pero para operar en estado estacionario:

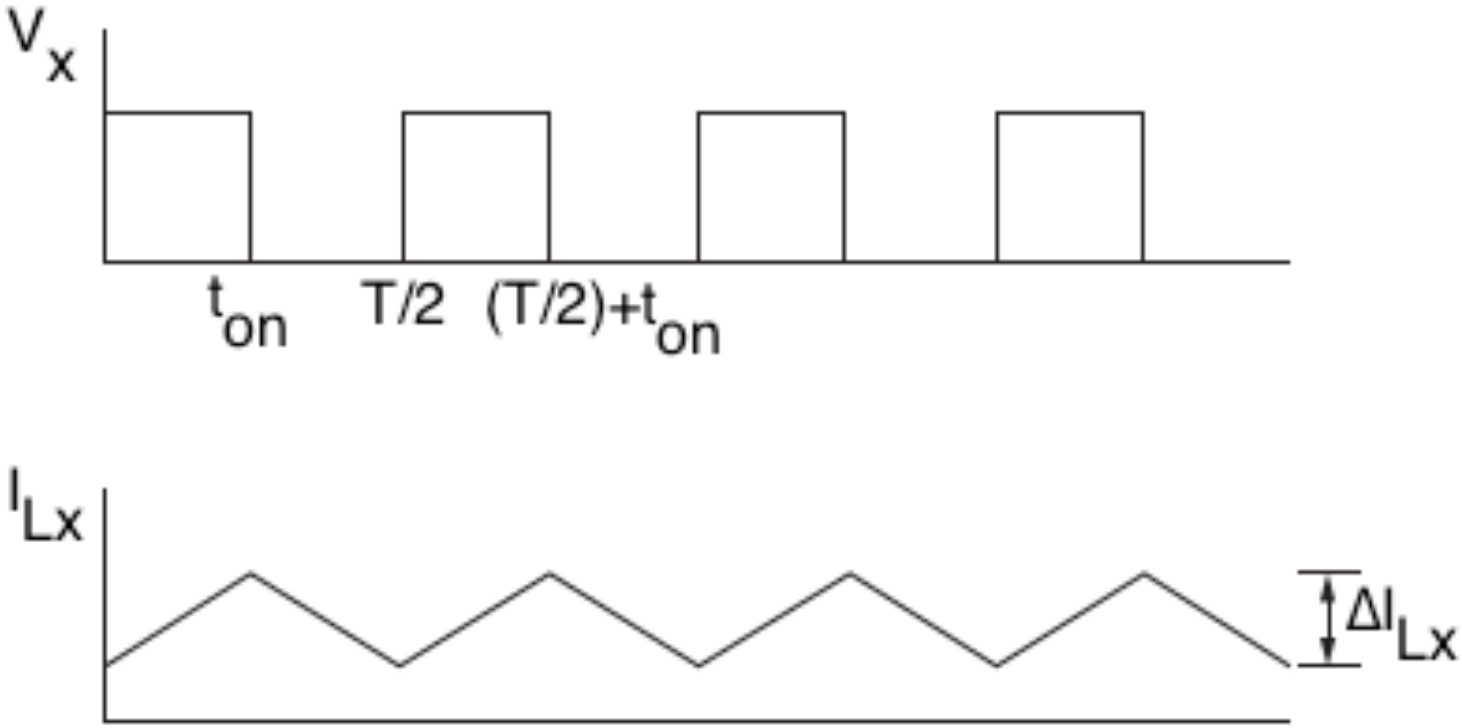
$$\left|\Delta I_{Lxon}\right| = \left|\Delta I_{Lxoff}\right| = \Delta I_{Lx} \quad (295)$$

$$\frac{kT}{L_x}\left[\frac{V_s}{2}\left(\frac{N_s}{N_p}\right)-V_o\right]=\frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2}-k\right)T \quad (296)$$

y la tensión de salida resulta:

$$V_o = kV_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (297)$$

Para calcular los componentes del filtro de salida es preciso tomar en cuenta que, desde el punto de vista de la salida, durante cada período T circulan dos pulsos de corriente por la inductancia (desde este punto de vista el conversor puente con transformador se comporta como un arreglo entrelazado de dos conversores individuales.



Relación entre la corriente en la inductancia del filtro y los pulsos de tensión en el secundario.

$$\Delta I_{Lx} = \frac{V_o}{L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T = \left[\frac{kV_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)}{L_x}\right]\left(\frac{1}{2} - k\right)T \quad (298)$$

$$\Delta I_{Lx} = \frac{kV_sN_s}{L_xN_p}\left(\frac{1}{2} - k\right)T \quad (299)$$

$$\Delta I_{Lx} = \frac{kV_sN_s}{L_xN_pf}\left(\frac{1}{2} - k\right) \quad (300)$$

$$L_x = \frac{kV_sN_s}{\Delta I_{Lx}N_pf}\left(\frac{1}{2} - k\right) \quad (301)$$

Por supuesto, en estado estacionario:

$$\bar{I}_{Lx} = \frac{V_o}{R_o} \quad (302)$$

y por definición:

$$Q = CV_o \quad (303)$$

$$\Delta Q = C\Delta V_o = \int_0^t i_c(\tau)d\tau \quad (304)$$

La corriente en el condensador resulta:

$$i_c(t) = i_{Lx}(t) - I_{Ro} \qquad (305)$$

$$i_c(t) = \bar{I}_{Lx}(+/-)\frac{\Delta I_{Lx}}{2} - I_{Ro} = (+/-)\frac{\Delta I_{Lx}}{2} \qquad (306)$$

por geometría:

$$\Delta Q = \acute{A}rea \quad del \quad tri\acute{a}ngulo = \frac{b * a}{2} \qquad (307)$$

$$\Delta V_O = \frac{b * a}{2C} \qquad (308)$$

$$b = \frac{T}{4} \qquad (309)$$

$$a = \frac{\Delta I_{Lx}}{2} \qquad (310)$$

$$\Delta V_o = \frac{1}{2C}\left(\frac{T}{4}\right)\left[\frac{V_o}{2L_x}\left(\frac{1}{2} - k\right)T\right] \quad (311)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o(1 - 2k)}{32CL_x f^2} \quad (312)$$