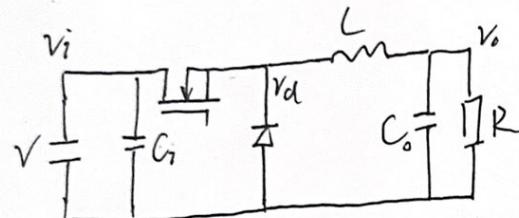


Buck 变换器

已知：输入 v_i ，输出 v_o ，开关频率 f ，输入纹波 Δv_i ，输出纹波 Δv_o ，负载电阻 R

求解：电感 L ，输入滤波电容 C_i ，输出滤波电容 C_o



$$ON: \quad v_L = v_i - v_o = \frac{di}{dt} \cdot L \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{v_i - v_o}{L} \quad \text{线性上升}$$

$$OFF: \quad v_L = -v_d - v_o = \frac{di_2}{dt} \cdot L \Rightarrow \frac{di_2}{dt} = -\frac{v_d + v_o}{L} \quad \text{线性下降}$$

上升、下降均为线性，且上升和下降高度是相同的

$\frac{T_{on}}{T_{off}} = \frac{v_i - v_o}{v_o + v_d}$... T_{on} 和 T_{off} 与上升斜率成反比

$$\frac{T_{on}}{T_{off}} = \frac{v_o + v_d}{v_i - v_o}$$

$$伏特积: (v_i - v_o) T_{on} = T_{off} (v_o + v_d)$$

$$T_{on} + T_{off} = T = \frac{1}{f}$$

$$T_{on} = \frac{v_o + v_d}{v_i - v_o} \cdot \frac{1}{f} \quad T_{off} = \frac{v_i - v_o}{v_i + v_d} \cdot \frac{1}{f}$$

$$D: 占空比 = \frac{T_{on}}{T} = \frac{v_o + v_d}{v_i - v_o}$$

以上仅为开环 Buck，同步时需对压降 V_d 进行修正。

功率电感选择：考虑两个方面，电感量和电流

电感电流又分为：平均电流 I_L 和纹波电流

平均电流：输出电压 v_o 不变，那么滤波电容

周围也就设计成电流

$$则，平均电流 $I_L = I_o$$$

纹波电流：由先前推导可知，上升和下降均为线性，故电感电流即为三角波。

$$\text{纹波电流 } \Delta i_L = d_i = \frac{v_i - v_o}{L} \cdot T_{on} = \frac{v_o + v_d}{L} \cdot T_{off}$$

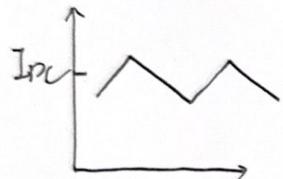
$$\Delta i_L = \frac{v_i - v_o}{L} \cdot \frac{v_o + v_d}{v_i - v_o} \cdot \frac{1}{f} = \frac{v_o + v_d}{L} \cdot \frac{v_i - v_o}{v_i + v_d} \cdot \frac{1}{f}$$

通过上述的假设，电流互感器

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} \cdot \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} \cdot \frac{1}{f} = \frac{V_d + V_o}{L} \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_i + V_d} \cdot \frac{1}{f}$$

纹波电流大小和负载没有关系。

电感电流：



平均电流 + 纹波电流 = 电感电流

$$I_{lp} : \text{电感的峰值电流} \quad I_{lp} = I_{DC} + \frac{\Delta I_L}{2} = I_o + \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$I_{lp} = I_o + \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} \cdot \frac{1}{f} (V_{in} - V_o)$$

选择电感选型时注意：感值，直流内阻，饱和电流，温升电流

饱和电流应当要比 I_{lp} 峰值电流大 30% 左右。

纹波电流 ΔI_L 一般设计为 I_o 的 4%，2%，~ 2%，为宜。

也就是 $\Delta I_L = (0.2 \sim 0.4) I_o$ 。通过这个就可以求得电感值范围了。

$$\left\{ \begin{array}{l} I_2 = I_o \\ \Delta I_L = (0.2 \sim 0.4) I_o \\ \Delta I_L = \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} \cdot \frac{1}{f} (V_{in} - V_o) \end{array} \right. \Rightarrow L = \frac{V_o + V_d}{f I_o (0.2 \sim 0.4)} \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_i + V_d}$$
$$L = \frac{V_o + V_d}{V_i + V_d} \cdot \frac{V_{in} - V_o}{f I_o (0.2 \sim 0.4)}$$

输入滤波电容计算.

寄生电感、滤波电容、开关频率导致输入电源的电流是恒定的
稳态下恒定电流也等于平均电流 I_i

求解平均电流 I_i 应遵循恒定定律.

考虑mos管损耗.

损耗功率: 二极管、负载电阻.

$$P_d = V_o \cdot I_o \quad \text{负载功率}$$

~~二极管功率~~: 二极管工作时间为 T_{off} .

先计算总能量损耗: ~~工作~~ 电流即为电感电流. 电压为 V_d

$$W_D = I_o \cdot V_d \cdot T_{off} \quad P_d = \frac{W_D}{T} = I_o \cdot V_d \cdot T_{off} \cdot f \quad I_L = I_o$$

$$P_d = I_o \cdot V_d \cdot T_{off} \cdot f$$

$$P_{loss} = V_o I_o + V_d I_o T_{off} \cdot f = I_i \cdot V_{in}$$

$$I_i = \frac{V_o I_o + V_d I_o T_{off} \cdot f}{V_{in}} = \frac{V_o I_o + V_d I_o (V_{in} - V_o)}{V_{in} + V_d} \cdot f \cdot \frac{1}{f}$$

$$= \frac{I_o}{V_{in}} \left(V_o + V_d \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \right)$$

输入电压纹波就是输入电容上电压变化

电容纹波分为两部分

1. 电容充放电, 电荷量的变化 U_p

2. 电容等效电阻ESR压降变化 U_{esr}

$$\Delta V_i = U_p + U_{esr}$$

1. 电容电荷量引起的压降由

从输入端口返回其值

- 当开关断开时: 从DS管流经电流为0.

$I_v = I_i$. 电流全部流经电容.

- 开关闭合时, 电感电流. 电流由电源和电容共同提供. 电容此时放电. 开关电流突变则电容电流也突变.

(一个周期内电容充电量和电容放电量相等)

$$U_p: Q = CV_p = I_i t = I_i T_{off} \quad U_p = \frac{I_i \cdot T_{off}}{C}$$

$$U_p = \frac{I_i}{C} \cdot \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{f} = \frac{I_o}{V_{in} C f} \left(V_o + V_d \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \right) \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d}$$

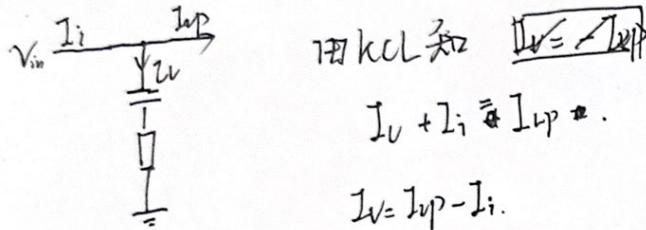
三. 电流流经ESR产生压降.

充电: $U_{esr} = I_i \cdot Z_{SR}$

放电: 电感电流 $I_{dp} = I_o + \frac{\Delta I_i}{2}$

$$I_{up} = I_o + \frac{\Delta I_i}{2} \quad \text{则 MOS 管最大电流为 } I_{up}$$

由 KCL 和 故电
至 电容最大电流



$$\text{由 } I_i \text{ 为 } I_i = \frac{I_o}{V_{in}} (V_o + V_d \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d})$$

$$I_{up} = I_o + \frac{\Delta I_i}{2}$$

则 $I_V = I_o + \frac{\Delta I_{iu}}{2} - I_i$ 即 电容被电时的 ^{1/2} 最大
电流.

开关打开时

ESR 压降为 $I_i \cdot ZSR$.

$$V_{up} = V_d + I_i \cdot ZSR = \frac{I_i}{C} \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{f} = \frac{I_o}{V_{in} C f} (V_o + V_d \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d}) \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} + I_i \cdot ZSR$$

开关闭合时

ESR 压降为 $I_V \cdot ZSR$. 电容降为 0

$$V_{us} = ZSR \cdot (-I_V) \quad \text{如果充电电流向方向为正. 则放电即为 (-)}$$

$$V_{us} = ZSR \cdot (-I_V) = ZSR (I_i - I_o - \frac{\Delta I_i}{2})$$

$\Delta V = V_{up} - V_{us}$ 即 电压变化量

$$= \frac{I_o}{V_{in} C f} (V_o + V_d \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d}) \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} + ZSR (I_o + \frac{\Delta I_i}{2})$$

$$\text{代入 } \Delta I_{iu} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \cdot \frac{V_d + V_o}{V_{in} + V_d} \cdot \frac{1}{f}$$

$$= \frac{I_o}{V_{in} C f} (V_o + V_d \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d}) \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} + ZSR (I_o + \frac{V_{in} - V_o}{2 f L}) \cdot \frac{V_d + V_o}{V_{in} + V_d}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \cancel{ZSR} V_{esr} = ZSR (I_o + \frac{V_{in} - V_o}{2 f L} \frac{V_d + V_o}{V_{in} + V_d}) \\ V_q = \frac{I_o}{V_{in} C f} (V_o + V_d \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d}) \frac{V_{in} - V_o}{V_{in} + V_d} \end{array} \right.$$

$$\Delta V = V_q + \cancel{ZSR} V_{esr}$$

电压

其中. 可以看出输入电容纹波大小
与电容值 C 和 电容内阻 r 有关.

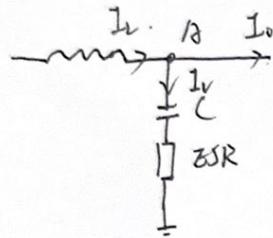
与时延和选用的电感也有关.

挑选电容时可以根据电容容量和 ZSR
两个指标来进行设计.

输出滤波电容

与输入滤波电容相类似，也由 V_0 和 Z_{CR} 共同决定。

四



由KCL可知，节点分外电流和
电动势，令电容充电电流为正向

山并水

其中，流向负载R的电流 I_2 可以看作是恒定的，则 $I_2 = \frac{V_0}{R}$
则电感的电流变化即为电容的电流变化，且总和为 0。

当电流大于0时，电容充电
反向充电

由能量守恒和麦克斯韦方程组，法拉第电磁感应定律上得电流变化与电压变化是一致的

而电容充放电仅由电流大小决定，与电感关系密切。电容和电感的极性相同，且电容充放电都是周期的一半。工频电电流均为正弦，充放电的切换不是由开关通断决定，而是根据中间时

④ 无源电的切换不是由开关通断决定，而是通过继电器

可用 $Q=It$ 证明

$$总充电量即为 \frac{I}{2} \cdot \frac{\Delta t_2}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{\Delta t_2}{4} I$$

$$Q = It = CVq \quad . \quad Vq = \frac{\Delta I_v}{\eta f c} = \frac{1}{\eta f c} \left(\frac{V_{in}-V_o}{I_f} \frac{V_o+V_d}{V_{in}+V_d} \right)$$

$$V_q = \frac{V_{in} - V_o}{8f^2LC} \cdot \frac{V_{in} + V_o}{V_{in} + V_d}$$

ESR 序言

充电：最大电流 $\frac{\Delta L_L}{2}$. $V_{\text{充}} = \frac{\Delta L_L}{2} BSR$

$$放电: 最小电流 - \frac{qL}{2} \quad V_{32} = - \frac{qL}{2} BSR$$

$$V_{esr} = \frac{V_{in} - V_o}{V_f} \cdot ZSR$$

$$\Delta V_0 = Vq + V_{err}$$

$$= \frac{V_{in} - V_o}{8f^2LC} \cdot \frac{V_o + V_d}{V_{in} + V_d} + \frac{V_{in} - V_o}{2f} \cdot \frac{V_o + V_d}{V_{in} + V_d} \cdot BSR$$

可见 ΔV_0 也由 ESR 和 C 两部分影响

其中陶瓷电容，ESR小，容量小，起主要作用

电解触媒：根据区域选定