

## 两种工作模式下的输出电压纹波

### 引言

新一代的 DC-DC 转换器需要具有快速瞬态响应，以在快速波动的负载条件下维持稳定的输出电压，并且输出纹波应该要很小，以避免对敏感电路性能的影响，本文将对两种不同工作模式下的输出电压纹波做出详细的解释。

### 连续导通模式（CCM）输出纹波

对于降压变换器，在连续导通模式中，输出纹波电压主要由输出电容的充放电和等效串联电阻（ESR）引起，其中电感纹波电流 $\Delta I_L$ 可以从以下公式计算：

$$\Delta I_L = \frac{V_{OUT}(V_{IN}-V_{OUT})}{V_{IN} \cdot f_{SW} \cdot L} \quad (1)$$

输出电容纹波电压可以从以下公式计算：

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C_{OUT} \cdot f_{SW}} \quad (2)$$

这适用于低等效串联电阻（ESR）的多层陶瓷电容；如果输出电容有一些 ESR，纹波电压公式将会增加，公式如下：

$$\Delta V_{ESR} = \Delta I_L \cdot R_{ESR} \quad (3)$$

所以对于 Buck 电路，总纹波电压的计算公式可以近似为：

$$\Delta V_{OUT} \approx \Delta I_L \cdot \left( R_{ESR} + \frac{1}{8 \cdot C_{OUT} \cdot f_{SW}} \right) \quad (4)$$

在使用多层陶瓷电容时，需要确保在进行计算时，考虑直流偏置电压，以获得有效电容值；从以上公式中可以看出，负载电流不在其中，这意味着在降压转换器保持连续导通模式时，输出纹波电压不会随负载电流的变化而变化。

### 不连续导通模式（DCM）输出纹波

在开关电源的不连续导通模式（DCM）下，电感电流在每个开关周期内会降至零，导致输出纹波电压的特性与连续导通模式（CCM）不同。DCM 的纹波电压主要由输出电容的充放电和 ESR 决定，但电流波形和能量传递方式差异显著。由于电感电流不连续，电容需在电感电流为零时维持输出电压，充放电幅度更大，输出电容的电荷变化量（ $\Delta Q$ ）由负载电流（ $I_{OUT}$ ）和开关周期（ $T_{SW}$ ）决定，公式如下：

$$\Delta V_C = \frac{\Delta Q}{C_{OUT}} = \frac{I_{OUT} \cdot T_{SW}}{C_{OUT}} \quad (5)$$

但由于 DCM 的能量传递不连续，实际纹波更大，所以更为准确的表达式为：

$$\Delta V_C \approx \frac{I_{OUT}}{2 \cdot f_{SW} \cdot C_{OUT}} \quad (6)$$

DCM 的电流波形为三角波，峰值电流（ $I_{L\_peak}$ ）较高，ESR 引起的纹波为：

$$\Delta V_{ESR} = \Delta I_{L\_peak} \cdot R_{ESR} \quad (7)$$

其中，峰值电感电流（ $I_{L\_peak}$ ）由输入输出电压和占空比决定：

$$I_{L\_peak} = \frac{V_{IN}-V_{OUT}}{L} \cdot D \cdot T_{SW} \quad (8)$$

综上，DCM 总纹波电压公式近似为：

$$\Delta V_{OUT} \approx \Delta I_{L\_peak} \cdot R_{ESR} + \frac{I_{OUT}}{2 \cdot f_{SW} \cdot C_{OUT}} \quad (9)$$

根据上述公式可以看出，DCM 的纹波电压主要受 ESR 影响，峰值电流越高，纹波电压会越大。