

LLC 变压器设计计算

一、 输入电压范围： $V_{IN_max} = 420V$, $V_{IN_min} = 320V$

额定输入电压： $V_{IN_NOM} = 400V$

额定输出电压和电流： $V_o = 14V$ 、 $I_o = 20A$

二、 选择谐振频率和工作区域：

谐振频率： $f_r = 100KHz$

额定输入输出时电源工作 f_r 。

详细参数计算

1、 理论匝比

$$n = \frac{V_{IN_nom}/2}{V_o + V_D} = \frac{V_{IN_nom}}{2 * (V_o + V_D)} = \frac{400}{2 * (14 + 0.5)} = 13.793$$

2、 最高、最低输入电压的增益

$$G_{MIN} = 2 * n * \frac{V_o + V_D}{V_{IN_max}} = 2 * 13.793 * \frac{14 + 0.5}{420} = 0.952$$

$$G_{MAX} = 2 * n * \frac{V_o + V_D}{V_{IN_min}} = 2 * 13.793 * \frac{14 + 0.5}{320} = 1.249$$

3、 计算负载电阻与反射电阻

$$R_L = \frac{V_o}{I_o} = \frac{14}{20} = 0.7$$

$$R_{AC} = n^2 * \frac{8}{\pi^2} * R_L = \frac{8 * n^2 * R_L}{\pi^2} = \frac{8 * 13.793^2 * 0.7}{\pi^2} = 108.055$$

4、 取 K 值

$$K = \frac{L_P}{L_S} = 6$$

k 值选 3~7 之间可以接受, k 值选大, 会增大频率范围, 较小的 k 值可以减小频率范围, 但是轻载效率较低。k 值越小, 获得相同增益的频率变化范围越窄 k 值越大, 获得相同增益的频率变化范围越宽。

k 值越大, MOSFET 在 f_r 附近的导通损耗和开关损耗越低。为了获得较好的环路调整和较高的效率、较低的文波, 以及轻载电压的稳定, 个人经验选择 $k = 6$ 。

5、 计算 Q、 f_{\min} 、 f_{\max} 、 L_s 、 L_p 、 L_r

$$Q = \frac{Z_o}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{\frac{8 * n^2 * R_L}{\pi^2 * \eta}} = \frac{0.95}{K * G_{MAX}} * \sqrt{K + \frac{G_{MAX}^2}{G_{MAX}^2 - 1}}$$
$$= \frac{0.95}{6 * 1.249} * \sqrt{6 + \frac{1.249^2}{1.249^2 - 1}} = 0.375$$

由于：

$$Q = \frac{2\pi f_r L_s}{R_{AC}} \Rightarrow Q \downarrow \Rightarrow L_s \downarrow \Rightarrow L_p = K * L_s \downarrow \Rightarrow L_m = (L_s + L_p) \downarrow \Rightarrow I_{LP} \uparrow$$

$$I_{rms} = \frac{V_o}{8nR_L} \sqrt{8\pi^2 + \frac{2n^2 R_L^2}{L_m^2 f_r^2}} \uparrow \Rightarrow \eta \downarrow$$

K 值固定后, 在保证 ZVS 的条件下尽量选用大的 Q 值。

$$f_{MIN} = \frac{f_r}{\sqrt{1 + K(1 - \frac{1}{G_{MAX}^2})}} = \frac{100}{\sqrt{1 + 6 * (1 - \frac{1}{1.249^2})}}$$

$$= 56.309KHz$$

$$f_{MAX} = \frac{f_r}{\sqrt{1 + K(1 - \frac{1}{G_{MIN}^2})}} = \frac{100}{\sqrt{1 + 6 * (1 - \frac{1}{0.95^2})}}$$

$$= 120.894KHz$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * Q} = \frac{10^6}{2\pi * 100 * 108.055 * 0.3757}$$

$$= 39.204nF$$

$$L_s = \frac{Q * R_{AC}}{2\pi * f_r} = \frac{10^3 * 0.3757 * 108.055}{2\pi * 100} = 64.61\mu H$$

$$L_p = K * L_r = 6 * 64.61 = 387.66\mu H$$

由于实际选型时，电容规格组合一定，所以选择合适的 C_r 值，再推算其它参数。

选择 $C_r = 33nF$

假设 C_r 一定，则其它参数推算如下：

$$Q = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * C_r} = \frac{10^6}{2\pi * 100 * 108.055 * 33} = 0.4463$$

关于 Q 值的考虑：

当 $Q > 1$ 时，反馈微小的变化量会引起比较大的输出变化，因而往往会导致回路震荡，

因此实际工作时 Q 要小于1，工作在负反馈状态下，所以一般实际应用上选取的 L 值对应的

Q 是小于 1 的。如果在已经设计好的回路中 Q 值大于 1，就往往会
产生工作不稳定的现象，

或者输出环路不稳定，且输出纹波较高（LLC 电路对前级无衰减）。

由于 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s * C_r}}$ ，则有：

$$L_s = \frac{1}{4\pi^2 * C_r * f_r^2} = \frac{Q * R_{AC}}{2\pi * f_r} = \frac{10^3 * 0.4463 * 108.055}{2\pi * 100} = 76.75\mu H$$

$$L_p = K * L_r = 6 * 76.75 = 460.5\mu H$$

$$f_{MIN} = \frac{f_r}{\sqrt{1+K(1-\frac{1}{G_{MAX}^2})}} \text{ 不变, } f_{MAX} = \frac{f_r}{\sqrt{1+K(1-\frac{1}{G_{MIN}^2})}}, \text{ K 值不变。}$$

(注：由于反推一些参数，可以明显发现最初设定的最大增益 G_{MAX} 和最小输入电压 V_{IN_MIN} 改变了，但是对于变换器来说，此改变可以接受。)

考虑实际问题，主变压器采取夹绕方式，考虑本身漏感为 1%，故真正的 L_s 取值需要变小一点。

综上，取 $C_r = 33nF$ ， $L_s = 75\mu H$ ， $L_p = 465\mu H$

$$\text{即 } K = \frac{L_p}{L_s} = \frac{465}{75} = 6.2$$

6、核算 $I_m > I_p$

$$I_m = \frac{V_{IN_MAX}}{\Delta f_{MAX} * (L_r + L_p)} = \frac{10^3 * 420}{4 * 120.8941 * (75 + 465)} = 1.6083A$$

$$I_p = (2C_{oss} + C_{styay}) \frac{V_{IN_MAX}}{T_d} = 500 * 10^{-2} * \frac{420}{200 * 10^{-9}} = 1.05A$$

$I_m > I_p$ (如不满足需要降低 Q 或增大 $L_r + L_p$)

7、 实际变比

$$n_{real} = n * \sqrt{\frac{L_r + L_p}{L_p}} = n * \sqrt{\frac{k+1}{k}} = 13.793 * \sqrt{\frac{6.2+1}{6.2}} = 14.8631$$

8、 初级最小匝数

$$N_{P_MIN} = \frac{n_{real}(V_O + V_D)}{2f_{MIN} * \Delta B * A_e} = \frac{10^3 * 14.8631 * (14 + 0.5)}{2 * 79.5938 * 0.4 * 97} \\ = 34.8928T_s$$

根据实际变压器尺寸选择 $N_P = 44T$ 、 $N_S = 3T$ 、 $n_{real} = 14.666$

9、 初级电流有效值

$$I_{rms} = \frac{V_O}{8nR_L} * \sqrt{\frac{2n^4R_L^2}{L_r^2f_r^2} + 8\pi^2} = \\ \frac{14}{8 * 14.666 * 0.7} * \sqrt{\frac{10^3 * 2 * 14.666^4 * 0.7^2}{75^2 * 100^2} + 8\pi^2} = 1.52163A$$

10、 MOSFET 电压、电流最大值、电流有效值

$$V_{MOS} = V_{IN_MAX} = 420V$$

$$I_{MAX_MOS} = I_{OCP} = 1.2 * I_{RMS} = 1.8259A$$

$$I_{rms_MOS} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2}} = 1.1066A$$

$$P_{Conduct_loss} = I_{rms_MOS}^2 R_{ds} = 1.2245R_{ds} \text{ W}$$

11、次级整流管电压、电流、损耗

$$V_{D_MAX} = 2 * V_O = 2 * 14 = 28V$$

$$I_{D_Avg} = \frac{I_O}{2} = \frac{20}{2} = 10A$$

$$P_{Conduct_loss} = V_{D_Conduct_Avg} * I_{D_Avg} = 0.5 * 10 = 5W$$

12、谐振电容电流有效值、最大电压

$$\begin{aligned} I_{Cr_rms} = I_{rms} &= \frac{V_O}{8nR_L} * \sqrt{\frac{2n^4R_L^2}{L_r^2 f_r^2} + 8\pi^2} \\ &= \frac{14}{8 * 14.666 * 0.7} \\ &* \sqrt{\frac{10^3 * 2 * 14.666^4 * 0.7^2}{75^2 * 100^2} + 8\pi^2} = 1.52163 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{Cr_MAX} &\cong \frac{V_{IN_MAX}}{2} + \sqrt{2} * I_{rms_MAX} * \frac{1}{2\pi f_r C_r} \\ &= \frac{420}{2} + \sqrt{2} * I_{OCP} * \frac{1}{2\pi * 100 * 33} \\ &= \frac{420}{2} + \sqrt{2} * 1.8259 * \frac{1}{2\pi * 100 * 33} = 210V \end{aligned}$$

13、输出电容的电流有效值

$$I_{Co_Rms} = \sqrt{\left(\frac{\pi I_O}{2\sqrt{2}}\right)^2 - I_O^2} = \sqrt{\frac{\pi^2 - 8}{8}} * I_O = 9.6426A$$

14、 器件选择

MOSFET:满足 20%裕量, 电流从发热和 C_{OSS} 考虑 (保证高压时 ZVS)

C_r : 满足 RMS 电流的要求, 电压为计算值的 1.5 倍左右

C_o : 满足 RMS 电流的要求

15、 C_r 取值与功率 P 的关系

$$\text{由于 } Q = \frac{Z_o}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{\frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{\frac{8 \cdot n^2 \cdot R_L}{\pi^2 \cdot \eta}}} = \frac{0.95}{K \cdot G_{MAX}} * \sqrt{K + \frac{G_{MAX}^2}{G_{MAX}^2 - 1}}, \text{ 其中}$$

K, G_{MAX} 为固定值, 又由于 $C_r = \frac{1}{2\pi \cdot f_r \cdot R_{AC} \cdot Q}$, 故在选取 C_r 时, 主要由 R_{AC} 决定。

因为 $R_{AC} = \frac{8 \cdot n^2 \cdot R_L}{\pi^2}$, $R_L = \frac{V_o}{I_o}$, $n = \frac{V_{IN_nom}/2}{V_o + V_D} = \frac{V_{IN_nom}}{2 \cdot (V_o + V_D)}$, 所以

$$R_{AC} = \frac{2V_o V_{IN_NOM}^2}{\pi^2 I_o (V_o + V_D)^2}$$

考虑 V_D 较小, 则有

$$R_{AC} = \frac{2V_o V_{IN_NOM}^2}{\pi^2 I_o (V_o + V_D)^2} \cong \frac{2V_o V_{IN_NOM}^2}{\pi^2 I_o V_o^2} = \frac{2V_{IN_NOM}^2}{\pi^2 I_o V_o} = \frac{2V_{IN_NOM}^2}{\pi^2 P_o}$$

综上所述, R_{AC} 的值仅与输入电压和功率有关系, 即在谐振参数 C_r, L_r 的选择上, 仅需要考虑变换器所要求的功率, 而不需要太关心输出 V_o 和 I_o 。

20170428

154600