

LLC变压器设计步骤与说明

-----夏建彬

已知条件:

一、输入电压范围: $V_{IN_{MIN}}, V_{IN_{MAX}}$ 额定输入电压: $V_{IN_{NOM}}$ 输出电压电流 (最大值): V_0 / I_0

二、选择谐振频率和工作区域

谐振频率 f_r 额定输入输出时电源工作在 f_r

参数计算

1、理论变比

$$n = \frac{V_{IN_{NOM}} / 2}{V_0 + V_D} = \frac{V_{IN_{NOM}}}{2 * (V_0 + V_D)}$$

2、最高、最低输入电压的增益

$$G_{MIN} = 2 * n * \frac{(V_0 + V_D)}{V_{IN_{MAX}}}$$

$$G_{MAX} = 2 * n * \frac{(V_0 + V_D)}{V_{IN_{MIN}}}$$

3、计算负载电阻和反射电阻

$$R_L = \frac{V_0}{I_0}$$

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

4、取 k 值

$$k = \frac{L_p}{L_s}$$

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

$$Q = \frac{Z_0}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{\frac{8 * n^2 * R_L}{\pi^2 * \eta}} = \frac{0.95}{k * G_{MAX}} * \sqrt{k + \frac{G_{MAX}^2}{G_{MAX}^2 - 1}}$$

由于:

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

$$I_{rms} = \frac{V_0}{8nR_L} \sqrt{\frac{2n^4 R_L^2}{L_m^2 f_r^2} + 8\pi^2} \uparrow \Rightarrow \eta \downarrow$$

K值固定后, 在保证ZVS的条件下尽量选用大的Q值。

$$f_{MIN} = \frac{f_r}{\sqrt{1 + k(1 - \frac{1}{G_{MAX}^2})}}$$

$$f_{MAX} = \frac{f_r}{\sqrt{1 + k(1 - \frac{1}{G_{MIN}^2})}}$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * Q}$$

$$L_s = \frac{Q * R_{AC}}{2\pi f_r}$$

$$L_p = k * L_s$$

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。

假设 C_r 一定，则其它参数推算如下：

$$Q = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * C_r}$$

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：

$$L_s = \frac{1}{4\pi^2 * C_r * f_r^2}$$

$$L_p = k * L_r$$

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

（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。

6、核算 $I_m > I_p$

$$I_m = \frac{V_{IN,MAX}}{4f_{MAX} * (L_r + L_p)}$$

$$I_p = (2C_{oss} + C_{stray}) \frac{V_{in}}{T_d}$$

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

7、实际变比

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

8、初级最小匝数

$$N_{P-MIN} = \frac{n_{real}(V_0 + V_D)}{2f_{MIN} * \Delta B * A_e}$$

(根据实际变压器尺寸选择 N_p , N_s , n_{real})

9、初级电流有效值

$$I_{rms} = \frac{V_0}{8nR_L} \sqrt{\frac{2n^4 R_L^2}{L_r^2 f_r^2} + 8\pi^2}$$

10、MOSFET电压, 电流最大值, 电流有效值

$$V_{MOS} = V_{INMAX}$$

$$I_{MAX_MOS} = I_{OCP}$$

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

$$P_{Conduct_loss} = I_{rms_MOS}^2 R_{ds}$$

11、次级整流管电压, 电流, 损耗

$$V_{D_MAX} = 2 * V_0$$

$$I_{D_Avg} = \frac{I_0}{2}$$

$$P_{D_Conduct_loss} = V_{D_Conduct_Avg} * I_{D_Avg}$$

12、谐振电容电流有效值、最大电压

$$I_{Cr_rms} = I_{rms} = \frac{V_0}{8nR_L} \sqrt{\frac{2n^4 R_L^2}{L_r^2 f_r^2} + 8\pi^2}$$

$$V_{Cr_Max} \cong \frac{V_{INMAX}}{2} + \sqrt{2} * I_{rms_Max} * \frac{1}{2\pi f_r C_r}$$

13、输出电容的电流有效值

$$I_{CO_Rms} = \sqrt{\left(\frac{\pi I_0}{2\sqrt{2}}\right)^2 - I_0^2} = \sqrt{\frac{\pi^2 - 8}{8}} * I_0$$

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_0 : 满足RMS电流的要求

15、 C_r 取值与功率P的关系

$$\text{由于 } Q = \frac{Z_0}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{\frac{8 * n^2 * R_L}{\pi^2 * \eta}} = \frac{0.95}{k * G_{MAX}} * \sqrt{k + \frac{G_{MAX}^2}{G_{MAX}^2 - 1}}, \text{ 其中 } k, G_{MAX} \text{ 为固定值,}$$

又由于 $C_r = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * Q}$ ，故在选取 C_r 时，主要由 R_{AC} 决定。

$$\text{因为 } R_{AC} = \frac{8n^2 R_L}{\pi^2}, \quad n = \frac{V_{IN,NOM} / 2}{V_0 + V_D}, \quad R_L = \frac{V_0}{I_0}$$

$$\text{所以 } R_{AC} = \frac{2V_0 V_{IN,NOM}^2}{\pi^2 I_0 (V_0 + V_D)^2}$$

考虑 V_D 较小，则有

$$R_{AC} = \frac{2V_0 V_{IN,NOM}^2}{\pi^2 I_0 (V_0 + V_D)^2} \cong \frac{2V_0 V_{IN,NOM}^2}{\pi^2 I_0 V_0^2} = \frac{2V_{IN,NOM}^2}{\pi^2 I_0 V_0} = \frac{2V_{IN,NOM}^2}{\pi^2 P_0}$$

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_0 和 I_0 。

列：

已知条件：

一、输入电压范围： $V_{IN_{MIN}} = 300V$, $V_{IN_{MAX}} = 400V$

额定输入电压： $V_{IN_{NOM}} = 380V$

输出电压电流（最大值）： $V_0 = 12V / I_0 = 18A$

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在 f_r

参数计算

1、理论变比

$$n = \frac{V_{IN_{NOM}} / 2}{V_0 + V_D} = \frac{V_{IN_{NOM}}}{2 * (V_0 + V_D)} = \frac{380}{2 * (12 + 0.7)} = 14.96063$$

2、最高、最低输入电压的增益

$$G_{MIN} = 2 * n * \frac{(V_0 + V_D)}{V_{IN_{MAX}}} = 2 * 14.96063 * \frac{(12 + 0.7)}{400} = 0.95$$

$$G_{MAX} = 2 * n * \frac{(V_0 + V_D)}{V_{IN_{MIN}}} = 2 * 14.96063 * \frac{(12 + 0.7)}{300} = 1.26667$$

3、计算负载电阻和反射电阻

$$R_L = \frac{V_0}{I_0} = \frac{12}{18} = 0.6667$$

$$R_{AC} = n^2 * \frac{8}{\pi^2} * R_L = \frac{8 * n^2 * R_L}{\pi^2} = \frac{8 * 14.96063^2 * 0.6667}{\pi^2} = 121.07074$$

4、取 k 值

$$k = \frac{L_p}{L_s} = 6$$

5、计算 Q , f_{MIN} , f_{MAX} , L_s , L_p , L_r

$$Q = \frac{Z_0}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{Z_{pri}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{\frac{8 * n^2 * R_L}{\pi^2 * \eta}} = \frac{0.95}{k * G_{MAX}} * \sqrt{k + \frac{G_{MAX}^2}{G_{MAX}^2 - 1}}$$

$$= \frac{0.95}{6 * 1.26667} * \sqrt{6 + \frac{1.2667^2}{1.2667^2 - 1}} = 0.3677283$$

$$f_{MIN} = \frac{f_r}{\sqrt{1 + k(1 - \frac{1}{G_{MAX}^2})}} = \frac{100}{\sqrt{1 + 6 * (1 - \frac{1}{1.26667^2})}} = 55.3814164 \quad KHz$$

$$f_{MAX} = \frac{f_r}{\sqrt{1 + k(1 - \frac{1}{G_{MIN}^2})}} = \frac{100}{\sqrt{1 + 6 * (1 - \frac{1}{0.95^2})}} = 120.894133 \quad KHz$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * Q} = \frac{10^6}{2\pi * 100 * 121.07074 * 0.3677283} = 35.7663 \quad nF$$

$$L_s = \frac{Q * R_{AC}}{2\pi f_r} = \frac{10^3 * 0.3677283 * 121.07074}{2\pi * 100} = 70.89353 \quad \mu H$$

$$L_p = k * L_r = 6 * 70.89353 = 425.361185 \quad \mu H$$

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。

令 $C_r = 44nF$ （即223//223），则其它参数推算如下：

$$Q = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * C_r} = \frac{10^6}{2\pi * 100 * 121.07074 * 44} = 0.298916$$

$$L_s = \frac{1}{4\pi^2 * C_r * f_r^2} = \frac{Q * R_{AC}}{2\pi * f_r} = \frac{10^3 * 0.298916 * 121.07074}{2\pi * 100} = 57.627 \quad \mu H$$

$$L_p = k * L_r = 6 * 57.627 = 345.726 \quad \mu H$$

$$\text{取 } L_s = 55 \quad \mu H$$

$$\text{取 } L_p = 350 \quad \mu H$$

$$\text{取 } k = \frac{L_p}{L_s} = \frac{350}{55} = 6.3637$$

6、核算 $I_m > I_p$

$$I_m = \frac{V_{IN_{MAX}}}{4f_{MAX} * (L_r + L_p)} = \frac{10^3 * 400}{4 * 120.894133 * (55 + 350)} = 2.04239 \quad A$$

$$I_p = (2C_{oss} + C_{stray}) \frac{V_{in}}{T_d} = 500 * 10^{-12} * \frac{400}{200 * 10^{-9}} = 1 \quad A$$

$$I_m > I_p$$

7、实际变比

$$n_{real} = n * \sqrt{\frac{L_r + L_p}{L_p}} = n * \sqrt{\frac{k+1}{k}} = 14.96063 * \sqrt{\frac{6.3637+1}{6.3637}} = 16.09322476$$

8、初级最小匝数

$$N_{P-MIN} = \frac{n_{real}(V_0 + V_D)}{2f_{MIN} * \Delta B * A_e} = \frac{10^3 * 16.09322476 * (12 + 0.7)}{2 * 55.3814164 * 0.4 * 170} = 27.135875 \quad T_s$$

(考虑实际, 选用PQ3230骨架磁芯)

$$\text{选择 } N_p = 32T_s, \quad N_s = 2T_s, \quad n = 16$$

9、初级电流有效值

$$I_{rms} = \frac{V_0}{8nR_L} \sqrt{\frac{2n^4 R_L^2}{L_m^2 f_r^2} + 8\pi^2} = \frac{12}{8 * 16 * 0.6667} * \sqrt{\frac{10^3 * 2 * 16^4 * 0.6667^2}{55^2 * 100^2} + 8\pi^2} = 1.264 \quad A$$

10、MOSFET电压, 电流最大值, 电流有效值

$$V_{MOS} = V_{IN_{MAX}} = 400V$$

$$I_{MAX_MOS} = I_{OCP} = 1.5168 \quad A \quad (\text{取 } I_{OCP} = 1.2 * I_{rms})$$

$$I_{rms_MOS} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2}} = 0.893918 \quad A$$

$$P_{Conduct_loss} = I_{rms_MOS}^2 R_{ds} = 0.799 * R_{ds} \quad W$$

11、次级整流管电压，电流，损耗

$$V_{D_MAX} = 2 * V_0 = 2 * 12 = 24 \quad V$$

$$I_{D_Avg} = \frac{I_0}{2} = \frac{18}{2} = 9 \quad A$$

$$P_{D_Conduct_loss} = V_{D_Conduct_Avg} * I_{D_Avg} = 0.7 * 9 = 6.3 \quad W$$

12、谐振电容电流有效值、最大电压

$$I_{Cr_rms} = I_{rms} = \frac{V_0}{8nR_L} \sqrt{\frac{2n^4 R_L^2}{L_r^2 f_r^2} + 8\pi^2} = \frac{12}{8 * 16 * 0.6667} * \sqrt{\frac{2 * 16^4 * 0.6667^2}{55^2 * 100^2} + 8\pi^2} = 1.264 A$$

$$V_{Cr_Max} \cong \frac{V_{IN_MAX}}{2} + \sqrt{2} * I_{rms_Max} * \frac{1}{2\pi f_r C_r} = \frac{400}{2} + \sqrt{2} * I_{OCP} * \frac{1}{2\pi * 100 * 44}$$

$$= \frac{400}{2} + \sqrt{2} * 1.5168 * \frac{1}{2\pi * 100 * 44} = 277.618529 \quad V$$

13、输出电容的电流有效值

$$I_{C0_Rms} = \sqrt{\left(\frac{\pi I_0}{2\sqrt{2}}\right)^2 - I_0^2} = \sqrt{\frac{\pi^2 - 8}{8}} * I_0 = 8.678352 \quad A$$