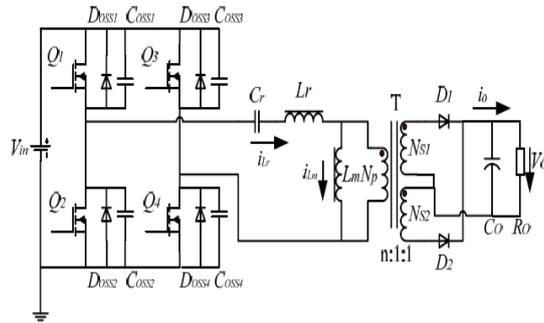


计算公式(全桥):



输入方波电压傅里叶级数展开:
$$U_N = \frac{4}{\pi} V_{in} \cdot \sum_{n=1,3,5\dots} \frac{1}{n} \sin(n2\pi fr1)$$

原边电压基波分量:
$$u_N = \frac{4}{\pi} V_{in} \cdot \sin(2\pi fr1)$$

原边电压基波分量有效值:
$$U_{N.FHA} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{in}$$

整流管电压傅里叶级数展开:
$$U_{o,rect}(t) = \frac{4}{\pi} V_o \cdot \sum_n \frac{1}{n} \sin(n2\pi fr1 - \varphi)$$

次级电压基波分量:
$$U_{O.FHA}(t) = \frac{4}{\pi} V_o \sin(n2\pi fr1 - \varphi)$$

次级电压基波分量有效值:
$$U_{O.FHA} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_o$$

反射回原边的电压基波分量有效值:
$$U_P = U_{O.FHA} \cdot n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_o \cdot n$$

整流管电流基波分量:
$$i_{rect}(t) = \sqrt{2} I_{rect} \sin(2\pi fr1 - \psi)$$

因此输出平均电流:
$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{V_o}{R_o} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} |i_{rect}(t)| \cdot dt = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{rect}$$

整流管电流基波分量有效值:
$$I_{rect} = \frac{I_o \cdot \pi}{2\sqrt{2}}$$

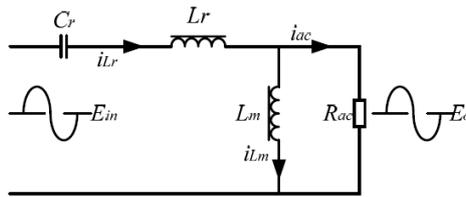
反射回原边的电流基波分量有效值:
$$I_{ro} = \frac{I_{rect}}{n} = \frac{I_o \cdot \pi}{2\sqrt{2} \cdot n}$$

因为 $U_{O.FHA}(t)$ $i_{rect}(t)$ 和同相, 所以滤波网络对谐振网络相当于一个等效

$$\text{电阻: } R_{o.ac} = \frac{U_{O.FHA}(t)}{i_{rect}(t)} = \frac{U_{O.FHA}}{I_{rect}} = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_o}{\frac{I_o \cdot \pi}{2\sqrt{2}}} = \frac{8 \cdot V_o}{\pi^2 \cdot I_o} = \frac{8}{\pi^2} \cdot R_o$$

$$\text{把这个等效电阻折算到变压器原边: } R_{ac} = n^2 \cdot R_{o.ac} = \frac{8 \cdot n^2}{\pi^2} \cdot R_o$$

交流等效电路:



$$\text{输入阻抗(复阻抗): } Z_{in} = j \cdot \omega \cdot L_r + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_r} + j \cdot \omega \cdot L_m // R_{ac}$$

$$\text{电压增益: } G = \frac{U_p}{U_{N.FHA}} = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_o \cdot n}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{in}} = \frac{V_o \cdot n}{V_{in}} = \frac{j \cdot \omega \cdot L_m // R_{ac}}{j \cdot \omega \cdot L_r + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_r} + j \cdot \omega \cdot L_m // R_{ac}}$$

$$\text{开关角频率: } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\text{特性阻抗: } \rho = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

$$\text{品质因数: } Q = \frac{\rho}{R_{ac}} = \frac{\sqrt{L_r}}{R_{ac}}$$

$$\text{本征谐振频率: } fr1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_r \cdot C_r}} \quad fr2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L_r + L_m) \cdot C_r}}$$

$$\text{规一化量: } k = \frac{L_m}{L_r} \quad fn = \frac{fs}{fr1}$$

从 Q 值曲线图上可以看出: 无论 Q 值多大, 所有的 Q 值曲线都会经过串联谐振频率 fr1 这一点, 也就是说在串联谐振频率时, 它们的增益都相同, 即增益 G=1。此时原边功率管能够实现 ZVS, 副边整流管也

可以实现 ZCS，整个电路的损耗最小，并且在整个负载范围内，具有最佳的全负载运行条件，在匝比的求取时， V_{in} 应取输入电压最高值，因为当变换器输入电压 V_{in} 变低时，按匝比公式确定的输出电压会降低，这时可以通过降低开关频率的方法提高变换器的增益，维持输出电压恒定，这样正好可以确保变换器在不同输入电压情况下都工作于区域 2，反之，若取输入电压较低值来确定匝比，那么当输入电压升高时，为维持输出电压恒定，必须减小增益，使开关频率增大，变换器会进入区域 1 工作，这时次级整流管就不能实现 ZCS，电路损耗增大，这种情况应该避免，所以为了使电路工作在我们所想要的 $fr_2 < f_s < fr_1$ 这个范围内，将最高输入电压的工作频率固定在串联谐振频率上，即将串联谐振频率点的增益定在最低增益比较合适，根据

增益公式我们可以得到：
$$G = \frac{V_o \cdot n}{V_{in_{max}}} = 1$$

1. 理想匝比：
$$n = \frac{V_{in_{max}}}{V_o}$$

2. 最大增益：
$$G_{max} = \frac{V_o \cdot n}{V_{in_{min}}}$$

3. 最小增益：
$$G_{min} = \frac{V_o \cdot n}{V_{in_{max}}}$$

4. 最大 Q 值：
$$Q_{max} = \frac{1}{k \cdot G_{max}} \cdot \sqrt{k + \frac{G_{max}^2}{G_{max}^2 - 1}}$$

5. 最小工作频率：
$$f_{s_{min}} = \frac{fr_1}{\sqrt{1 + k \cdot \left(1 - \frac{1}{G_{max}^2}\right)}}$$

6. 最大工作频率：
$$f_{s_{max}} = \frac{fr_1}{\sqrt{1 + k \cdot \left(1 - \frac{1}{G_{min}^2}\right)}}$$

7. 等效电阻: $R_{ac} = \frac{8 \cdot n^2}{\pi^2} \cdot R_o$

8. 谐振电容: $C_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Q \cdot R_{ac} \cdot f_{r1}}$

9. 谐振电感: $L_r = \frac{Q \cdot R_{ac}}{2 \cdot \pi \cdot f_{r1}}$

10. 励磁电感: $L_m = k \cdot L_r$

变压器初级匝数可以根据法拉第定律公式 ($N_p = \frac{V_{in} \cdot T_{on}}{Ae \cdot \Delta B}$) 求得, 对于全桥变换器, 因为是互补对称驱动, 所以其 ΔB 应取一, 三象限磁通密度的总增量(磁通密度的总变化量--峰峰值), 即 $\Delta B = 2B_m$, B_m 为工作磁通密度峰值(T), 一般取 0.2T 左右。并且导通时间就等于开关半周期 ($T_{on} = T_{min}/2$)。

11. 变压器初级匝数: $N_p = \frac{V_{in_{min}} \cdot T_{on}}{Ae \cdot \Delta B} = \frac{V_{in_{min}} \cdot T_{min} / 2}{2 \cdot Ae \cdot B_m} = \frac{V_{in_{min}}}{4 \cdot f_{s_{min}} \cdot Ae \cdot B_m}$

12. 次级匝数: $N_s = \frac{N_p}{n}$

13. 整流二极管电压应力: $V_{D_{max}} = 2 \cdot V_o$

14. 整流二极管平均电流: $I_{D_{avg}} = \frac{I_o}{2}$

因为是两个整流管轮流导通, 所以每个整流管承受一半的输出电流。

15. 整流二极管电流有效值: $I_{rect} = \frac{I_o \cdot \pi}{2\sqrt{2}}$

16. 反射回原边的电流有效值: $I_{ro} = \frac{I_{rect}}{n} = \frac{I_o \cdot \pi}{2\sqrt{2} \cdot n}$

17. 反射回原边的电流幅值: $I_{ro_{max}} = \sqrt{2} \cdot I_{ro} = \frac{I_o \cdot \pi}{2 \cdot n}$

18. 输出电压反射到变压器原边的电压加载在励磁电感上, 对励磁电感钳位, 其电压为: $V_{Lm} = \pm n \cdot (V_o + V_F)$ V_F 为整流管导通压降。

19. 励磁电流增量:
$$\Delta I_{Lm} = \frac{V_{Lm} \cdot T_{on}}{Lm} = \frac{n \cdot (V_o + V_F) \cdot T_{min} / 2}{Lm} = \frac{n \cdot (V_o + V_F)}{2 \cdot fs_{min} \cdot Lm}$$

20. 因为励磁电流是从正负最大值来回变化, 所以励磁电流幅值为:

$$I_{Lm.max} = \frac{\Delta I_{Lm}}{2} = \frac{n \cdot (V_o + V_F)}{4 \cdot fs_{min} \cdot Lm}$$

21. 初级电流幅值为次级反射电流与励磁电流的矢量和:

$$I_{rms.max} = \sqrt{I_{ro.max}^2 + I_{Lm.max}^2} = \sqrt{\left[\frac{I_o \cdot \pi}{2 \cdot n}\right]^2 + \left[\frac{n \cdot (V_o + V_F)}{4 \cdot fs_{min} \cdot Lm}\right]^2} = \frac{V_o}{8nRo} \sqrt{16\pi^2 + \frac{4 \cdot n^4 \cdot Ro^2}{L_m^2 \cdot fs_{min}^2}}$$

22. 初级电流有效值为:

$$I_{rms} = \frac{I_{rms.max}}{\sqrt{2}} = \frac{V_o}{\sqrt{2} \cdot 8 \cdot nRo} \sqrt{16\pi^2 + \frac{4 \cdot n^4 \cdot Ro^2}{L_m^2 \cdot fs_{min}^2}} = \frac{V_o}{8 \cdot nRo} \sqrt{8\pi^2 + \frac{2 \cdot n^4 \cdot Ro^2}{L_m^2 \cdot fs_{min}^2}}$$

23. 开关管的电压应力: $V_{mos} = Vin_{max}$

24. 开关管的最大电流: $I_{mos.max} = I_{rms.max}$

25. 谐振电容的电压应力: $V_{Cr} = \frac{1}{\omega \cdot Cr} \cdot I_{rms.max} = \frac{I_{rms.max}}{2 \cdot \pi \cdot fr1 \cdot Cr}$