



LLC在超薄电源设计中的应用

廖鸿飞 (Fly)

E-mail: alex.liao@hotmail.com



主要内容

1

超薄电源的设计

2

LLC的设计

3

LLC在超薄电源设计中的应用



超薄电源的发展

随着电子技术的飞速发展，笔记本电脑，电视机等日常使用的消费电子设备日益轻薄化。而作为电子设备核心配件的电源的体积和重量，成为了制约电子设备轻薄化发展的重要因素。因此超薄电源的设计引起了人们广泛的关注。

超薄电源的发展



普通适配器

普通液晶电视



90W超薄适配器



超薄液晶电视



超薄电源的制约因素

超薄电源

制约因素

电解电容尺寸

磁芯尺寸

热

超薄电源的设计

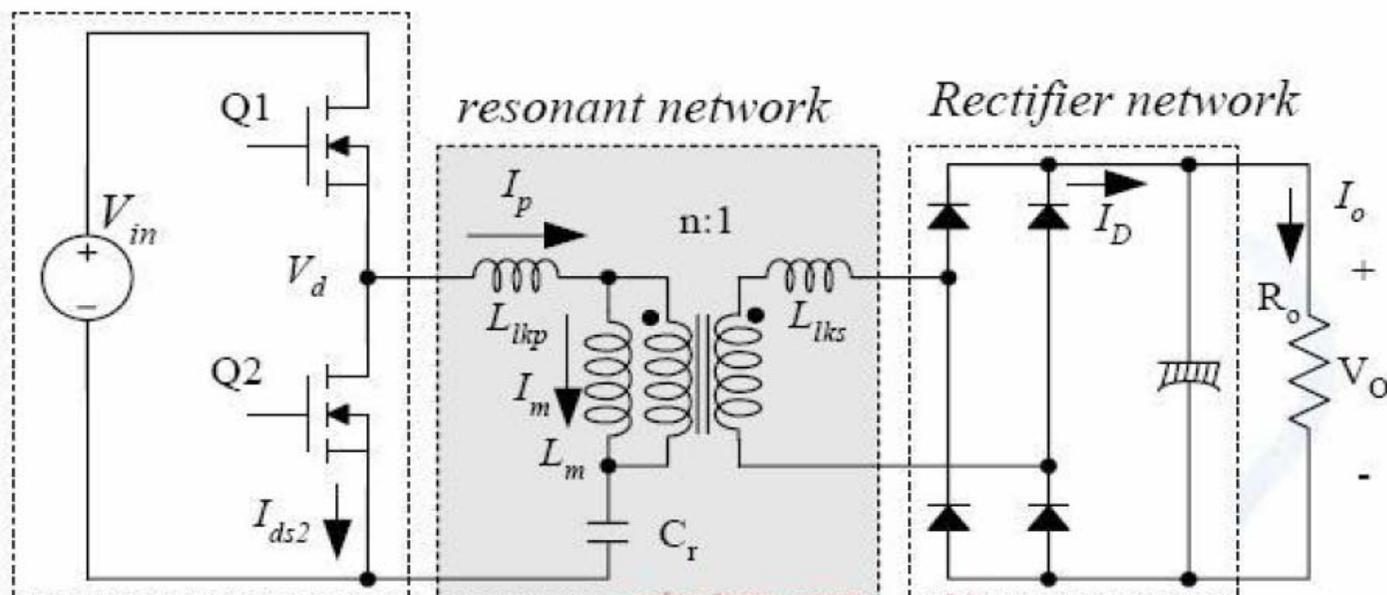
- 选用高品质，细长型电解电容。优化控制环路的响应，抑制输出纹波。
- 采用软开关拓扑，提高开关频率，采用扁平磁芯设计变压器和电感。
- 采用软开关拓扑，提高电源的效率。合理布局，采取适当的散热措施
- 采用软开关拓扑，减小EMI滤波器的体积以及减小EMI滤波器的损耗。

LLC拓扑由于其半导体器件全部工作于软开关状态，因此具有高效率，低EMI的优点，是超薄电源设计的首选拓扑。

LLC的设计

LLC的架构

Square wave generator

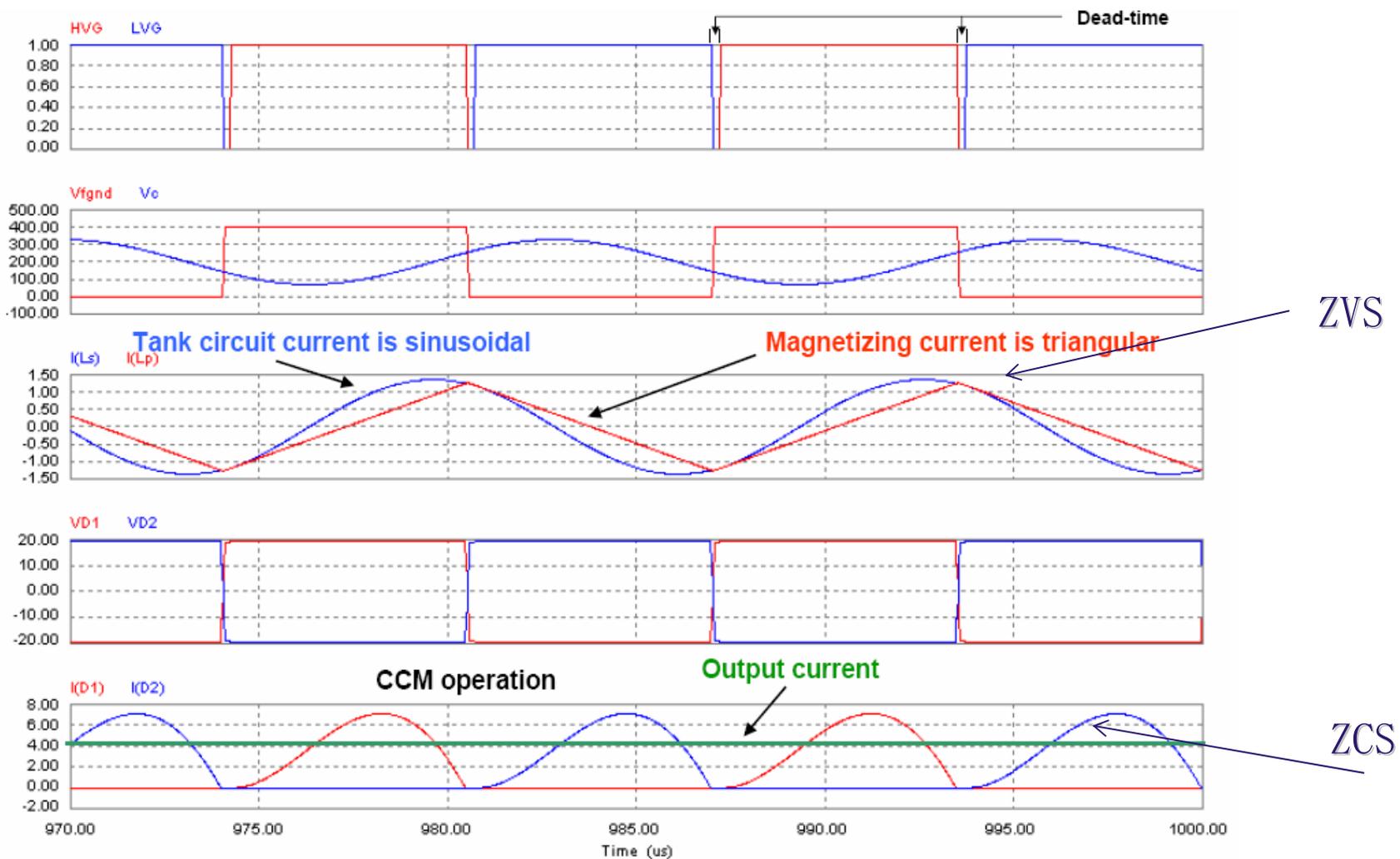


LLC的两个谐振频率:

$$f_{R1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad f_{R2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m) C_r}}$$

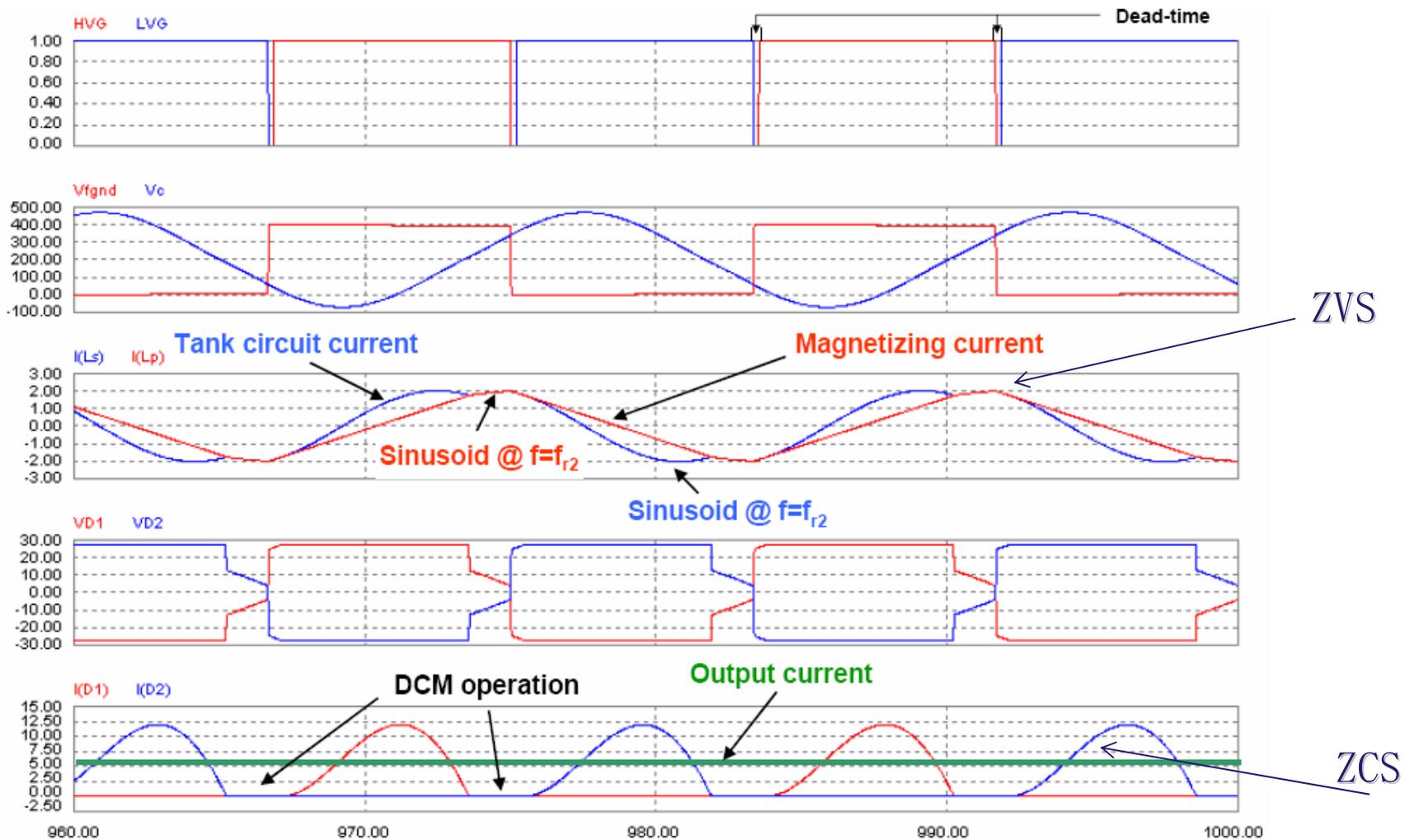
LLC的波形

$f_s = f_r$ 时的波形



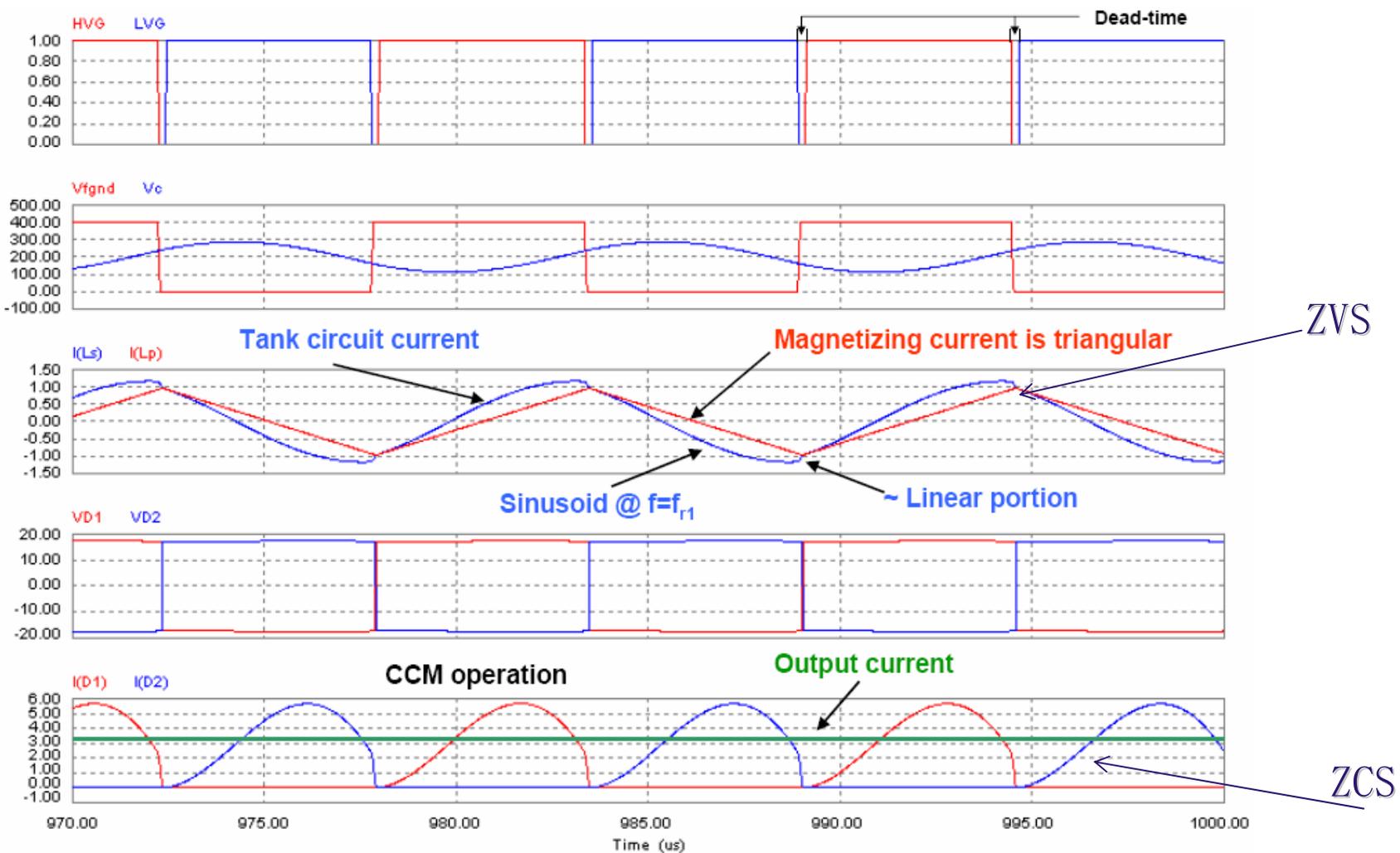
LLC的波形

$f_s < f_r$ 时的波形

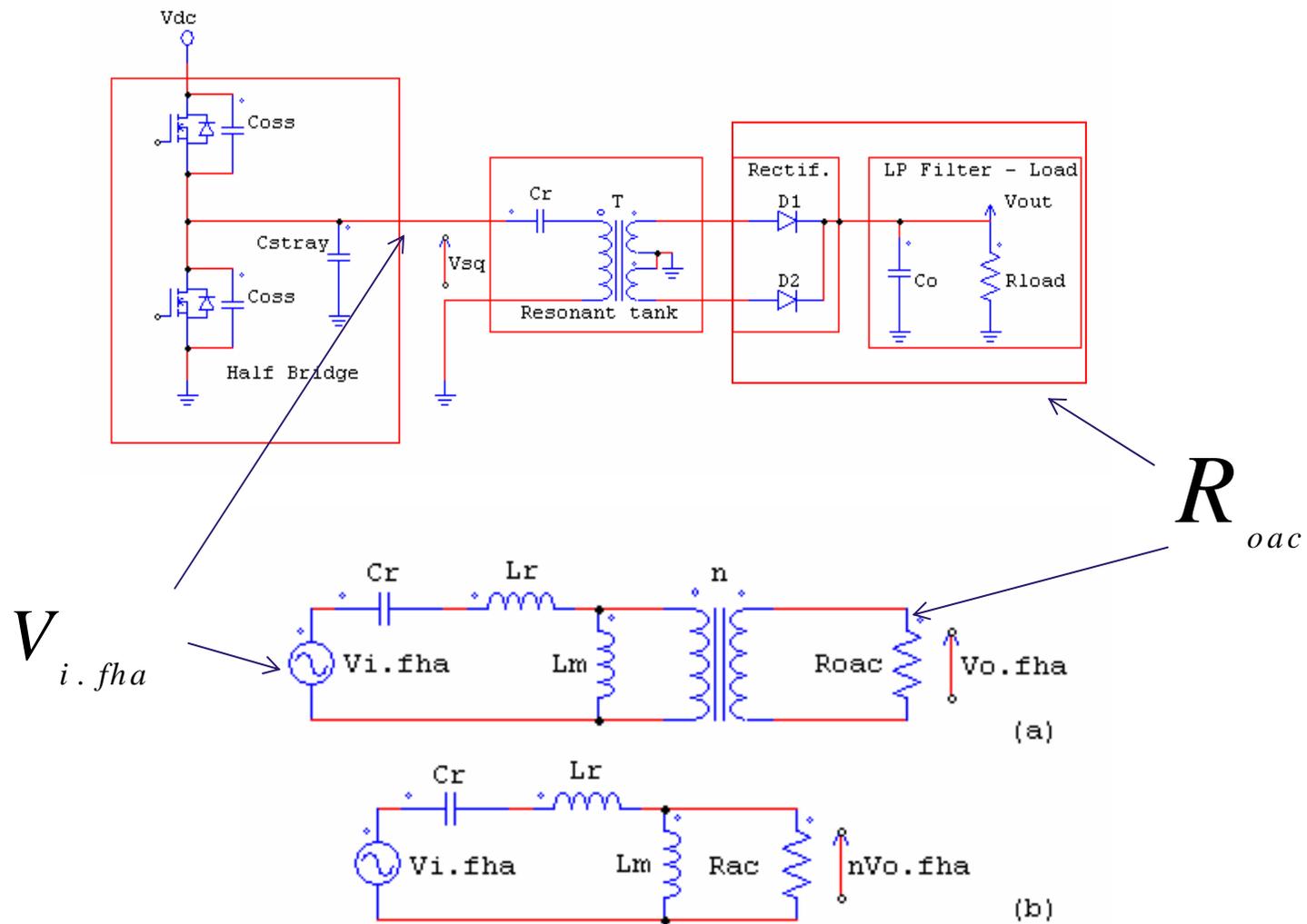


LLC的波形

$f_s > f_r$ 时的波形

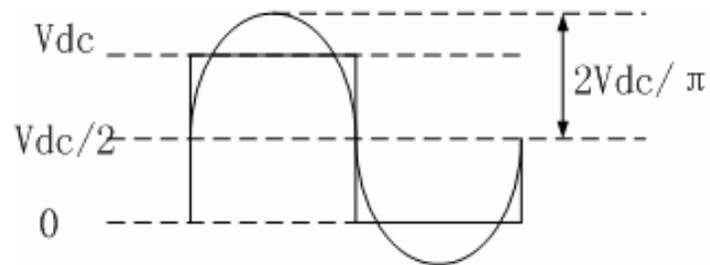


LLC的等效分析



LLC的输入等效

谐振槽路的输入为方波，



通过对其进行傅里叶分解得到其基波分量:

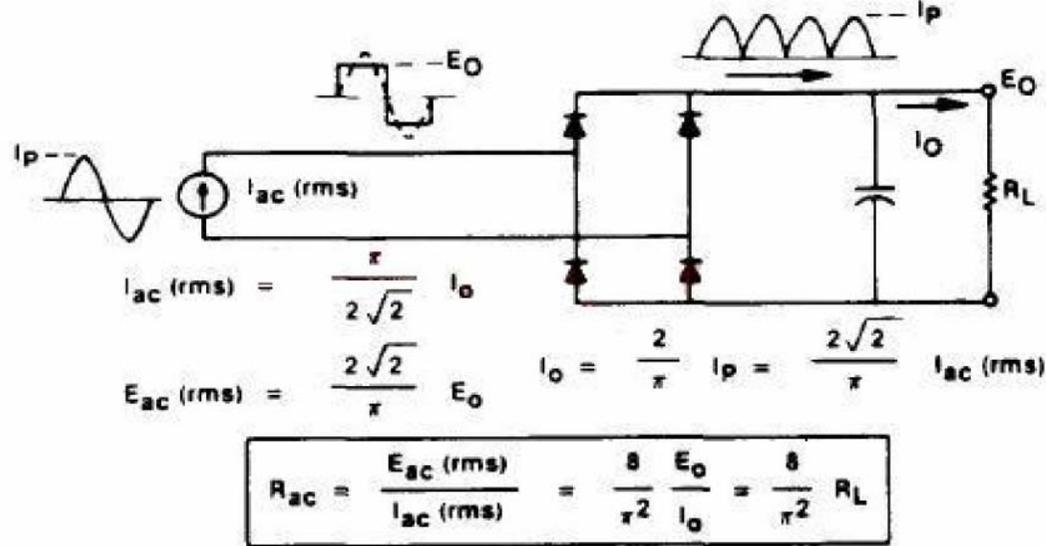
$$V_{iFHA}(t) = \frac{2}{\pi} V_{dc} \sin(2\pi f_s t)$$

有效值为:

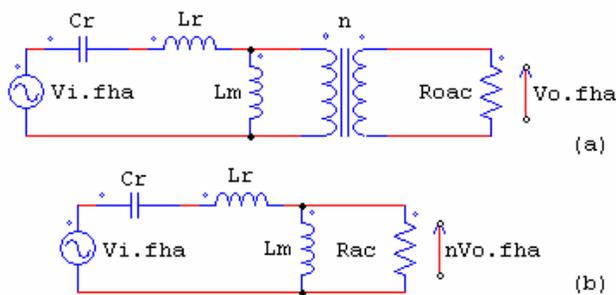
$$V_{iFHA} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc}$$

LLC的输出等效

由于变压器的副边电流为正弦波，因此其等效负载为：



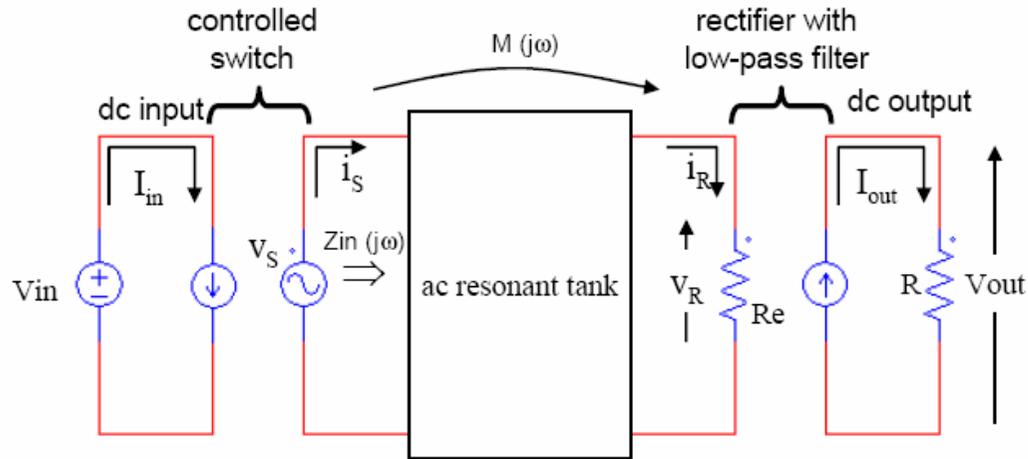
此分析同样适用于全波整流：



$$R_{oac} = \frac{8}{\pi^2} R_{out}$$

$$R_{ac} = n^2 R_{oac} = \frac{n^2 8}{\pi^2} R_{out}$$

LLC的等效模型



谐振槽路的增益为：

$$M(f_n, k, Q) = \frac{nV_{OFHA}}{V_{IFHA}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{kf_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}}$$

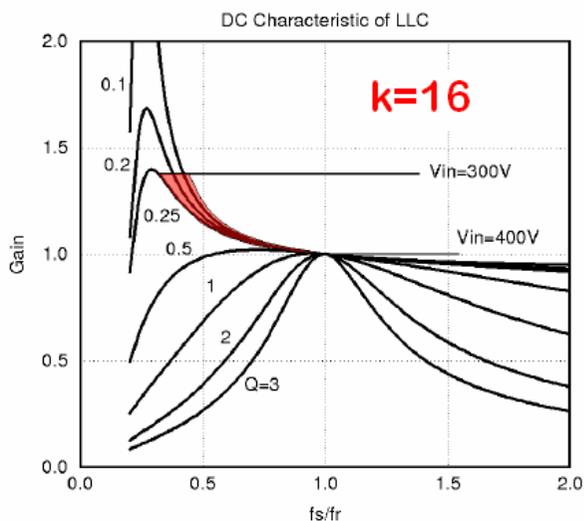
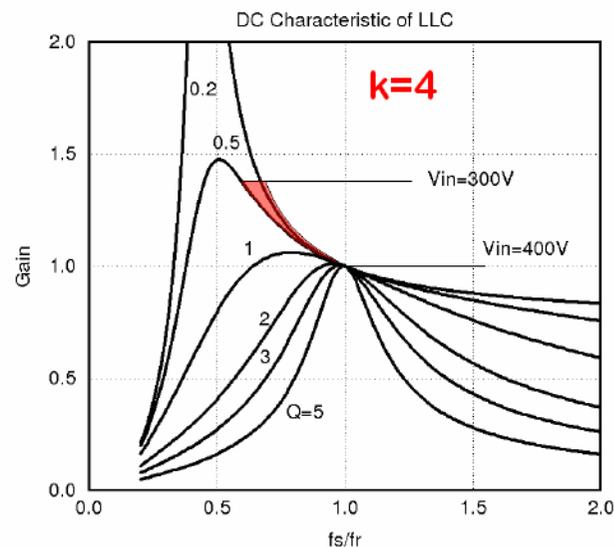
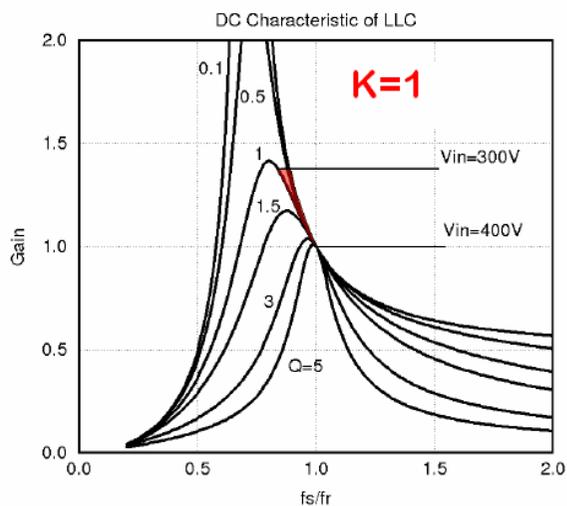
其中：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} = \frac{2\pi f_r L_r}{R_{ac}}$$

$$k = \frac{L_m}{L_r} \quad f_n = \frac{f_s}{f_r}$$

K的取值

K值对LLC的增益曲线的影响:

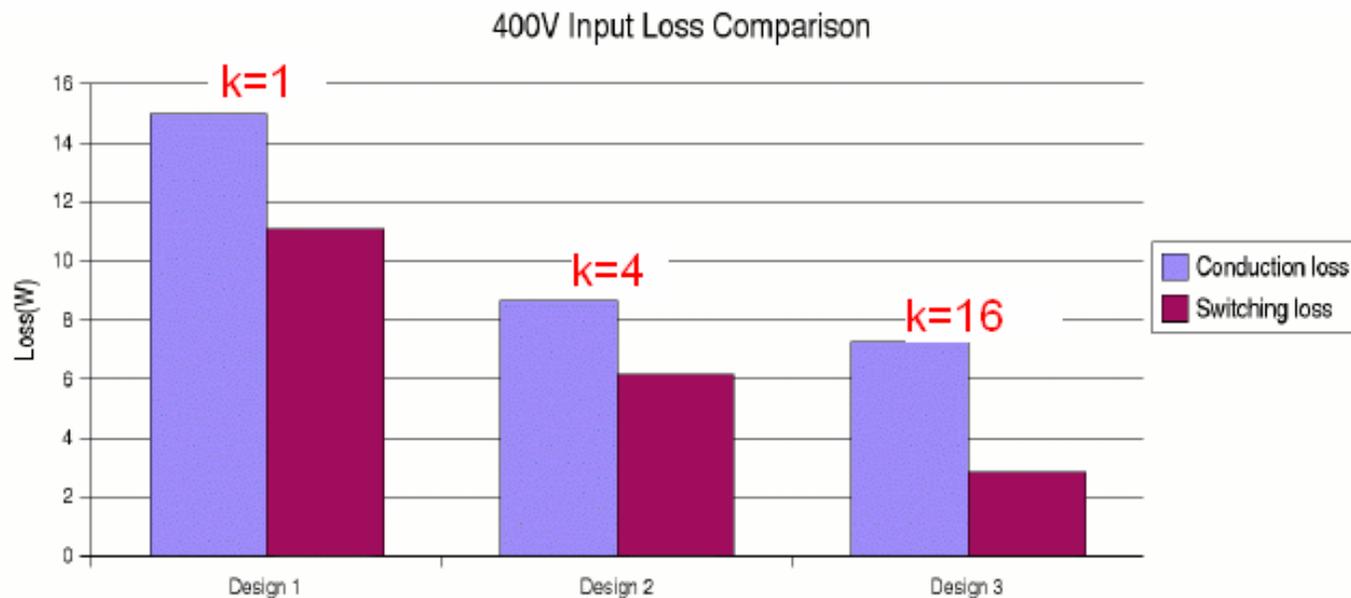


K值越小，Q值曲线越陡峭，要得到相同增益时，频率变化范围越小。

K值越大，Q值曲线越平缓，要得到相同增益时，频率变化范围越大。

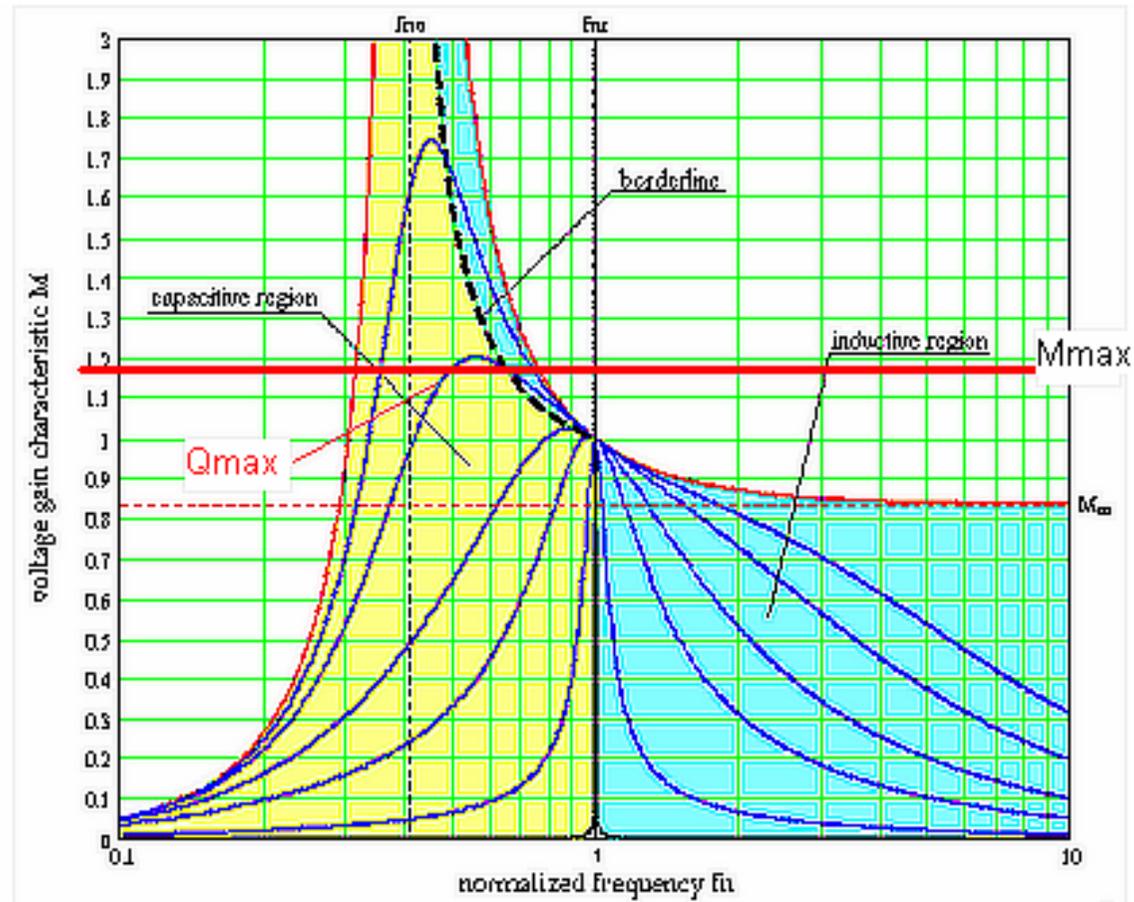
K的取值

K值对效率的影响:



K值越小，意味着对于相同的 L_r ，其励磁电感越小，器件损耗会增大，效率降低。通常取K值在3~7之间。

Q的取值



对于同一个增益，不同负载下Q值是变化的，但Q值有一个最大值 Q_{max} ，如果 $Q > Q_{max}$ ，LLC将进入ZCS区域。

Q的取值

由：

$$Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} = \frac{2\pi f_r L_r}{R_{ac}} \quad k = \frac{L_m}{L_r}$$

可以得到：

$$Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} = \frac{2\pi f_r L_m}{kR_{ac}}$$

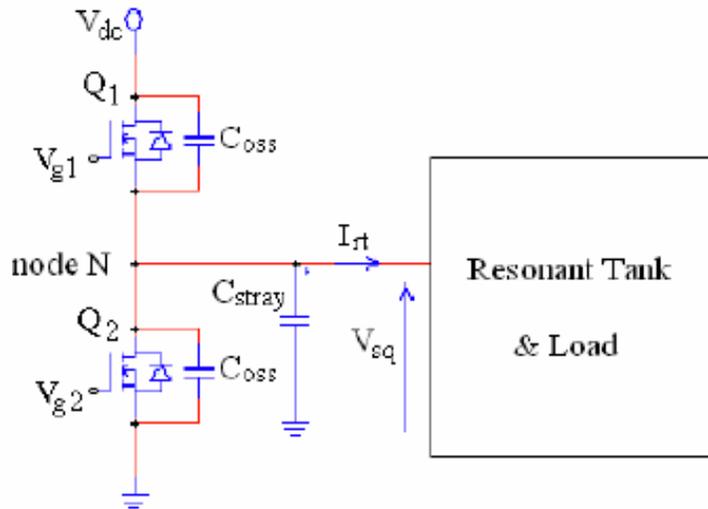
因此Q值越大，励磁电感越大，励磁电流越小，损耗越小。因此在满足软开关的条件下，Q值应尽量取大。

由LLC ZVS软开关的边界条件，即LLC谐振网络的阻抗为纯阻性，可以求出Qmax

$$Q_{\max} = \frac{1}{kM_{\max}} \sqrt{k + \frac{M_{\max}^2}{M_{\max}^2 - 1}}$$

为留一定的裕量，通常取Q为（0.92~0.95）Qmax

Q的取值



当LLC运行于高输入电压，空载的情况下时，原边电流最小，需要确保在此情况下，LLC仍能实现软开关。

$$\frac{V_{iFHAMAX}}{\|Z_{inol}(f_{n\max})\|} \geq \frac{I_{zvs(vdc\max)}}{\sqrt{2}} \Rightarrow Q_{zvs} \leq \frac{2}{\pi} \frac{f_{n\max}}{(k+1)f_{n\max}^2 - 1} \frac{T_D}{R_{ac} C_{zvs}}$$

$$I_{zvs(vdc\max)} = (2C_{oss} + C_{stay}) \frac{V_{dc}}{T_D}$$

LLC的Q值应该小于Qmax和Qzvs

LLC的设计步骤

1. 计算理论匝比:

$$n := \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{dc.nom}}{V_o}$$

2. 计算最大, 最小增益:

$$M_{max} := 2 \cdot n \cdot \frac{V_o}{V_{dc.min}} \quad M_{min} := 2 \cdot n \cdot \frac{V_o}{V_{dc.max}}$$

3. 负载折算:

$$R_{ac} := \frac{8}{\pi^2} \cdot n^2 \cdot \frac{V_o^2}{P_{max}}$$

4. 计算最大归一化频率:

$$f_{n.max} := \frac{f_{sw.max}}{f_r}$$

LLC的设计步骤

5.计算K值:

$$k := \frac{M_{\min}}{1 - M_{\min}} \cdot \frac{f_{n.\max}^2 - 1}{f_{n.\max}^2}$$

6.计算最小输入电压，最大负载时保证ZVS的Q的最大

值 $Q_{zvs.1} := 0.95 \frac{1}{k \cdot M_{\max}} \cdot \sqrt{k + \frac{M_{\max}^2}{M_{\max}^2 - 1}}$

7.计算最大输入电压，空载时保证ZVS的Q的最大值:

$$Q_{zvs.2} := \frac{2}{\pi} \cdot \frac{f_{n.\max}}{(k + 1) \cdot f_{n.\max}^2 - 1} \cdot \frac{T_D}{R_{ac} \cdot C_{zvs}}$$

8.选择以上Q值中的最小值为最终的Q值:

$$Q_{ZVS} := \min(Q_{ZVS.1}, Q_{ZVS.2})$$

LLC的设计步骤

9.计算最小开关频率:

$$f_{\text{sw.Min}} := f_r \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + k \cdot \left(1 - \frac{1}{M_{\text{max}}^{1+k_{\text{marg}}^4}}\right)}}$$

如果计算的最小开关频率太低或者太高，需要调整设定的谐振频率，直到最小开关频率为一个合理的值。

10.计算谐振网络参数:

$$Z_o := Q_{\text{zvs}} \cdot R_{\text{ac}} \quad C_r := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot Z_o} \quad L_r := \frac{Z_r}{2\pi f_r} \quad L_m := \frac{L_r}{\lambda}$$

11.计算变压器的匝数:

$$N_p := \frac{\int_0^{0.5T_{\text{smin}}} V_{\text{fund}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{\text{smin}} \cdot t) dt}{\Delta B_m \cdot A_c}$$

LLC的设计步骤

12. 副边电流:

副边峰值电流:

$$I_{s_peak} := I_{o_max} \cdot \sqrt{2}$$

副边有效值电

$$I_{s_rms} := \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_{s_peak} \cdot \sin(\omega t))^2 d(\omega t)}$$

流:
副边平均值电

$$I_{s_avg} := \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} I_{s_peak} \cdot \sin(\omega t) d(\omega t)$$

13. 原边电流:

原边峰值电流:

$$I_{p_peak} := I_{s_peak} \cdot \frac{N_s}{N_{p1}}$$

原边有效值电

$$I_{p_rms} := \frac{1}{4\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{o_max}}{n} \cdot \sqrt{\frac{n^4 \cdot V_o^2}{I_{o_max}^2 L_m^2 f_{smin}^2} + 4\pi^2}$$

流:

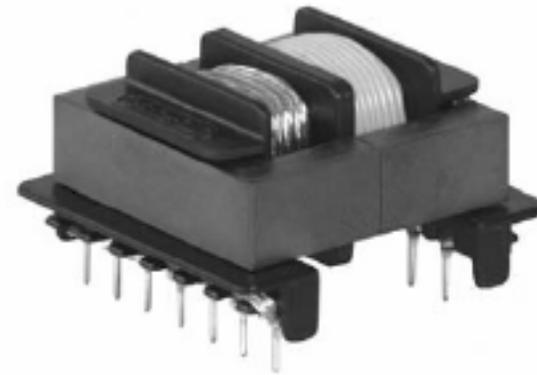
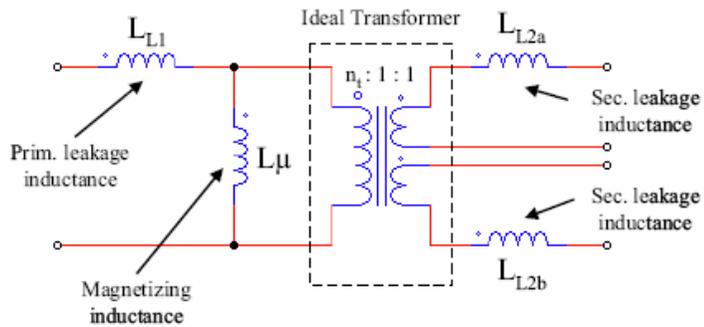
原边励磁电流:

$$I_{lmmax} := \frac{n \cdot V_o}{4L_m f_{smin}}$$

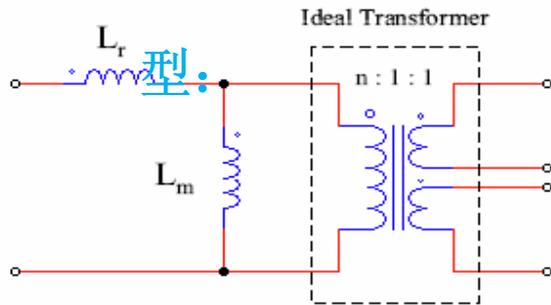
集成式LLC变压器

LLC变压器可以利用自身的漏感和激磁电感构成谐振网络的两个电感，通常为了获取足够大的谐振电感，需要将原边和副边分开绕制，因此要考虑副边漏感的影响。

实际变压器模



理想变压器模



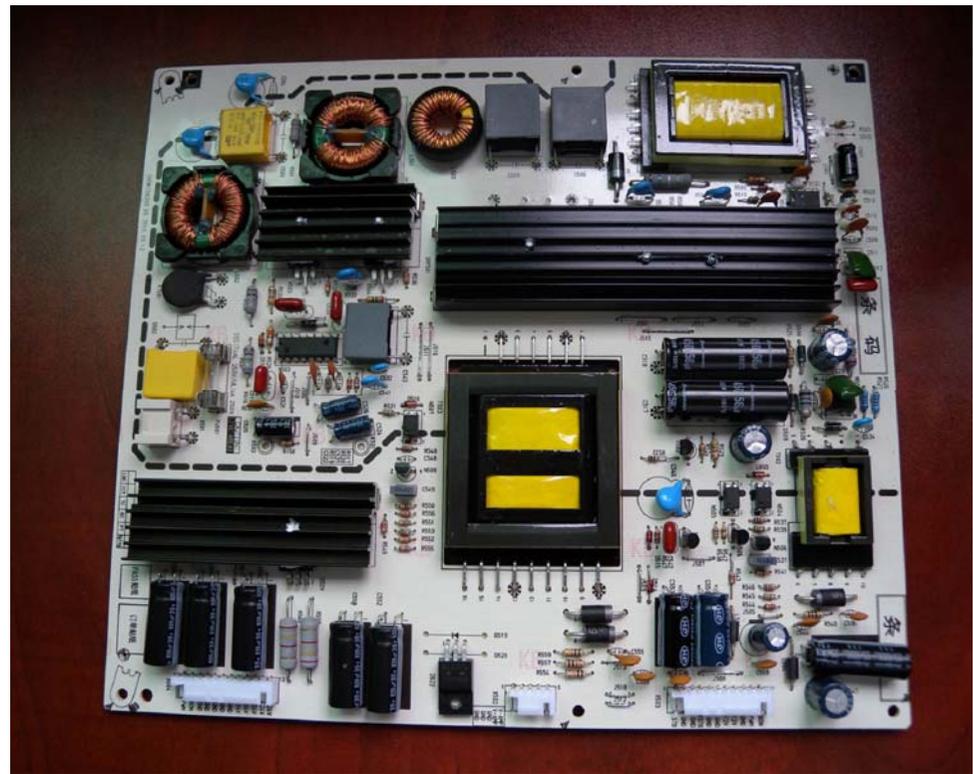
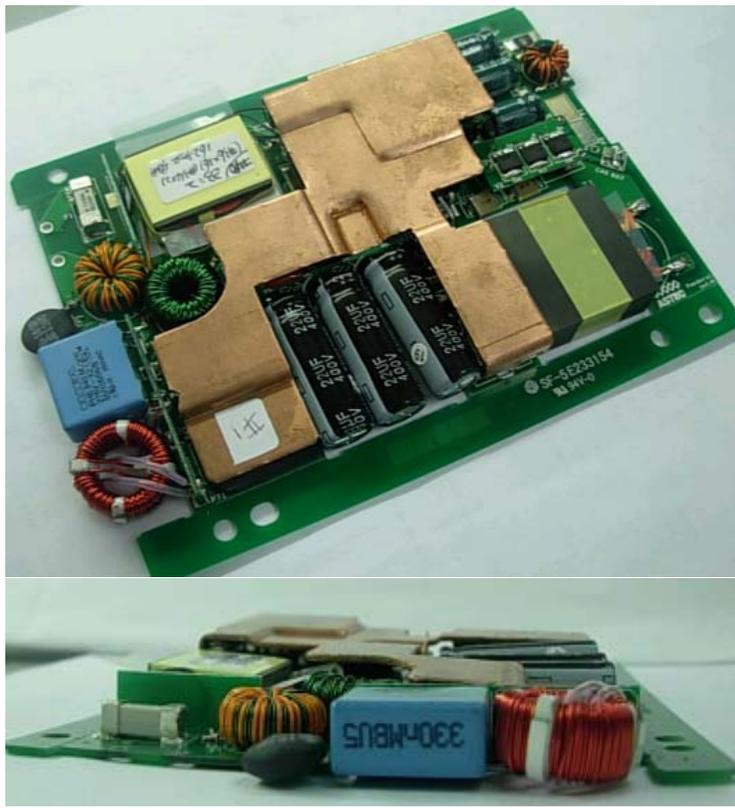
变压器的实际变

比:

$$n_t = n \sqrt{\frac{L_m + L_r}{L_r}} = n \sqrt{\frac{1}{k} + 1}$$

LLC在超薄电源设计中的应用

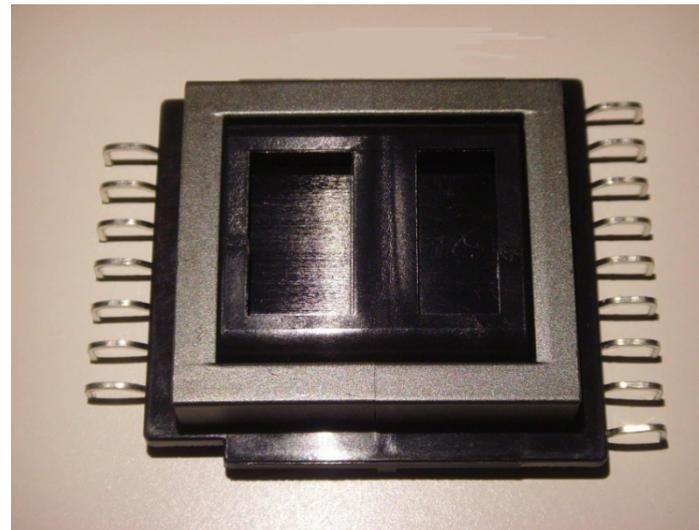
- LLC拓扑由于其半导体器件全部工作于软开关状态，因此具有高效率，低EMI的优点，是超薄电源设计的首选拓扑，已经被广泛应用于超薄电视机电源和超薄适配器的设计中。



LLC在超薄电源设计中的应用

1.超薄LLC变压器的设计:

对于体积有限制的超薄电源，通常将谐振电感外置。使用用扁平磁芯和扁平线圈进行绕制。对于如超薄电视机等对宽度没有严格限制的超薄电源，可以使用扁平的卧式集成变压器。



LLC在超薄电源设计中的应用

2.LLC的空载损耗:

由于超薄电源中LLC的工作频率很高，因此其激磁电感值较小，造成在空载时的损耗较大。这给LLC在超薄型适配器中的应用提出了挑战。

	Europe EuP Ecodesign Directive 	Energy Star 
外部电源 External Power Supplies	<ul style="list-style-type: none">• Directive 2005/32/EC REGULATION (EC) No 278/2009	<ul style="list-style-type: none">• EPS version 2.0
	<ul style="list-style-type: none">• Phase 1, effective Apr. 2010• Phase 2, effective Apr. 2011	<ul style="list-style-type: none">• Effective Nov. 1, 2008
	<ul style="list-style-type: none">• Phase 1:<ul style="list-style-type: none">• Efficiency: $\geq 85\%$ @ $P_{out} > 51\text{ W}$• No load power: $\leq 500\text{ mW}$• Phase 2:<ul style="list-style-type: none">• Efficiency: $\geq 87\%$ @ $P_{out} > 51\text{ W}$• No load power: $\leq 500\text{ mW}$	<ul style="list-style-type: none">• $P_{out} > 49\text{ W}$<ul style="list-style-type: none">• Efficiency: $\geq 87\%$• No load power: $\leq 500\text{ mW}$• $PF \geq 0.9$ @ $V_{in} = 115\text{ Vac}$ & $P_{in} \geq 100\text{ W}$



Thank You !