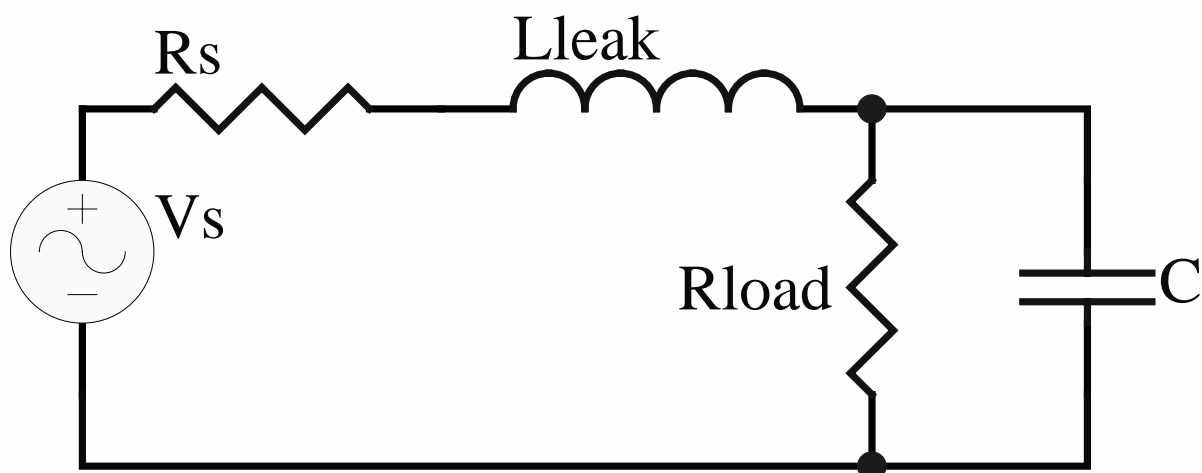


CCFL INVERTER 谐振变压器设计分析-1

1. 等效电路：



V_s : 输出电压 V

R_s : 输出内阻 R_s

L_{leak} : 漏感 L

R_{load} : 负载 R

C : 杂散分布电容 C

R_{load} 实际上是个非线性器件，这儿考虑稳态工作给理想化了

$$\begin{aligned}
 2. \quad Z &:= R_s + \frac{R}{\omega^2 C^2 \left(R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2} \right)} + I \left(\omega L - \frac{R^2}{\omega C \left(R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2} \right)} \right) \\
 &= \frac{\sqrt{L(-L + R^2 C)}}{L C R} \\
 Q &:= \frac{-I R}{\omega C \left(R - \frac{I}{\omega C} \right) \left(I \omega L + R_s - \frac{I R}{\omega C \left(R - \frac{I}{\omega C} \right)} \right)} \quad (\text{复数取模})
 \end{aligned}$$

3. 空载： 设 $R=1M$, $R_s=600$:

表 3-1：一些漏感 L 与电容 C 对应的空载频率

| 漏感 L (H) | 电容 C (pF) | 谐振频率 f (Hz) | Q (@ f) |
|------------|-------------|---------------|--------------|
| 0.2 | 5 | 156018 | 4.93 |
| 0.2 | 10 | 111465 | 6.87 |
| 0.2 | 15 | 91320 | 8.29 |
| 0.3 | 5 | 126055 | 4.04 |
| 0.3 | 10 | 90545 | 5.66 |
| 0.3 | 15 | 74310 | 6.87 |
| 0.4 | 5 | 107999 | 3.51 |
| 0.4 | 10 | 78009 | 4.93 |
| 0.4 | 15 | 64135 | 5.99 |

4. 工作状态：

$V_{in}=12V$, $R=100K$, $f=50KHz$, $V_{out}=650V_{rms}$, $I_{out}=6.5mA$,
考虑以下参数组合，表 4-1：

| 漏感 L (H) | 电容 C (pF) | Q (@f) | 匝数比 n | 占空比 D | 高压 I_c (mA) | I_{sec} (mA) | I_{pri} (A) | I_{pk} (A) |
|-------------|--------------|-----------|----------|----------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 0.2 | 5 | 0.906 | 70 | 0.365 | 1.02 | 6.58 | 0.461 | 0.539 |
| 0.2 | 10 | 0.975 | 70 | 0.315 | 2.04 | 6.81 | 0.477 | 0.601 |
| 0.2 | 15 | 1.053 | 70 | 0.270 | 3.06 | 7.18 | 0.503 | 0.684 |
| 0.2 | 5 | 0.906 | 100 | 0.179 | 1.02 | 6.58 | 0.658 | 1.100 |
| 0.2 | 10 | 0.975 | 100 | 0.154 | 2.04 | 6.81 | 0.681 | 1.227 |
| 0.2 | 15 | 1.053 | 100 | 0.132 | 3.06 | 7.18 | 0.718 | 1.396 |
| 0.3 | 5 | 0.784 | 70 | 0.487 | 1.02 | 6.58 | 0.461 | 0.467 |
| 0.3 | 10 | 0.847 | 70 | 0.418 | 2.04 | 6.81 | 0.477 | 0.522 |
| 0.3 | 15 | 0.910 | 70 | 0.362 | 3.06 | 7.18 | 0.503 | 0.591 |
| 0.3 | 5 | 0.784 | 100 | 0.238 | 1.02 | 6.58 | 0.658 | 0.953 |
| 0.3 | 10 | 0.847 | 100 | 0.205 | 2.04 | 6.81 | 0.681 | 1.065 |
| 0.3 | 15 | 0.910 | 100 | 0.177 | 3.06 | 7.18 | 0.718 | 1.206 |
| 0.4 | 5 | 0.669 | 70 | 0.669 | 1.02 | 6.58 | 0.461 | 0.398 |
| 0.4 | 10 | 0.715 | 70 | 0.586 | 2.04 | 6.81 | 0.477 | 0.441 |
| 0.4 | 15 | 0.755 | 70 | 0.526 | 3.06 | 7.18 | 0.503 | 0.490 |
| 0.4 | 5 | 0.669 | 100 | 0.328 | 1.02 | 6.58 | 0.658 | 0.813 |
| 0.4 | 10 | 0.715 | 100 | 0.287 | 2.04 | 6.81 | 0.681 | 0.899 |
| 0.4 | 15 | 0.755 | 100 | 0.258 | 3.06 | 7.18 | 0.718 | 1.000 |

$V_{in}*(2D)^{0.5}*n*Q=V_{out}$, $I_{sec}=(I_{out}^2+I_c^2)^{0.5}$, $I_{pri}=nI_{sec}$, $I_{pk}=I_{pri}/(2D)^{0.5}$ 。

因为占空比最大只能到 0.5，所以 $L=0.4H$ ， $n=70$ 时无法正常工作，因此较大漏感的变压器都需要较大的匝数比。

考虑 10.8V 输入时占空比最大 0.5，因此 12V 时占空比不能超过 0.413，考虑负载变化引起的功率变化留 5% 的余量，12V 时就不能超过 0.367。

5. 谐波影响：

考虑常用的铁芯频响使用范围上限约为 1MHz，对于 50KHz 的工作频率取到 19 次谐波，信号函数 $V_{pri}=(4V_{in}/n)*\sin(i*D*\omega t)/i*(-1)^{i+1}*\sin(\omega t)$ ， $i=1, 3, 5...19$ 。

设 $Th_{di}=(V_i^2/V_1^2)^{0.5}$ ， $i=1, 3, 5...19$ ， $THD=(\sum_{i=3,5,7...19} V_i^2/V_1^2)^{0.5}$ 。

考虑到这是一个线性系统（所有元件理想化），根据电源的叠加定理，将各次谐波单独计算然后相加可以得到总的有效值：

$V=(\sum_{i=1,3,5,7...19} V_i^2)^{0.5}$ ， $I=(\sum_{i=1,3,5,7...19} I_i^2)^{0.5}$ ， $i=1, 3, 5, 7...19$ 。

由于 Q 与频率有关，因此各高次谐波有不同的 Q 值对应。

$(4V_{in}/(1.414*n)*\sin(i*D*\omega t)/i*n*Q_i)^2=V_{o_i}^2=V_{out}^2$ $i=1, 3, 5...19$ 。

占空比 D 可由上式计算出来，可以看到由于受高次谐波的影响，此时计算出的占空比 D 要比表 4-1 中的值大一些。

令 $Q=(Q_i^2*Th_{di}^2)^{0.5}$ ， $i=1, 3, 5...19$ 。则 $D=0.5*(V_{out}/V_{in}/n/Q)^2$ ，因为 Th_{di} 只计算到 19 次，省略了更高次谐波，因此计算出的 Q 比实际的略高，D 就略小，当只取基波分量时就得到了表 4-1 的值。

根据表 4-1 的一些参数组合进行计算分析：

表 5-1 : L=0.2H , C=5pF , n=70 , D=0.392 :

| 谐波次数 | Vin_i (Vrms) | Qi | Thdi (%) | ZCi () | Vo_i (Vrms) | IRi(mA) | ICi(mA) |
|------|--------------|------------------------|----------|---------|-------------|---------|---------|
| 1 | 10.189 | 0.9057 | 96.47 | 636943 | 646.03 | 6.460 | 1.014 |
| 3 | -1.892 | 0.5289 | 17.91 | 212314 | -70.04 | -0.700 | -0.330 |
| 5 | -0.271 | 0.2885 | 2.56 | 127389 | -5.47 | -0.055 | -0.043 |
| 7 | 1.112 | 0.1715 | 10.53 | 90992 | 13.35 | 0.133 | 0.147 |
| 9 | -1.196 | 0.1113 | 11.32 | 70771 | -9.32 | -0.093 | -0.132 |
| 11 | 0.816 | 0.0773 | 7.72 | 57904 | 4.42 | 0.044 | 0.076 |
| 13 | -0.247 | 0.0566 | 2.34 | 48996 | -0.98 | -0.010 | -0.020 |
| 15 | -0.265 | 0.0431 | 2.51 | 42463 | -0.80 | -0.008 | -0.019 |
| 17 | 0.553 | 0.0339 | 5.24 | 37467 | 1.31 | 0.013 | 0.035 |
| 19 | -0.561 | 0.0273 | 5.31 | 33523 | -1.07 | -0.011 | -0.032 |
| | 10.562 | $\underline{Q}=0.8792$ | 100 | / | 650.06 | 6.50 | 1.09 |
| THD | 27.3% | $\underline{D}=0.3873$ | 27.3% | / | 11.2% | 11.2% | / |

表 5-2 : L=0.2H , C=15pF , n=70 , D=0.3034 :

| 谐波次数 | Vin_i (Vrms) | Qi | Thdi (%) | ZCi () | Vo_i (Vrms) | IRi(mA) | ICi(mA) |
|------|--------------|------------------------|----------|---------|-------------|---------|---------|
| 1 | 8.809 | 1.0527 | 95.04 | 212314 | 649.15 | 6.491 | 3.057 |
| 3 | 1.003 | 0.3976 | 10.82 | 70771 | 27.91 | 0.279 | 0.394 |
| 5 | -2.158 | 0.1404 | 23.28 | 42463 | -21.20 | -0.212 | -0.499 |
| 7 | 0.585 | 0.0705 | 6.32 | 30331 | 2.89 | 0.029 | 0.095 |
| 9 | 0.899 | 0.0423 | 9.70 | 23590 | 2.66 | 0.027 | 0.113 |
| 11 | -0.857 | 0.0282 | 9.24 | 19301 | -1.69 | -0.017 | -0.088 |
| 13 | -0.145 | 0.0201 | 1.56 | 16332 | -0.20 | -0.002 | -0.013 |
| 15 | 0.711 | 0.0151 | 7.67 | 14154 | 0.75 | 0.008 | 0.053 |
| 17 | -0.302 | 0.01171 | 3.26 | 12489 | -0.25 | -0.002 | -0.020 |
| 19 | -0.383 | 0.0094 | 4.14 | 11174 | -0.25 | -0.003 | -0.023 |
| | 9.269 | $\underline{Q}=0.9934$ | 100 | / | 650.11 | 6.50 | 3.13 |
| THD | 32.7% | $\underline{D}=0.2982$ | 32.7% | / | 5.4% | 5.4% | / |

表 5-3 : L=0.3H , C=15pF , n=70 , D=0.3927 :

| 谐波次数 | Vin_i (Vrms) | Qi | Thdi (%) | ZCi () | Vo_i (Vrms) | IRi(mA) | ICi(mA) |
|------|--------------|------------------------|----------|---------|-------------|---------|---------|
| 1 | 10.197 | 0.9095 | 96.46 | 212314 | 649.22 | 6.492 | 3.058 |
| 3 | -1.912 | 0.2428 | 18.08 | 70771 | -32.50 | -0.325 | -0.459 |
| 5 | -0.247 | 0.0898 | 2.34 | 42463 | -1.55 | -0.016 | -0.037 |
| 7 | 1.095 | 0.0459 | 10.36 | 30331 | 3.52 | 0.035 | 0.116 |
| 9 | -1.194 | 0.0278 | 11.29 | 23590 | -2.32 | -0.023 | -0.099 |
| 11 | 0.829 | 0.0186 | 7.84 | 19301 | 1.08 | 0.011 | 0.056 |
| 13 | -0.269 | 0.0133 | 2.55 | 16332 | -0.25 | -0.003 | -0.015 |
| 15 | -0.243 | 0.01 | 2.30 | 14154 | -0.17 | -0.002 | -0.012 |
| 17 | 0.541 | 0.0078 | 5.12 | 12489 | 0.30 | 0.003 | 0.024 |
| 19 | -0.565 | 0.0062 | 5.34 | 11174 | -0.25 | -0.002 | -0.022 |
| | 10.571 | $\underline{Q}=0.8784$ | 100 | / | 650.04 | 6.50 | 3.10 |
| THD | 27.3% | $\underline{D}=0.3880$ | 27.3% | / | 5.1% | 5.1% | / |

表 5-4 : L=0.3H , C=15pF , n=100 , D=0.2283 :

| 谐波次数 | Vin_i (Vrms) | Qi | Thdi (%) | ZCi () | Vo_i (Vrms) | IRi(mA) | ICi(mA) |
|------|--------------|------------------------|----------|---------|-------------|---------|---------|
| 1 | 7.102 | 0.9095 | 88.54 | 212314 | 645.96 | 6.460 | 3.042 |
| 3 | 3.011 | 0.2428 | 37.54 | 70771 | 73.12 | 0.731 | 1.033 |
| 5 | -0.929 | 0.0898 | 11.59 | 42463 | -8.34 | -0.083 | -0.197 |
| 7 | -1.471 | 0.0459 | 18.34 | 30331 | -6.76 | -0.068 | -0.223 |
| 9 | 0.205 | 0.0278 | 2.56 | 23590 | 0.57 | 0.006 | 0.024 |
| 11 | 0.982 | 0.0186 | 12.24 | 19301 | 1.83 | 0.018 | 0.095 |
| 13 | 0.084 | 0.0133 | 1.04 | 16332 | 0.11 | 0.001 | 0.007 |
| 15 | -0.700 | 0.01 | 8.73 | 14154 | -0.70 | -0.007 | -0.050 |
| 17 | -0.232 | 0.0078 | 2.89 | 12489 | -0.18 | -0.002 | -0.014 |
| 19 | 0.496 | 0.0062 | 6.19% | 11174 | 0.31 | 0.003 | 0.028 |
| | 8.021 | $\underline{Q}=0.8784$ | 100 | / | 650.18 | 6.50 | 3.23 |
| THD | 52.5% | $\underline{D}=0.388$ | 52.5% | / | 11.4% | 11.4% | / |

表 5-5 : L=0.3H , C=5pF , n=100 , D=0.2757 :

| 谐波次数 | Vin_i (Vrms) | Qi | Thdi (%) | ZCi () | Vo_i (Vrms) | IRi(mA) | ICi(mA) |
|------|--------------|------------------------|----------|---------|-------------|---------|---------|
| 1 | 8.232 | 0.7843 | 93.22 | 636943 | 645.67 | 6.457 | 1.014 |
| 3 | 1.862 | 0.3512 | 21.08 | 212314 | 65.38 | 0.654 | 0.308 |
| 5 | -2.006 | 0.1842 | 22.71 | 127389 | -36.94 | -0.369 | -0.290 |
| 7 | -0.337 | 0.1101 | 3.82 | 90992 | -3.71 | -0.037 | -0.041 |
| 9 | 1.199 | 0.0721 | 13.57 | 70771 | 8.64 | 0.086 | 0.122 |
| 11 | -0.101 | 0.0505 | 1.14 | 57904 | -0.51 | -0.005 | -0.009 |
| 13 | -0.802 | 0.0371 | 9.09 | 48996 | -2.98 | -0.030 | -0.061 |
| 15 | 0.297 | 0.0284 | 3.37 | 42463 | 0.84 | 0.008 | 0.020 |
| 17 | 0.529 | 0.0224 | 5.99 | 37467 | 1.18 | 0.012 | 0.032 |
| 19 | -0.387 | 0.0181 | 4.38 | 33523 | -0.70 | -0.007 | -0.021 |
| | 8.830 | $\underline{Q}=0.7362$ | 100 | / | 650.10 | 6.50 | 1.11 |
| THD | 38.8% | $\underline{D}=0.2707$ | 38.8% | / | 11.7% | 11.7% | / |

表 5-6 : L=0.4H , C=5pF , n=100 , D=0.3552 :

| 谐波次数 | Vin_i (Vrms) | Qi | Thdi (%) | ZCi () | Vo_i (Vrms) | IRi(mA) | ICi(mA) |
|------|--------------|------------------------|----------|---------|-------------|---------|---------|
| 1 | 9.707 | 0.6690 | 96.68% | 636943 | 649.41 | 6.494 | 1.020 |
| 3 | -0.737 | 0.2598 | 7.34% | 212314 | -19.15 | -0.192 | -0.090 |
| 5 | -1.398 | 0.1350 | 13.93% | 127389 | -18.87 | -0.189 | -0.148 |
| 7 | 1.542 | 0.0810 | 15.36% | 90992 | 12.49 | 0.125 | 0.137 |
| 9 | -0.696 | 0.0533 | 6.93% | 70771 | -3.71 | -0.037 | -0.052 |
| 11 | -0.282 | 0.0374 | 2.81% | 57904 | -1.06 | -0.011 | -0.018 |
| 13 | 0.775 | 0.0276 | 7.72% | 48996 | 2.14 | 0.021 | 0.044 |
| 15 | -0.618 | 0.0211 | 6.15% | 42463 | -1.31 | -0.013 | -0.031 |
| 17 | 0.076 | 0.0167 | 0.76% | 37467 | 0.13 | 0.001 | 0.003 |
| 19 | 0.404 | 0.0135 | 4.02% | 33523 | 0.54 | 0.005 | 0.016 |
| | 10.040 | $\underline{Q}=0.6475$ | 100 | / | 650.10 | 6.50 | 1.05 |
| THD | 26.5% | $\underline{D}=0.3499$ | 26.5% | / | 4.6% | 4.6% | / |

表 5-7 : L=0.4H , C=10pF , n=100 , D=0.318 :

| 谐波次数 | Vin_i (Vrms) | Qi | Thdi (%) | ZCi () | Vo_i (Vrms) | IRi(mA) | ICi(mA) |
|------|--------------|------------------------|----------|---------|-------------|---------|---------|
| 1 | 9.087 | 0.7150 | 95.73 | 318471 | 649.66 | 6.497 | 2.040 |
| 3 | 0.519 | 0.2197 | 5.46 | 106157 | 11.40 | 0.114 | 0.107 |
| 5 | -2.075 | 0.0921 | 21.86 | 63694 | -19.11 | -0.191 | -0.300 |
| 7 | 1.006 | 0.04921 | 10.6 | 45496 | 4.95 | 0.050 | 0.109 |
| 9 | 0.504 | 0.0304 | 5.31 | 35386 | 1.53 | 0.015 | 0.043 |
| 11 | -0.982 | 0.0205 | 10.35 | 28952 | -2.02 | -0.020 | -0.070 |
| 13 | 0.340 | 0.0148 | 3.58 | 24498 | 0.50 | 0.005 | 0.020 |
| 15 | 0.476 | 0.0111 | 5.02 | 21231 | 0.53 | 0.005 | 0.025 |
| 17 | -0.608 | 0.0087 | 6.41 | 18734 | -0.53 | -0.005 | -0.028 |
| 19 | 0.075 | 0.007 | 0.79 | 16762 | 0.05 | 0.001 | 0.003 |
| | 9.492 | $\underline{Q}=0.6849$ | 100 | / | 650.07 | 6.50 | 2.07 |
| THD | 30.2% | $\underline{D}=0.3128$ | 30.2% | / | 3.5% | 3.5% | / |

电压电流的负值表示相位相差 180 度。

由表 5-1、5-2 可以看到增大 C 对于抑制高次谐波有一定的作用，即使输入波形的谐波分量比较高。表 5-4、5-5 虽然输出谐波相差不大，但是表 5-4 的输入谐波明显高于表 5-5 的输入谐波，说明增大高压电容 C 可以改善输出波形。

由表 5-1、5-6 可以看到较大得漏感对于抑制高次谐波改善输出波形有明显的作。

由表 5-3、表 5-4 可以看到当 L、C 不变时改变匝数比 n，n 增大以后由于占空比减小引起的高次谐波在负载上会体现出来，所以占空比越小输出波形越差。

表 5-3、5-7 比较接近实际的应用。

6. 安全保护问题：

考虑安规要求，人体负载相当于 2K Ω ，流过此电阻的电流限值为 0.7mA_{peak}*f (f 以 KHz 为单位)，但是最高不超过 70mA 的峰值。

设 R=2 K Ω ，f=50KHz，I_{out}<35mA_{peak}，占空比开到最大 0.5：

| 漏感 L (H) | 电容 C (pF) | Q (@f) | 匝数比 n | 占空比 D | I _{sec} (mA _{peak}) | I _{pri} (Arms) |
|----------|-----------|--------|-------|-------|--|-------------------------|
| 0.2 | 5 | 0.0318 | 70 | 0.5 | 18.9 | 0.936 |
| 0.2 | 10 | 0.0318 | 70 | 0.5 | 18.9 | 0.936 |
| 0.2 | 15 | 0.0318 | 70 | 0.5 | 18.9 | 0.936 |
| 0.2 | 5 | 0.0318 | 100 | 0.5 | 27 | 1.909 |
| 0.2 | 10 | 0.0318 | 100 | 0.5 | 27 | 1.909 |
| 0.2 | 15 | 0.0318 | 100 | 0.5 | 27 | 1.909 |
| 0.3 | 5 | 0.0212 | 70 | 0.5 | 12.6 | 0.624 |
| 0.3 | 10 | 0.0212 | 70 | 0.5 | 12.6 | 0.624 |
| 0.3 | 15 | 0.0212 | 70 | 0.5 | 12.6 | 0.624 |
| 0.3 | 5 | 0.0212 | 100 | 0.5 | 18 | 1.273 |
| 0.3 | 10 | 0.0212 | 100 | 0.5 | 18 | 1.273 |
| 0.3 | 15 | 0.0212 | 100 | 0.5 | 18 | 1.273 |
| 0.4 | 5 | 0.0159 | 100 | 0.5 | 13.5 | 0.955 |
| 0.4 | 10 | 0.0159 | 100 | 0.5 | 13.5 | 0.955 |
| 0.4 | 15 | 0.0159 | 100 | 0.5 | 13.5 | 0.955 |

此时输出电压比较低，流过高压电容的电流可以忽略。

这儿的电流峰值是按正弦波形计算出来的，实际波形由于有尖刺峰值还会要高一些。

可以看到，较大的漏感对于人体触电保护有比较明显的作用，并且在输出短路时初级电流也不会太大，对开关管有一定的保护作用，这时候漏感就起负载的作用。

匝数比不能取太大，否则安全方面会有问题。

7. 一些考虑：

$$V_{in} * (2D)^{0.5} * n * Q = V_{out}$$

A) 考虑 19 次谐波，当占空比 $D=0.3655$ 时输入波形谐波分量最小。

考虑输入电压、输出功率变化的余量及谐波分量的影响， D 取 0.36-0.37 比较合适。

如果工作环境比较稳定的话 D 可以取到 0.4。

B) 整个回路要稳定工作， $Q < 1$ ， $n * Q$ 为一定值。

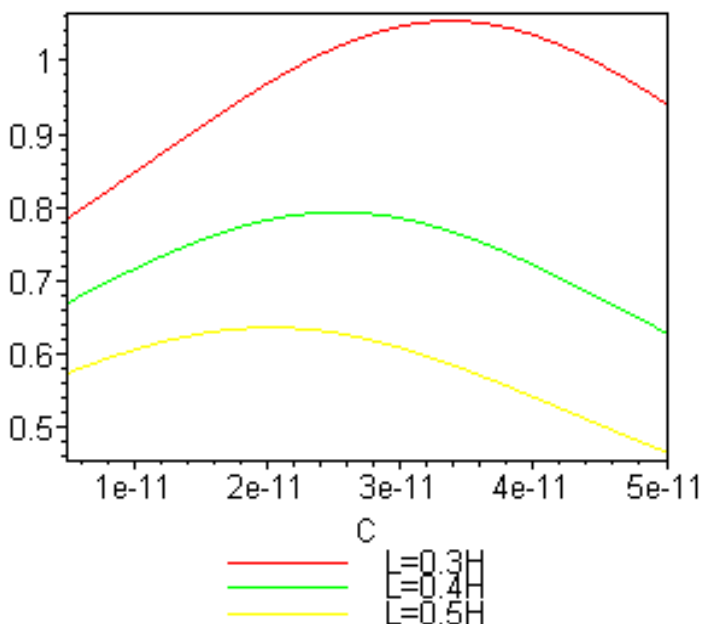
$$C) Q := \left| \frac{R}{\omega C \left(R - \frac{I}{\omega C} \right) \left(I \omega L + R_s - \frac{I R}{\omega C \left(R - \frac{I}{\omega C} \right)} \right)} \right|$$

Q 随 L 的增加而减小，因此 L 有个最小值的选取。

$$D) \text{ 初级峰值电流 } I_{pk} := \frac{1}{2} \frac{V_{out} \sqrt{I_{out}^2 + V_{out}^2 \omega^2 C^2}}{V_{in} D \left| \frac{R}{\omega C \left(R - \frac{I}{\omega C} \right) \left(I \omega L + R_s - \frac{I R}{\omega C \left(R - \frac{I}{\omega C} \right)} \right)} \right|}$$

可以看到 I_{pri} 随着漏感 L 的增加而增加，必须考虑初级开关管的电流应力， L 不能取得太大，事实上从工艺方面考虑，一般增加漏感是通过增加圈数达到的，这样会带来制作及成本上的问题，因此 L 的最大值取值也就有了限制。

E) 注意负载屏的分布电容带来的影响：下图是 50KHz 时不同 C 对应的 Q 值。



注意到 C 对应的 Q 值有个拐点，由于分布电容受外界的影响只会变大，因此要保证整个回路的 C 值在这拐点的左边，否则会影响系统工作的稳定性。因此屏的分布电容也就决定了 L 的最大值。