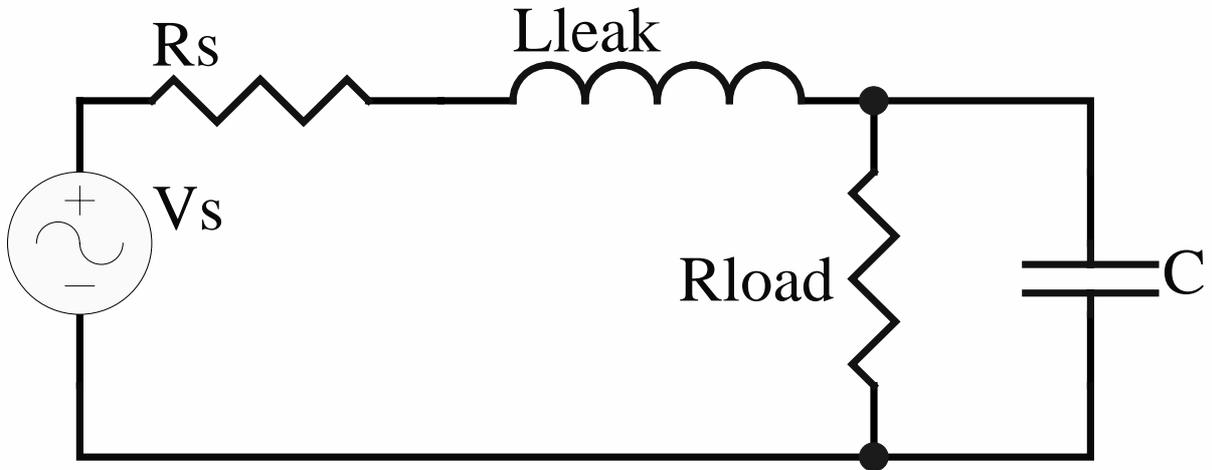


CCFL INVERTER 谐振变压器设计分析-1

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

$$Z := R_s + \frac{R}{\omega^2 C^2 \left( R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2} \right)} + I \left( \omega L - \frac{R^2}{\omega C \left( R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2} \right)} \right)$$

$$= \frac{\sqrt{L(-L + R^2 C)}}{L C R}$$

$$Q := \frac{-I R}{\omega C \left( R - \frac{I}{\omega C} \right) \left( I \omega L + R_s - \frac{I R}{\omega C \left( R - \frac{I}{\omega C} \right)} \right)} \quad (\text{复数取模})$$

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	<u>Q</u> =0.8784	100	/	650.18	6.50	3.23
THD	52.5%	<u>D</u> =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	<u>Q</u> =0.7362	100	/	650.10	6.50	1.11
THD	38.8%	<u>D</u> =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	<u>Q</u> =0.6475	100	/	650.10	6.50	1.05
THD	26.5%	<u>D</u> =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 $\Omega$ ，流过此电阻的电流限值为 0.7mA<sub>peak</sub>\*f (f 以 KHz 为单位)，但是最高不超过 70mA 的峰值。

设 R=2 K $\Omega$ ，f=50KHz，I<sub>out</sub><35mA<sub>peak</sub>，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 <sub>sec</sub> (mA <sub>peak</sub> )	I <sub>pri</sub> (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。

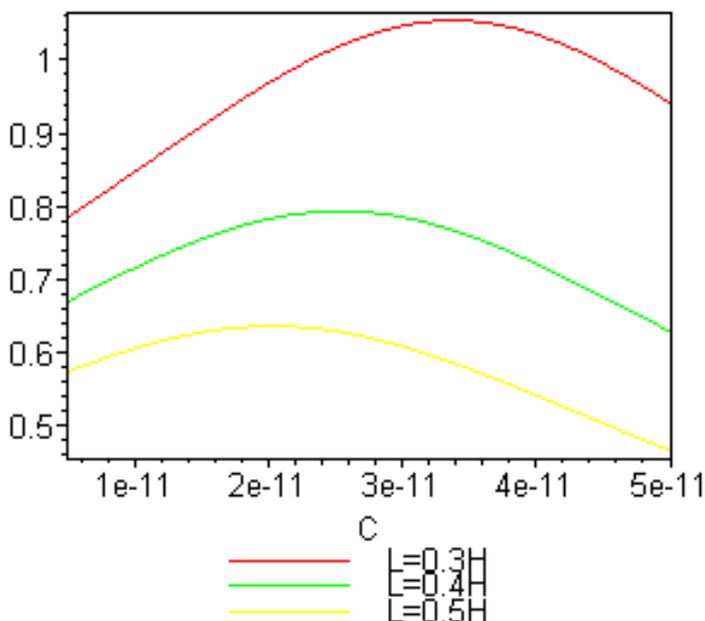
$$C) Q := \left| \frac{R}{\omega C \left( R - \frac{I}{\omega C} \right) \left( I \omega L + R_s - \frac{I R}{\omega C \left( R - \frac{I}{\omega C} \right)} \right)} \right|$$

$Q$  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。