www.21dianyuan.com

LLC设计步骤

- LLC的基本原理
- LLC的设计方法
- LLC的几个问题

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

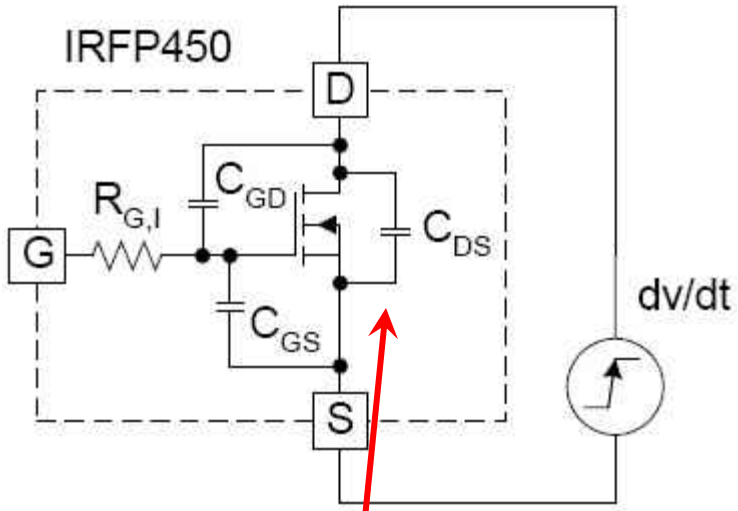
www.21dianyuan.com

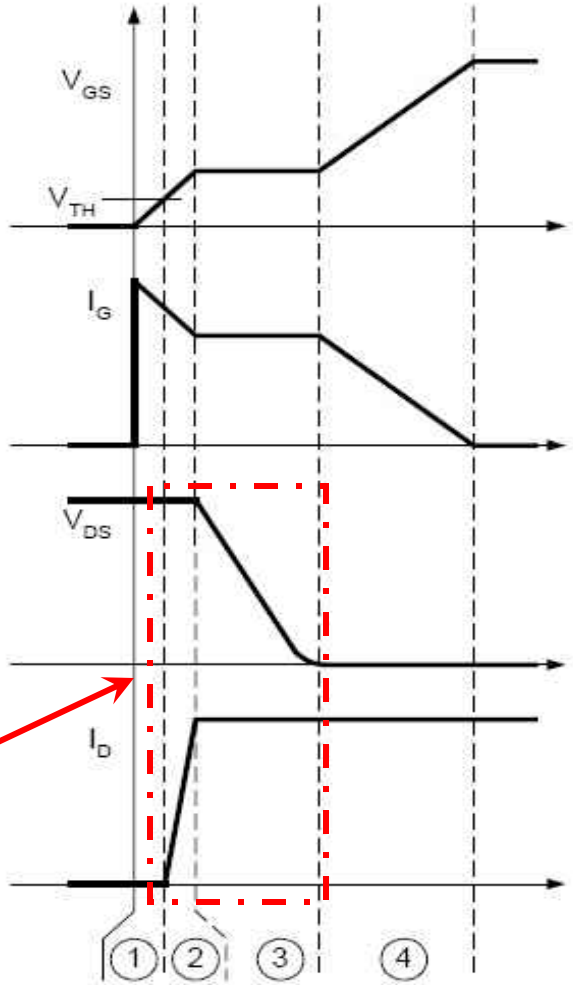
LLC的基本原理

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

MOSFET适合零电压开关



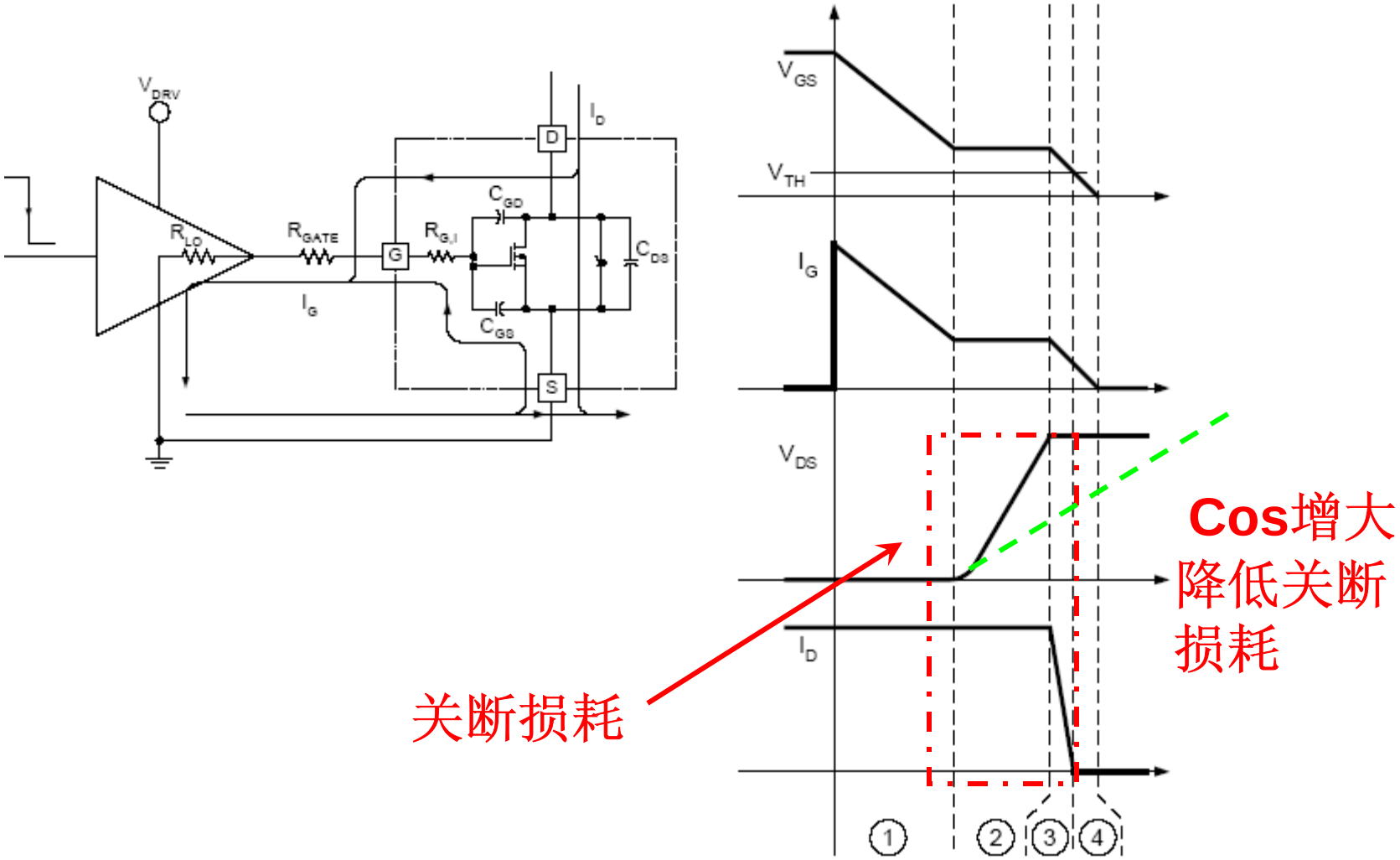


$$\frac{1}{2}CV_{DS}^2 \quad + \quad \text{开通损耗}$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

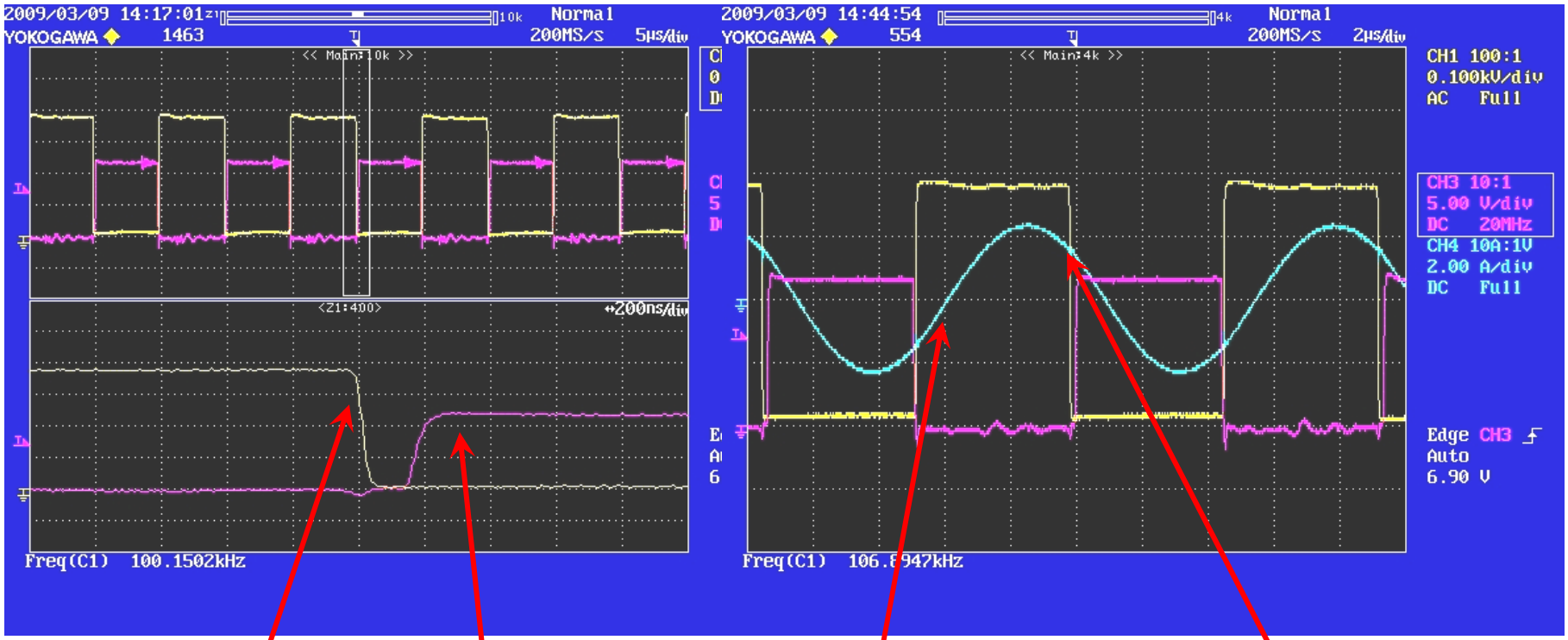
MOSFET适合零电压开关



版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

MOSFET的零电压开关



V_{HB} V_{GS} i_r

关断损耗避免不了

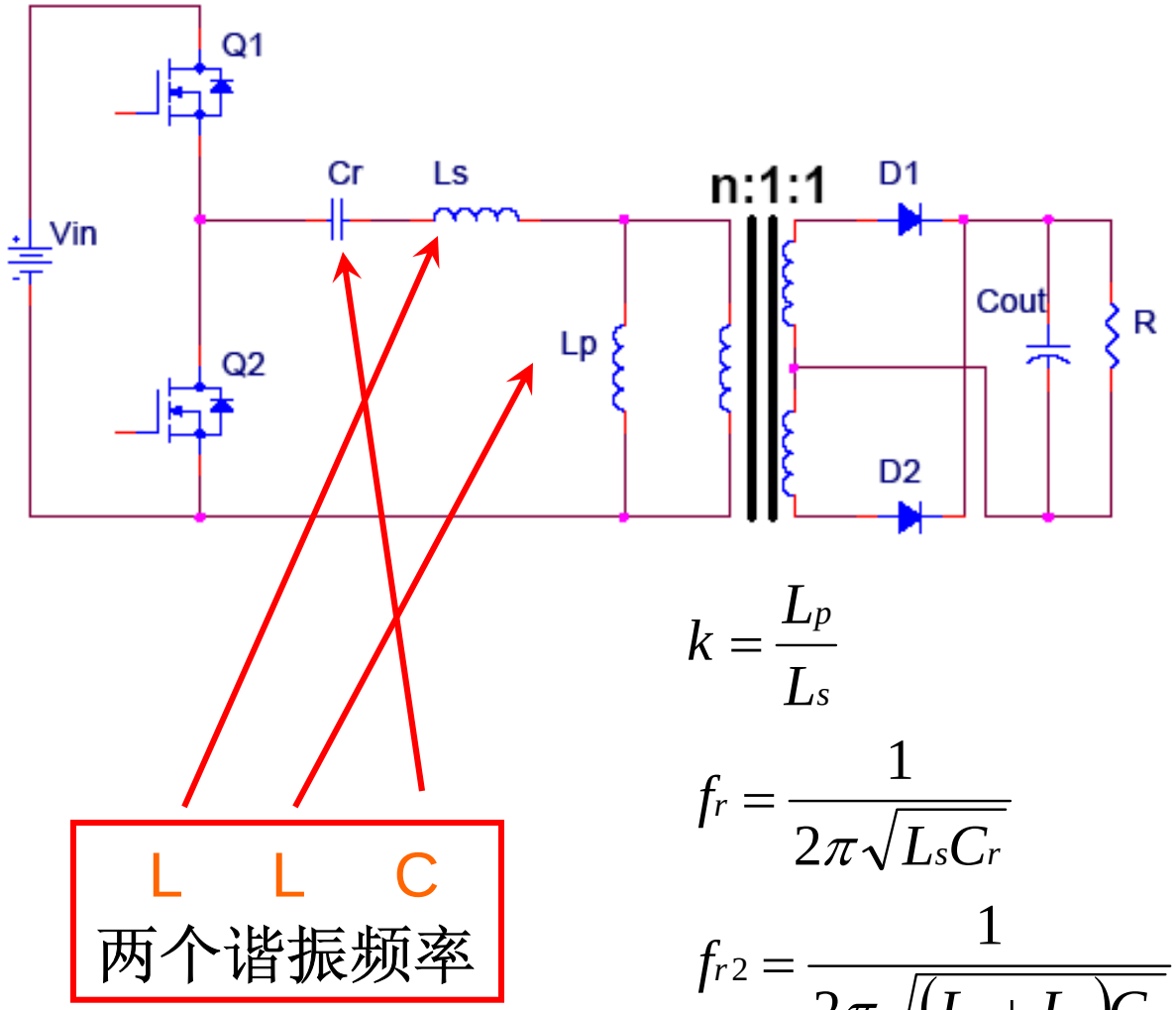
MOSFET开通前,其Vds电压已经为零,则为零电压开通(ZVS)

ZVS的实现需要驱动信号来时有电流从S到D流通,LLC可以实现

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC的架构



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

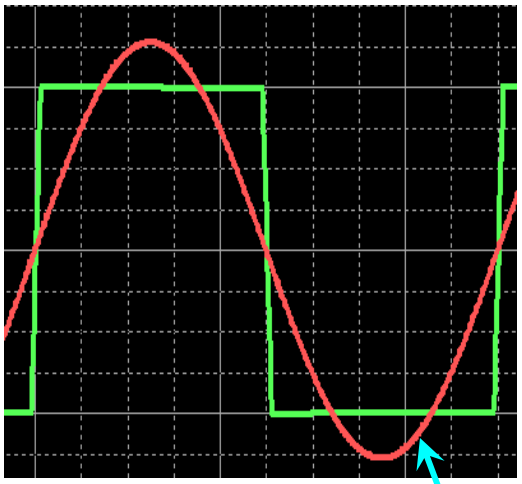
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_r}}$$

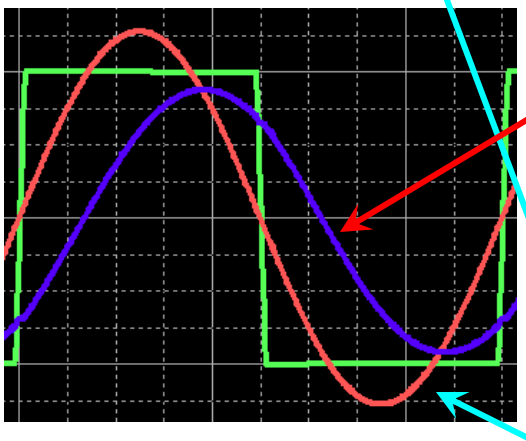
$$f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_p)C_r}}$$

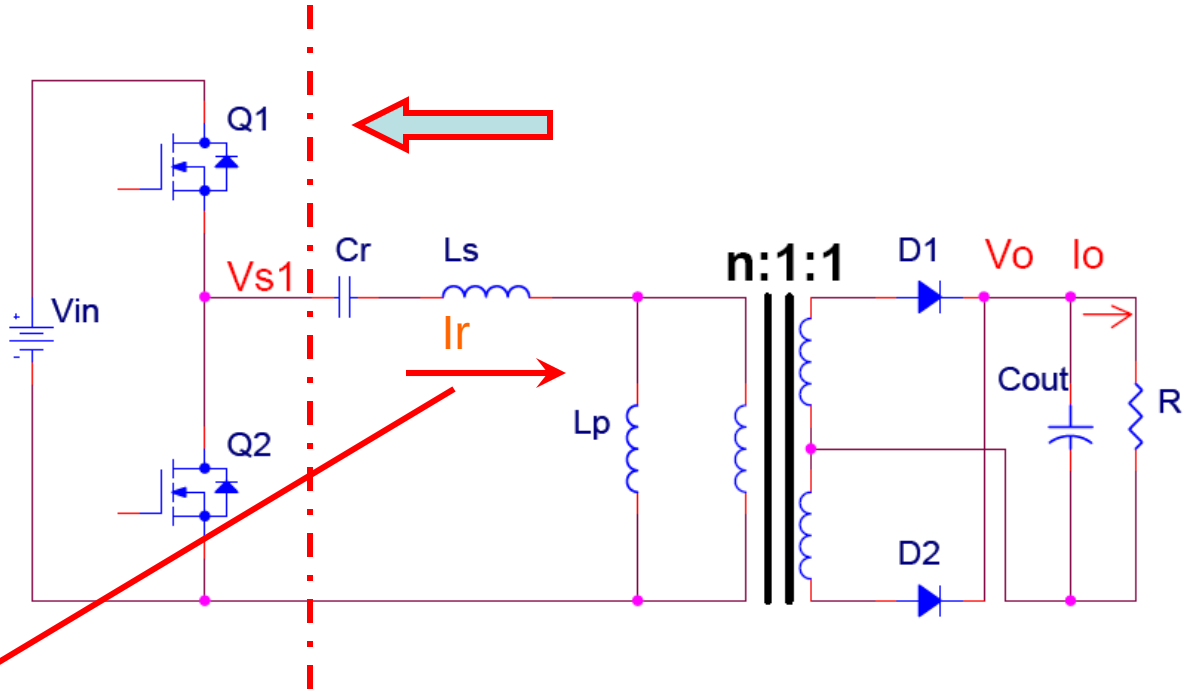
版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

输入FHA等效电路







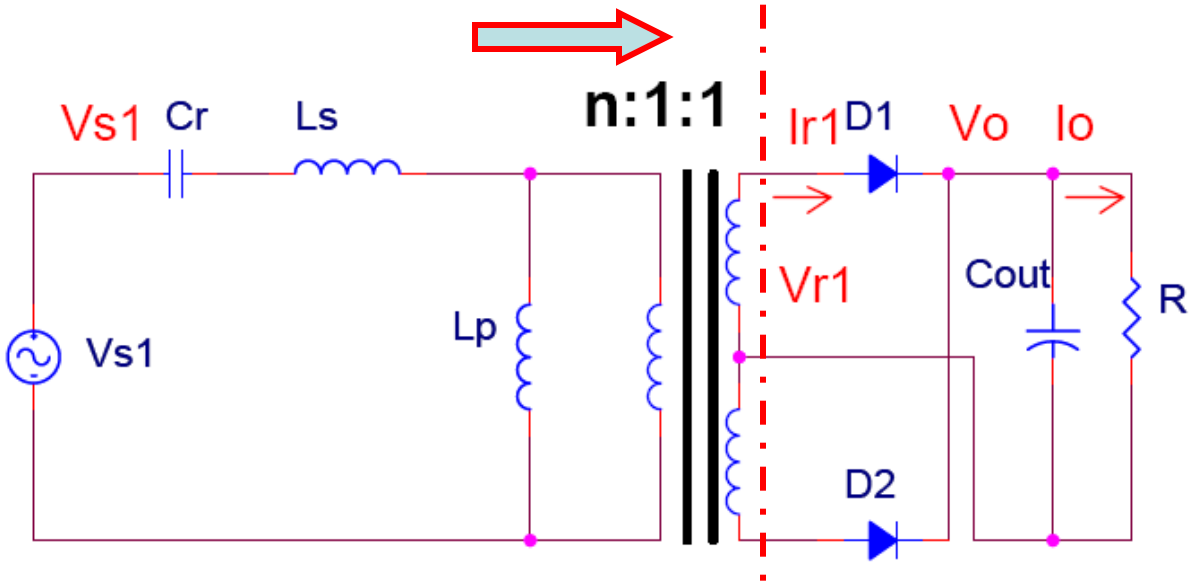
$$Vs = \frac{Vin}{2} + \frac{2}{\pi} Vin \sum_{n=1,3,5\ldots} \frac{1}{n} \sin(2n\pi f_{sw} t)$$

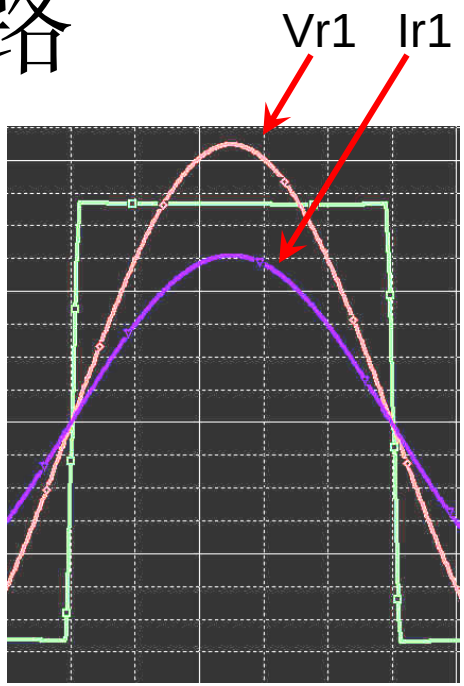
$$Vs1 = \frac{2}{\pi} Vin \sin(2\pi f_s t)$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

输出FHA等效电路





$$Vr1 = \frac{4}{\pi} Vo \sin(2\pi fst - \varphi R)$$

$$Ir1 = IR1 \sin(2\pi fst - \varphi R)$$

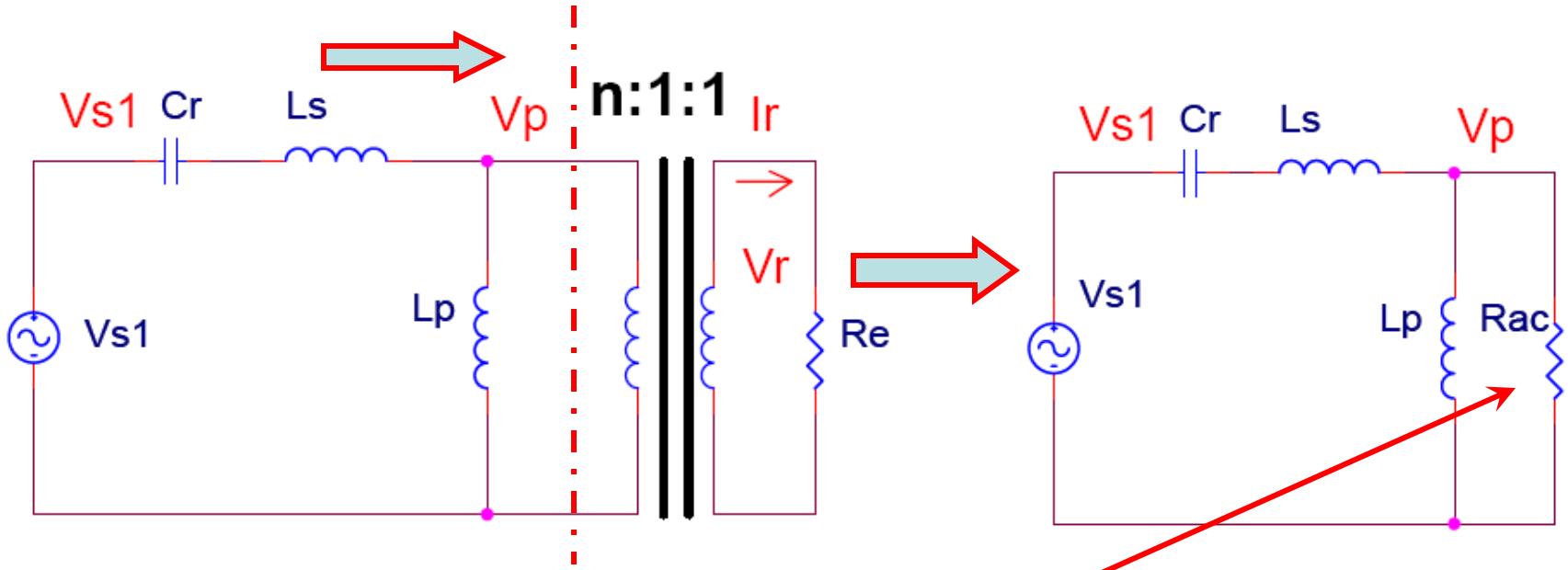
$$Io = \frac{2}{Ts}\int_0^{Ts/2} IR1 \left|\sin(2\pi fst - \varphi R)dt\right| = \frac{2}{\pi} IR1$$

Vr1, Ir1同相,所以阻抗为电阻 → $\mathrm{Re} = \frac{Vr1(t)}{ir1(t)} = \frac{8}{\pi^2} * \frac{Vo}{Io} = \frac{8R}{\pi^2}$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

输出FHA等效电路



等效到初级侧

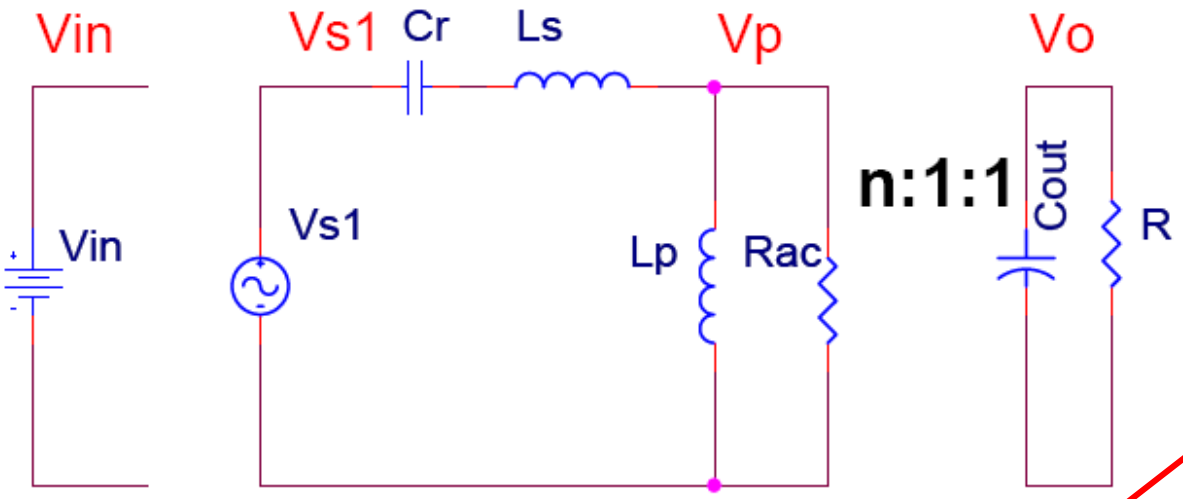
$$R_{AC} = n^2 \mathrm{Re} = n^2 \frac{8}{\pi^2} R$$

$$V_p = nV_{r1} = n\frac{4}{\pi}V_o$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC的简化FHA等效电路



归一化增益

$$Vs1 = \frac{2}{\pi} Vin \Rightarrow Vin = \frac{\pi}{2} Vs1$$

$$V_p = nV_{r1} = n\frac{4}{\pi} V_o \Rightarrow V_o = \frac{\pi}{4n} V_p$$

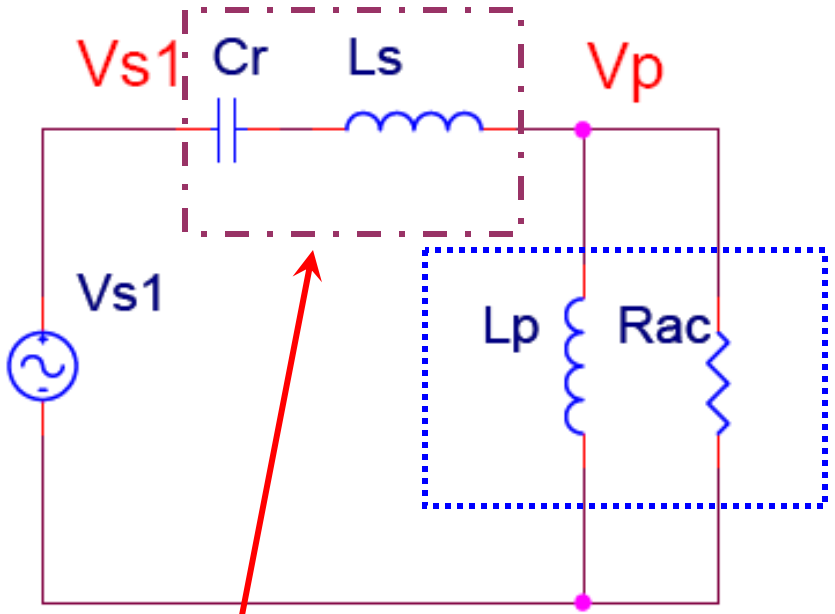
$$|G| = \frac{nVo}{\frac{Vin}{2}} = \frac{n\frac{\pi}{4n}V_P}{\frac{\pi}{4}V_{S1}} = \frac{V_P}{V_{S1}}$$

$$= \frac{sLp \,//\, Rac}{1/sCr + sLr + (sLp \,//\, Rac)}$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC的稳压原理



输入或负载变化时引起Vp变化

$$k=\frac{L_p}{L_s} \qquad x=\frac{f}{fr} \qquad Q=\frac{2\pi f_r L_s}{R_{AC}}$$

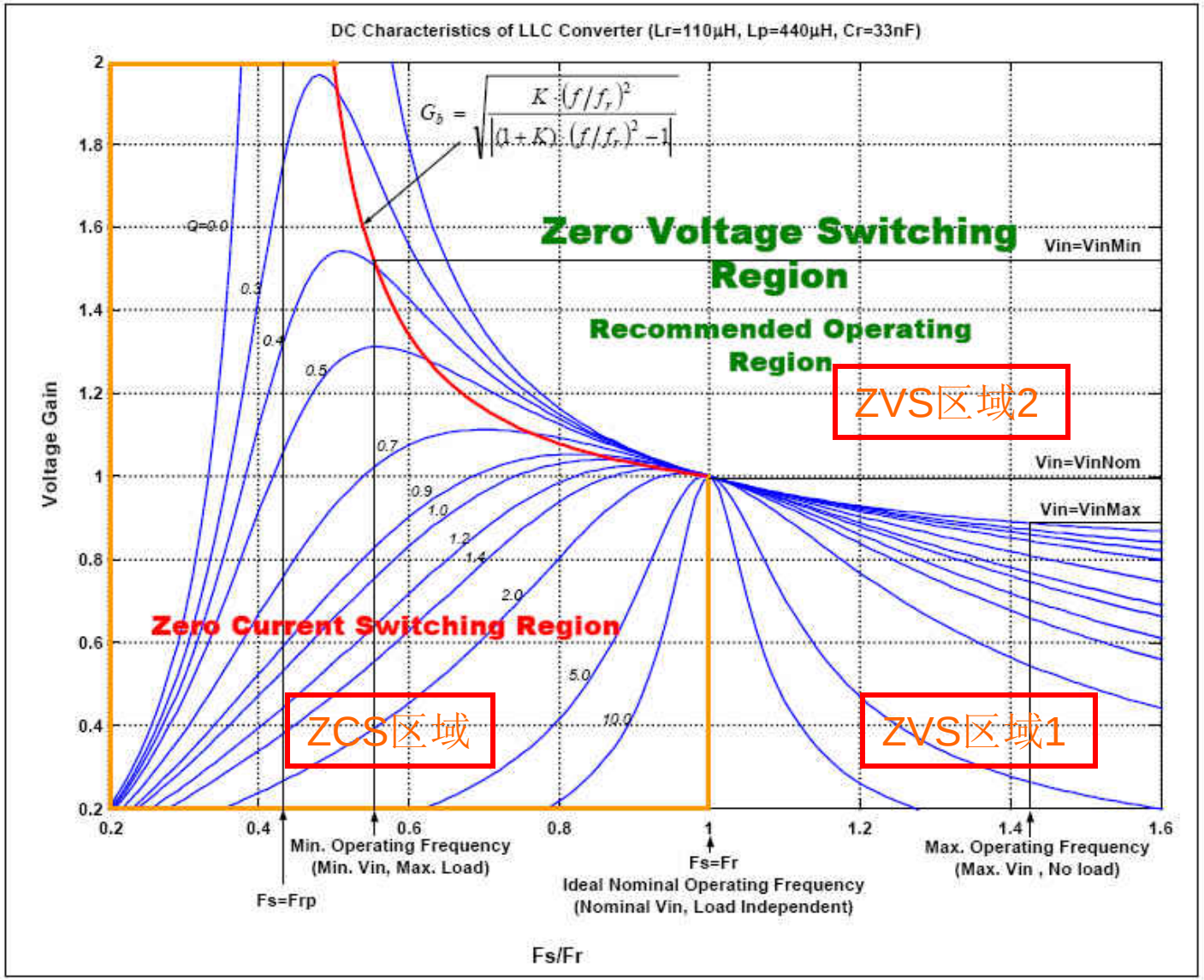
通过改变频率使1/sCr+sLr的分压相应改变，最终维持负载电压不变,即Vp不变

$$|G(f)|=\frac{k*(x)^2}{\sqrt{\{(1+k)*(x)^2-1\}^2+\{Qk(x)*[(x)^2-1]\}^2}}$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

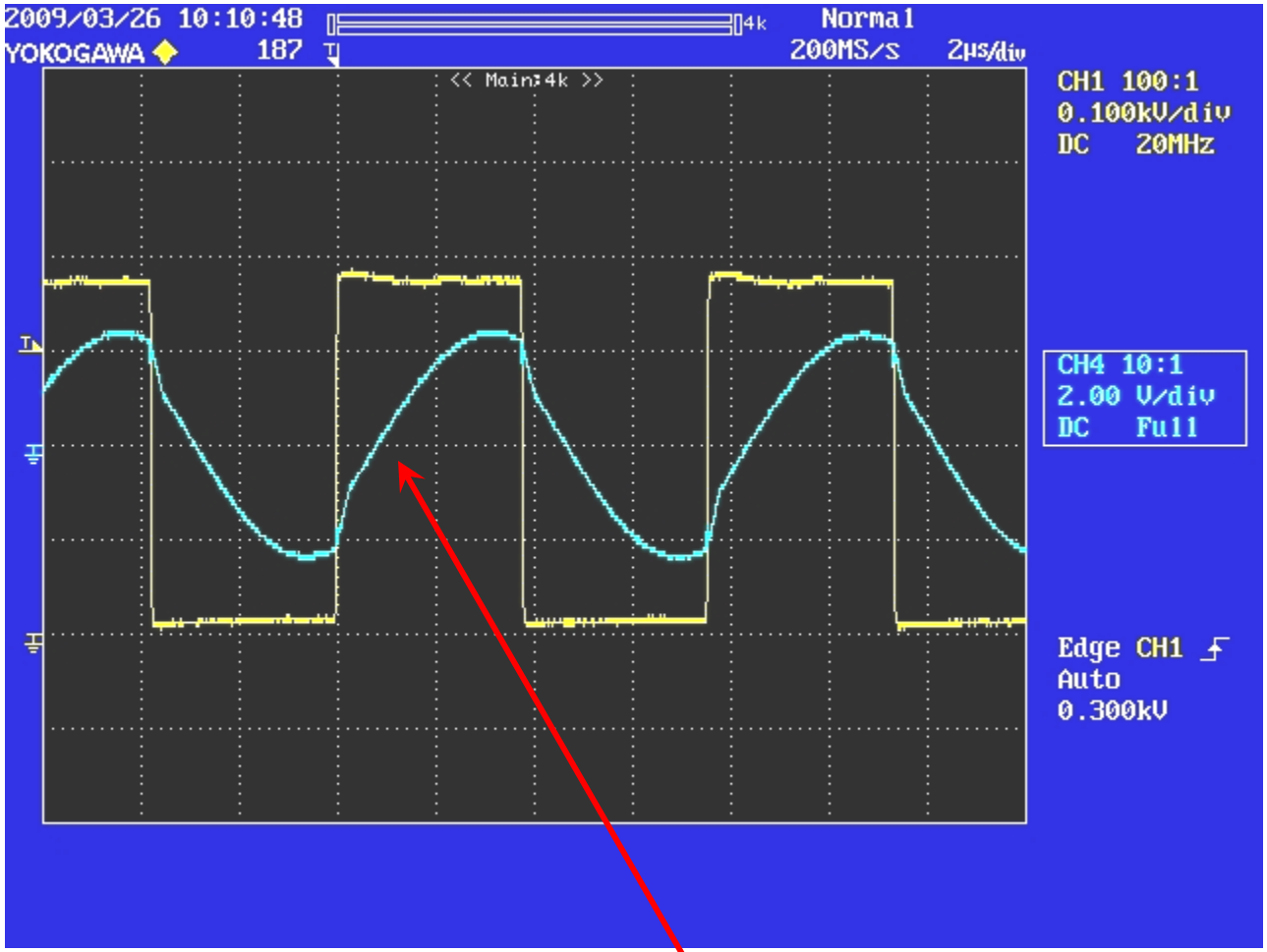
LLC的DC特性



版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

ZVS区域1的波形

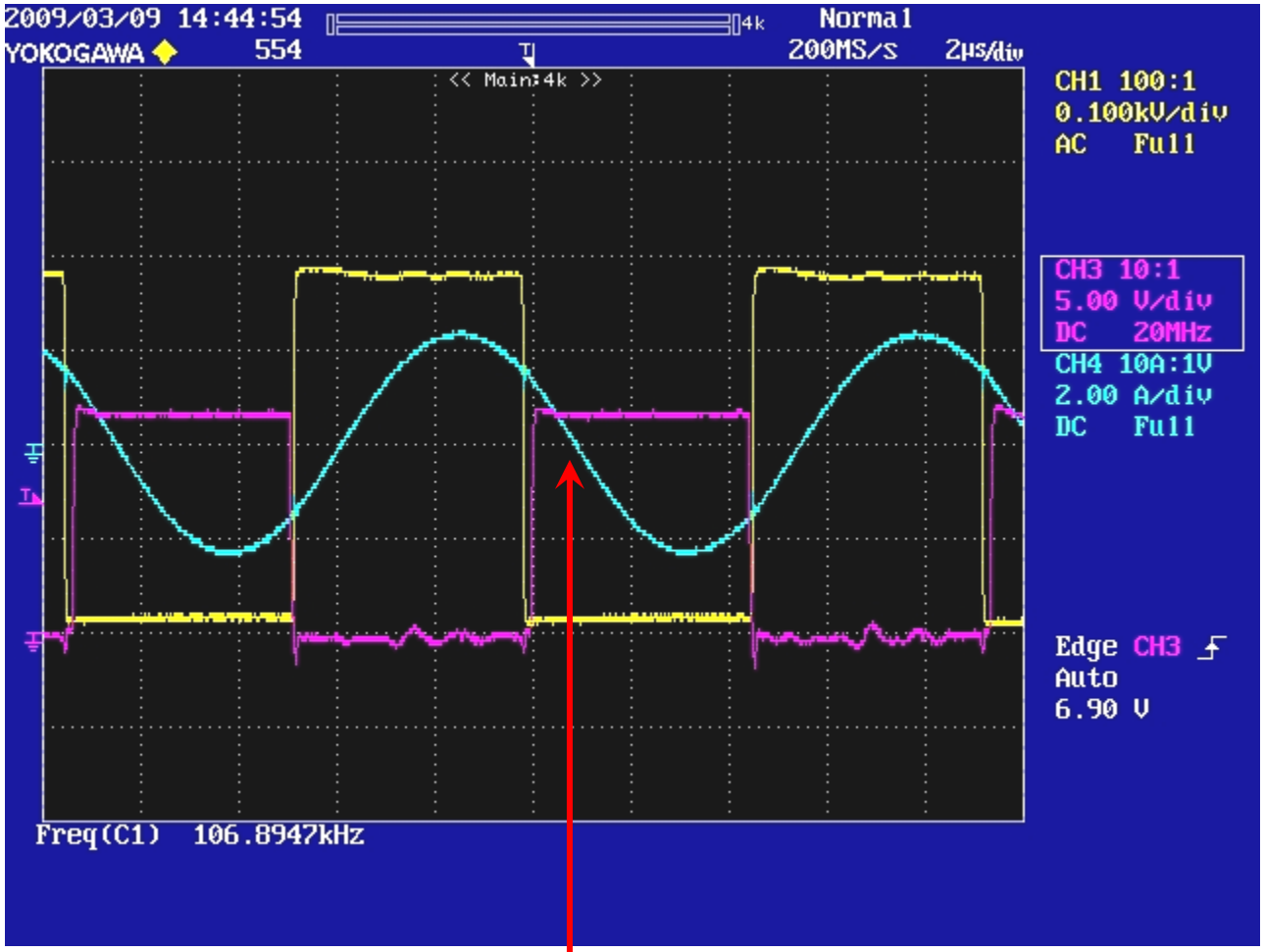


f>fr 开关频率大于谐振频率
上管开通前电流由S-D流通

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

谐振点的波形

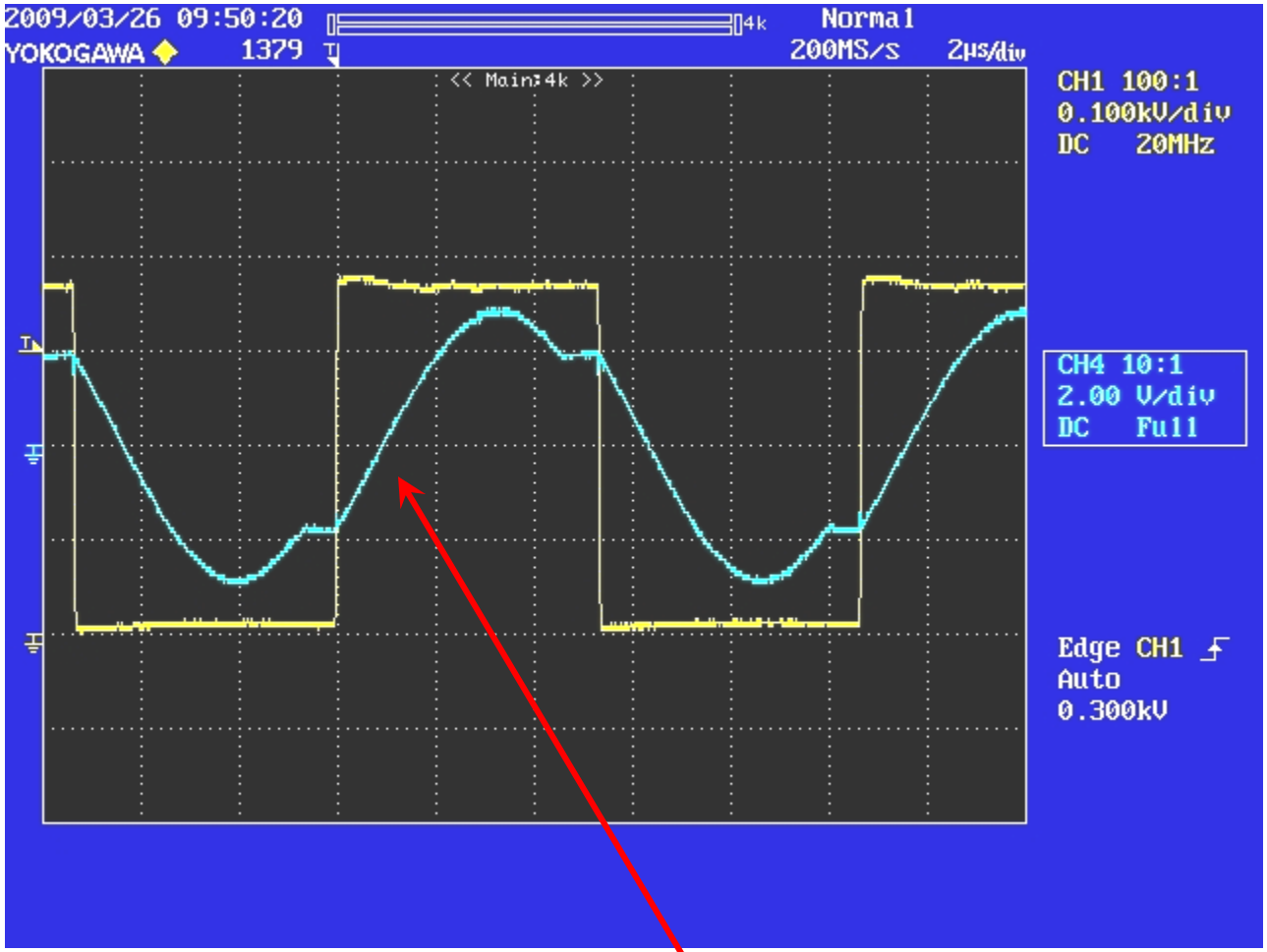


f=fr 开关频率等于谐振频率
下管开通前电流由S-D流通

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

ZVS区域2的波形

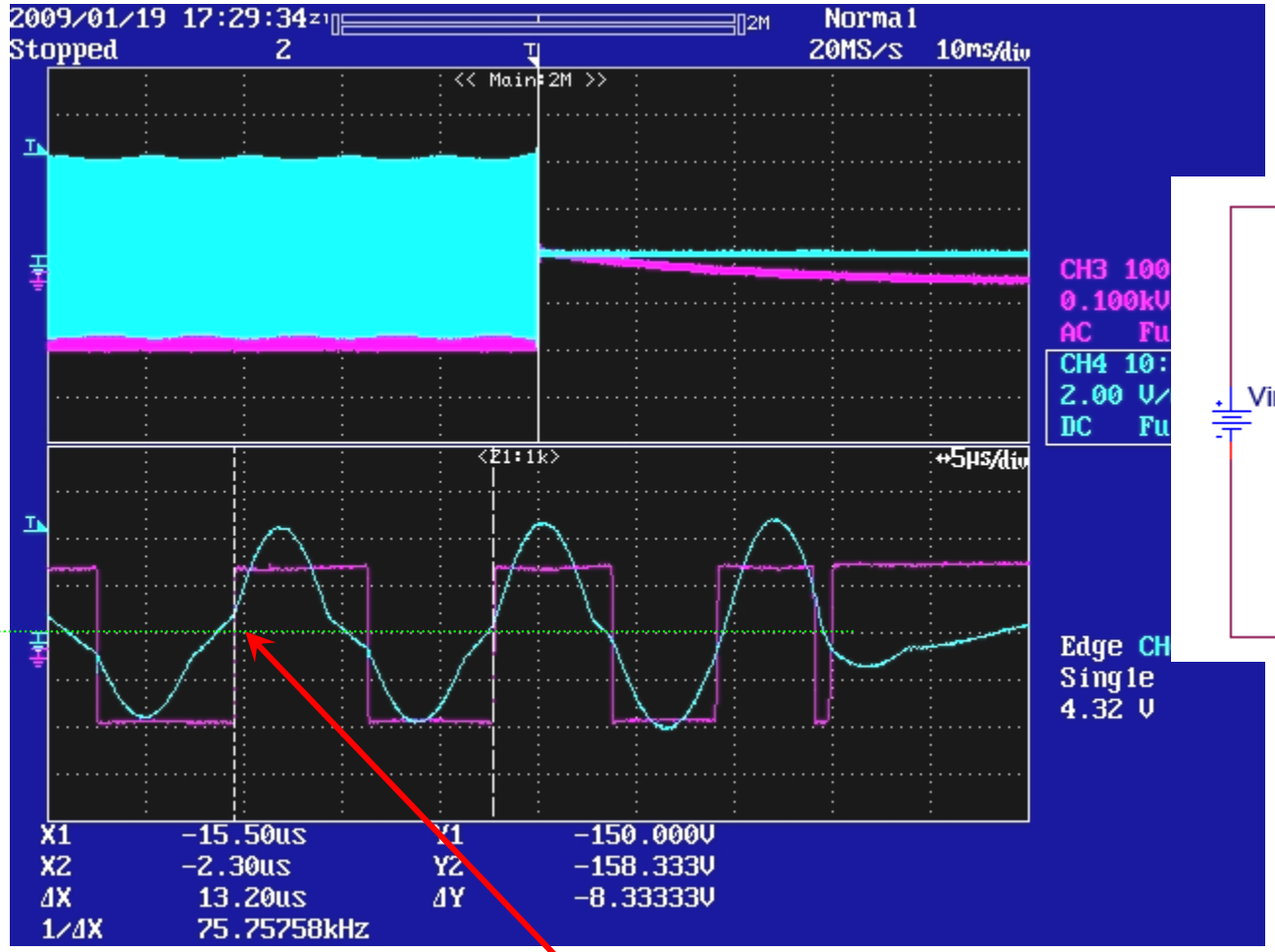


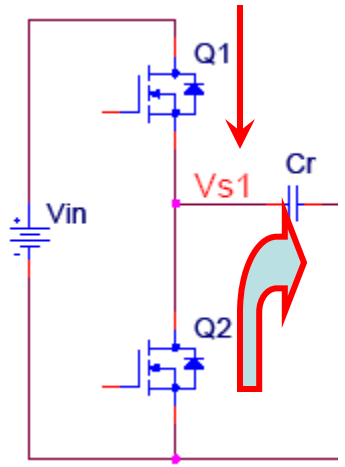
f<fr 开关频率小于谐振频率
上管开通前电流由S-D流通

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

ZCS区域的波形





0

电流由D-S流过Q2体二极管

f<fr2 开关频率小于谐振频率
上管开通前电流由D-S流通

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC的设计方法

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

已知的条件

1. 输入电压范围
2. 输出电压、电流
3. 确定需要的谐振频率
4. 额定输入、输出满载时电源工作在fr附近

可简单得到的结果

1. 变压器变比n
2. 需要的电压增益Gmax,Gmin
3. Rac；k

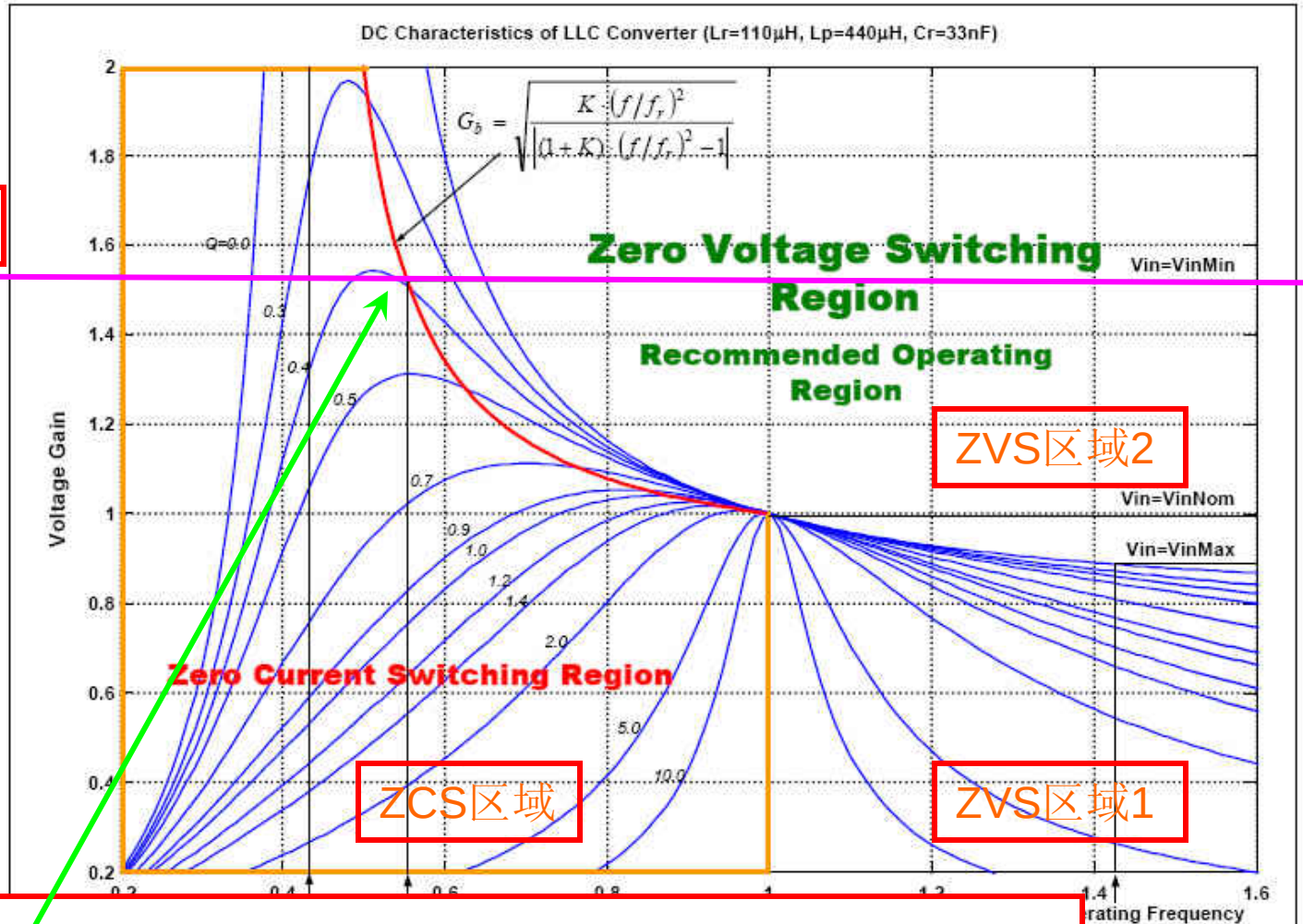
需要求解的量

1. Q值，由此得到Cr,Ls,Lp
2. 最小、最大开关频率

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC的DC特性



Gmax

$$|G(f)| = \frac{k*(x)^2}{\sqrt{\{(1+k)*(x)^2-1\}^2+\{Qk(x)*[(x)^2-1]\}^2}}$$

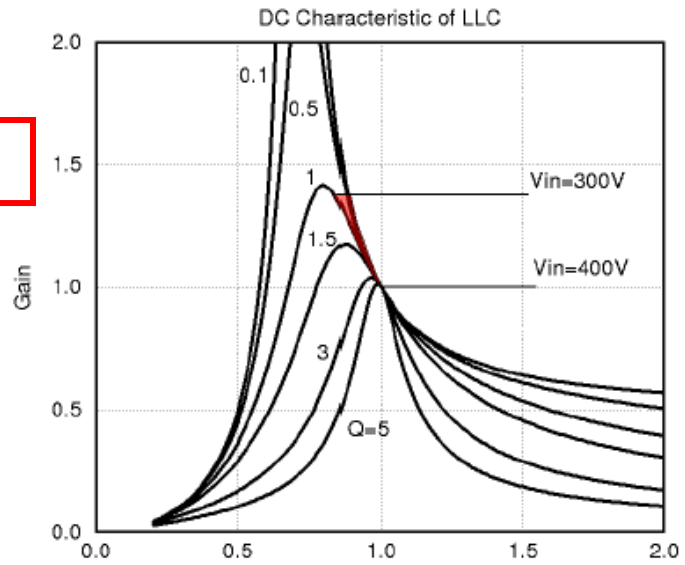
Gmax已知，3个变量，无法求出Q值

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

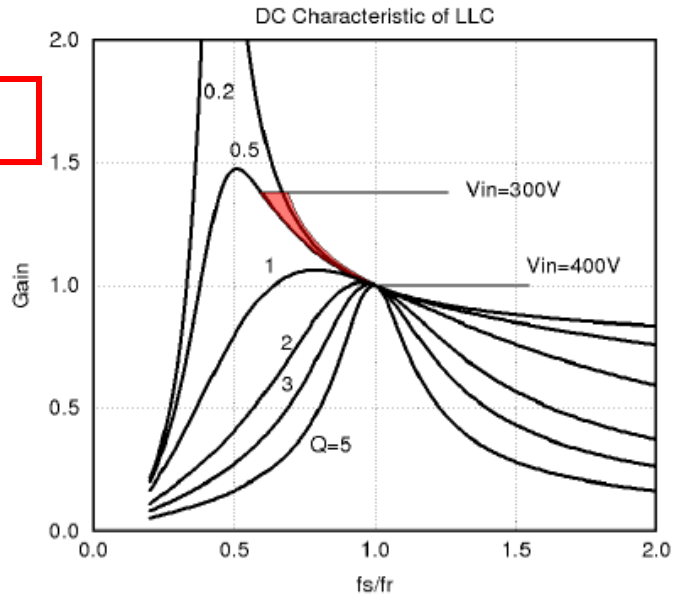
www.21dianyuan.com

K值的确定

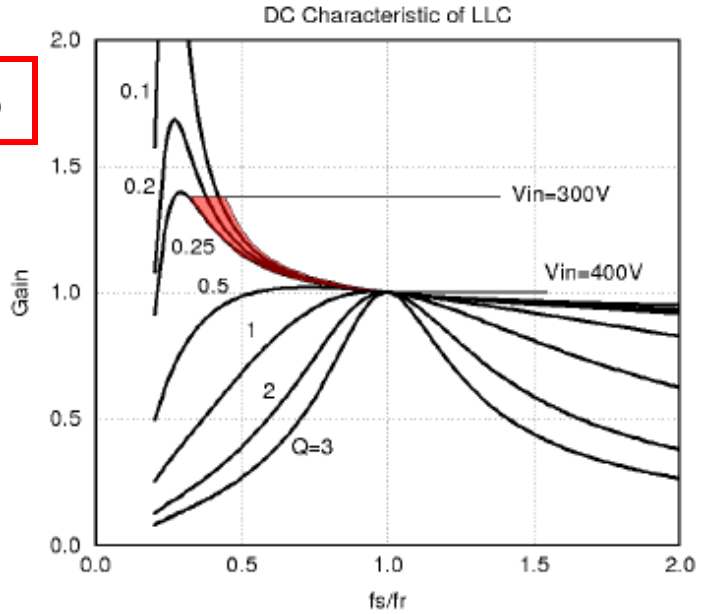
k=1



k=4



k=16



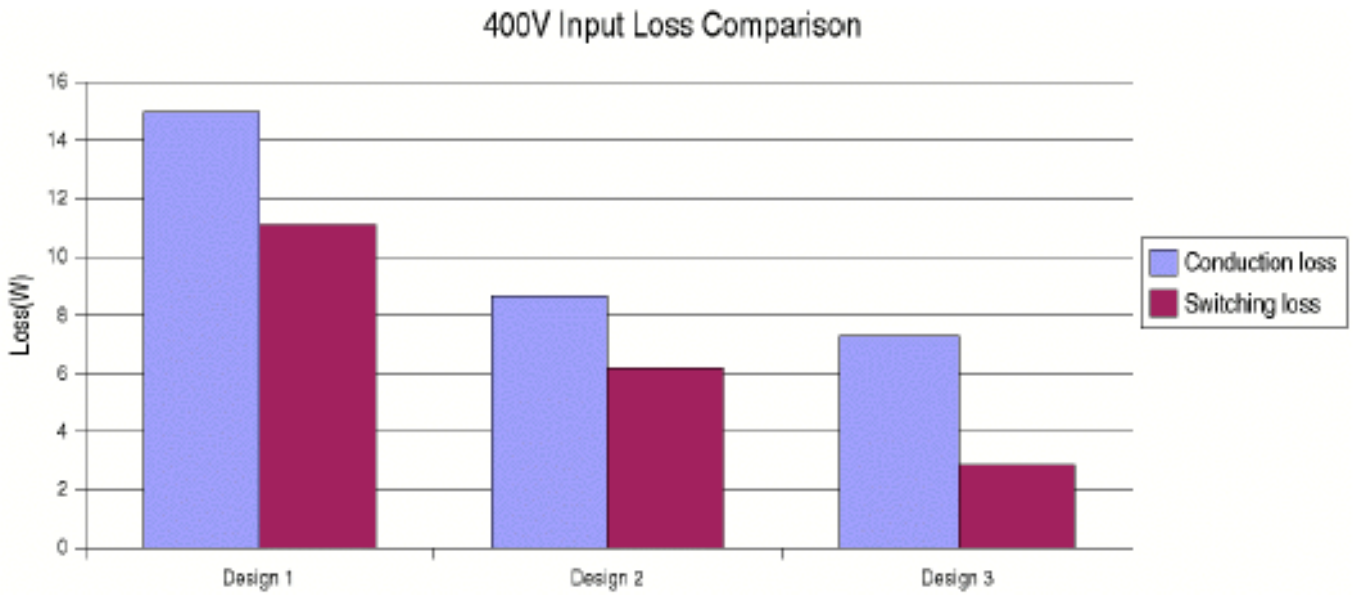
K值越小，获得相同增益的频率变化范围越窄

K 值越大，获得相同增益的频率变化范围越宽

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

K值的确定



k=1　　k=4　　k=16

k值越大，MOSFET在fr附近的导通损耗和开关损耗越低

综合以上考虑k一般取2.5-6的范围

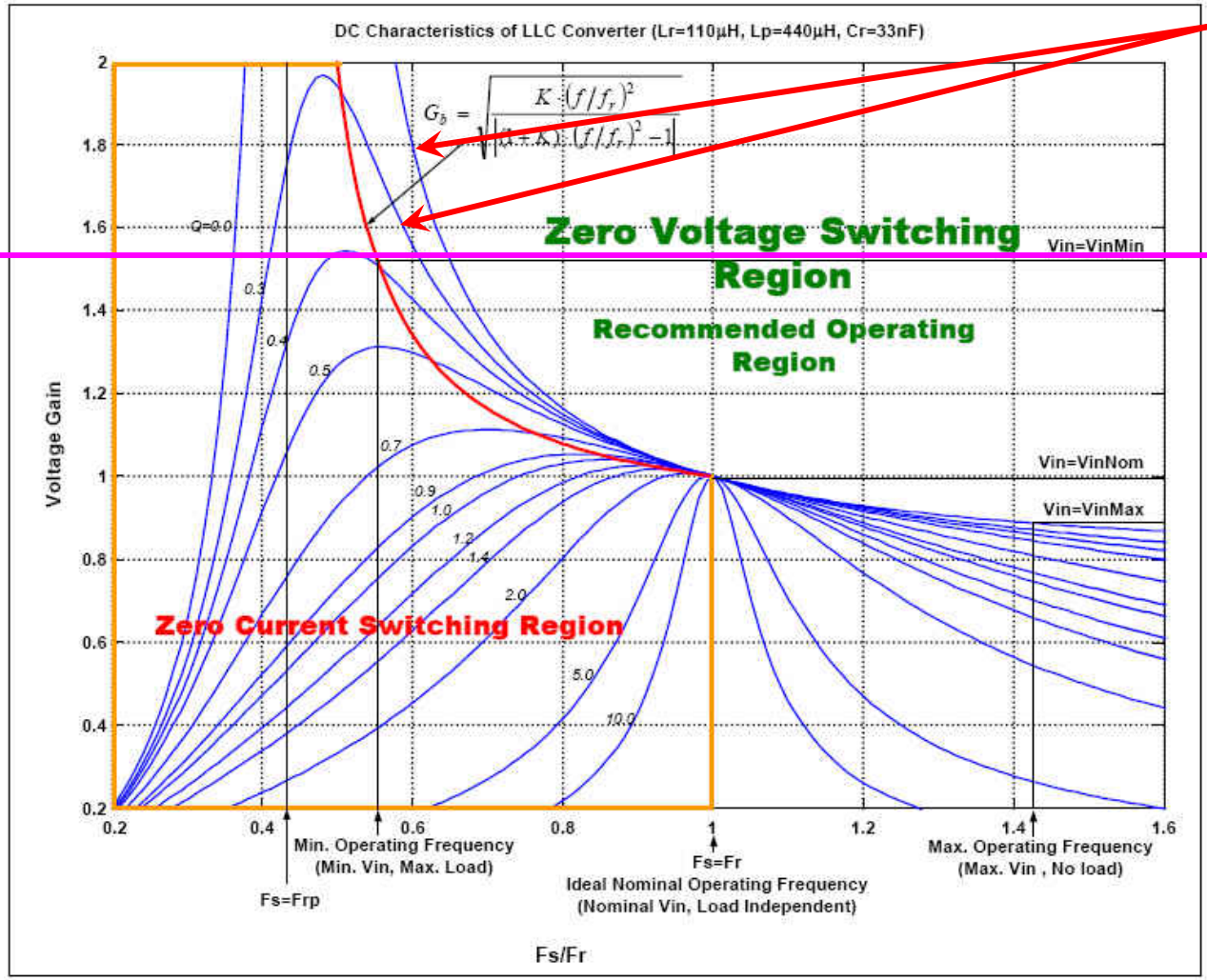
版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

Q值的讨论

满足Gmax的Q值有很多

Gmax



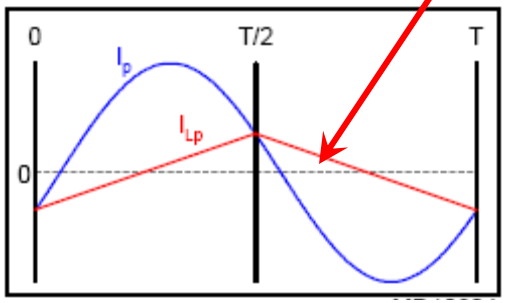
版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

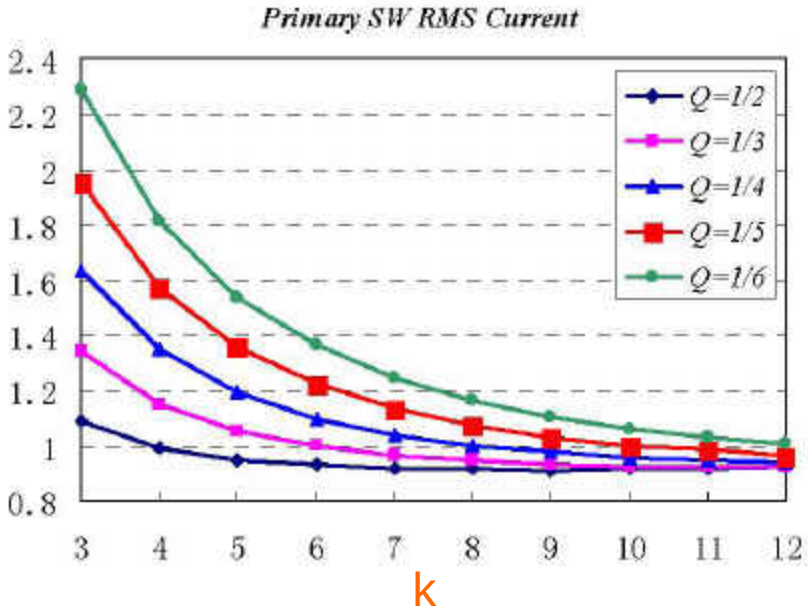
Q对初级电流的影响

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

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



K值固定后，在保证ZVS的条件下尽量选用大的Q值



版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

再看变量

$$|G_{max}|=\frac{k*(x)^2}{\sqrt{\{(1+k)*(x)^2-1\}^2+\{Qk(x)*[(x)^2-1]\}^2}}$$

已知量

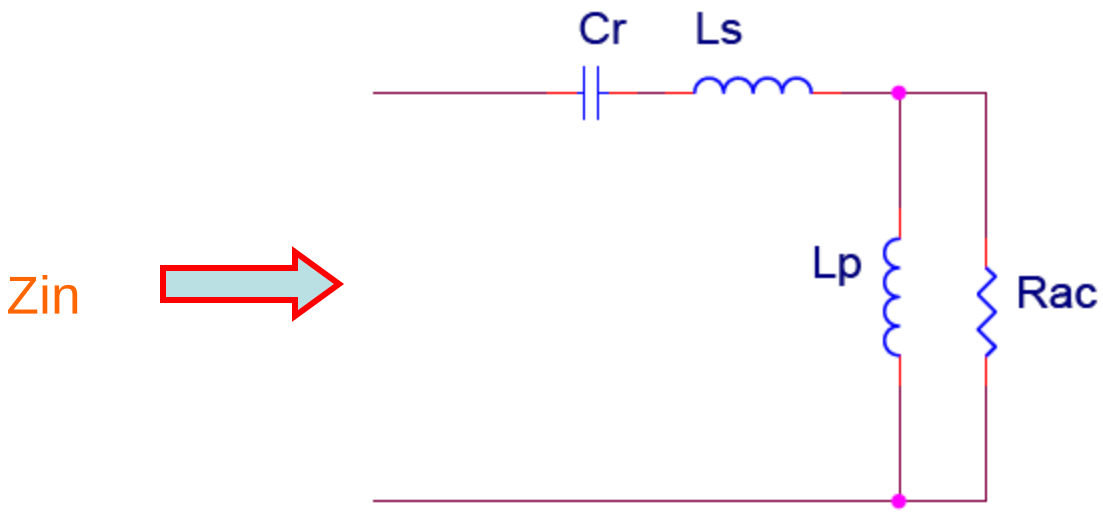
仍有Q, x 为未知量，需要新的条件才能解出Q值，从而确定Cr, Lr, Lm

从阻抗想办法

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC的阻抗特性



$$Zin = \frac{1}{sCr} + sLr + (sLp \,//\, Rac)$$

$$= Zo * \{Q * \frac{x^2k^2}{1+x^2k^2Q^2} + j[x - \frac{1}{x} + \frac{xk}{1+x^2k^2Q^2}]\}$$

$$x = \frac{f}{fr}$$

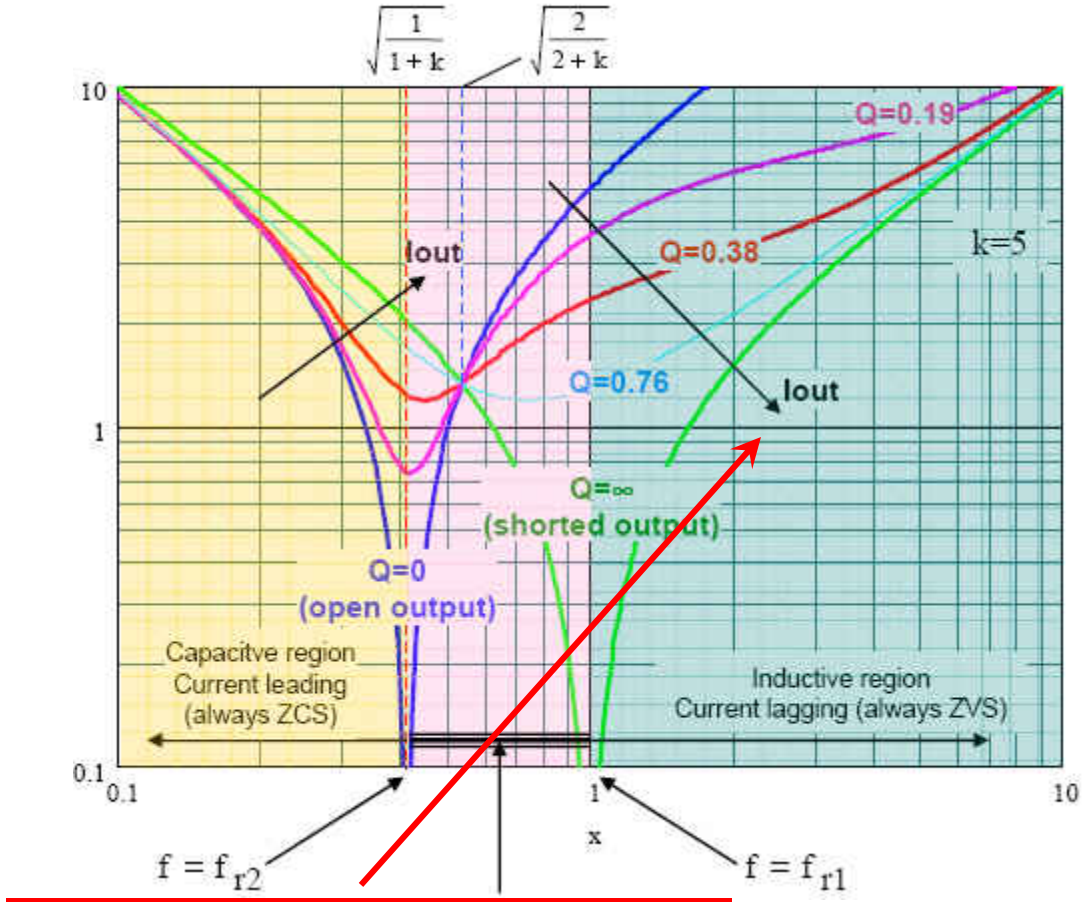
$$k = \frac{Lp}{Ls}$$

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

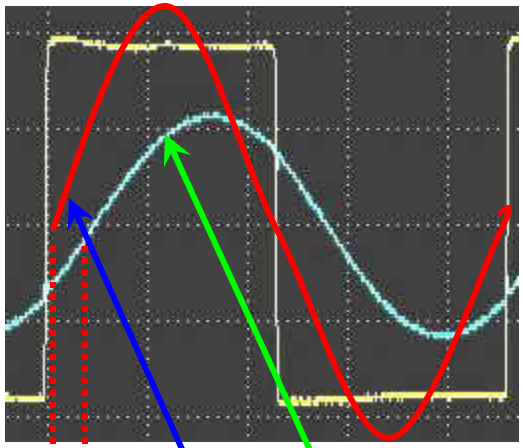
版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC的输入阻抗



ZVS的条件:电流落后于电压，即Zin为感性——频率增加，阻抗增加



电压波形

电流波形

Ø

相位差Ø为0是感性容性的分界线

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC的阻抗特性

虚部为零，是感性容性的分界线，由此条件得到

$$Zin = Zo * \left(Q * \frac{x^2 k^2}{1 + x^2 k^2 Q^2} + j\left[x - \frac{1}{x} + \frac{xk}{1 + x^2 k^2 Q^2} \right] \right)$$

$$x - \frac{1}{x} + \frac{xk}{1 + x^2 k^2 Q^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad Q_{\max}(x) = \sqrt{\frac{1}{k(1 - x^2)} - \frac{1}{(kx)^2}}$$

再看增益公式，把Qmax(x)带入公式，可求出x，再得到Qmax，从而得到Cr, Lr, Lm；令Q=0得空载工作频率

$$|G_{\max}| = \frac{k * (x)^2}{\sqrt{\{(1+k) * (x)^2 - 1\}^2 + \{Q * k * (x) * [(x)^2 - 1]\}^2}}$$

已知量　　代换为x　　只有x是未知量

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

解求各参数

由最高输入电压时的增益(Gmin)和空载条件(Q=0)求解最高工作频率

$$|G_{min}| = \frac{k*(x)^2}{\sqrt{\{(1+k)*(x)^2-1\}^2+\{Qk(x)*[(x)^2-1]\}^2}}$$

已知量

令Q=0

$$|G_{min}| = \frac{k*(x)^2}{(1+k)*(x)^2-1}$$

只有x是未知量

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

结果

$$f_{min} = \frac{f_r}{\sqrt{1+k(1-\frac{1}{G_{max}^{\ 2}})}} \qquad f_{max} = \frac{f_r}{\sqrt{1+k(1-\frac{1}{G_{min}})}}$$

$$Q = 0.95Q_{max} = \frac{0.95}{k*G_{max}} * \sqrt{k+\frac{G_{max}^{\ 2}}{G_{max}^{\ 2}-1}}$$

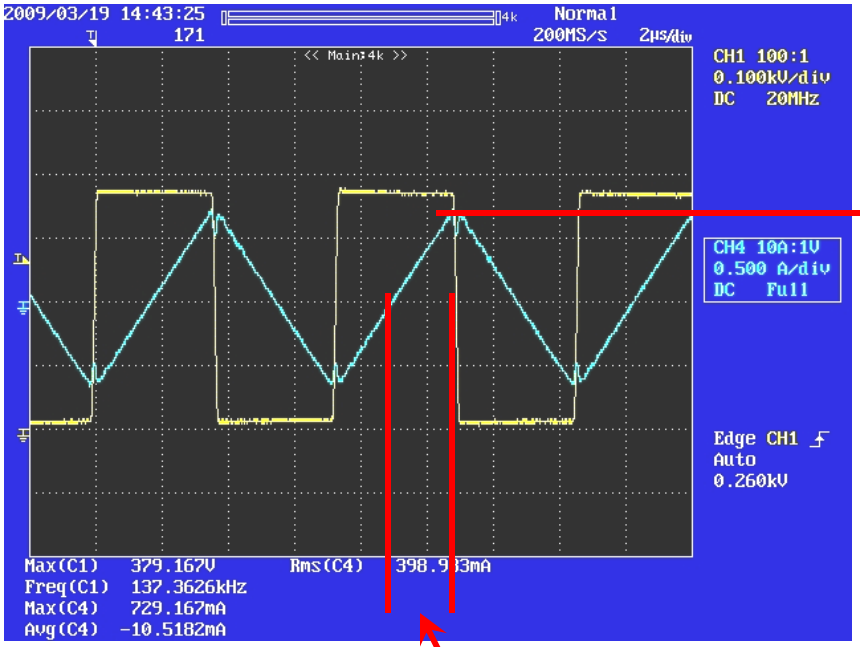
$$L_s = \frac{Q*R_{AC}}{2\pi f_r} \qquad C_r = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * Q}$$

$$L_p = k * L_s$$

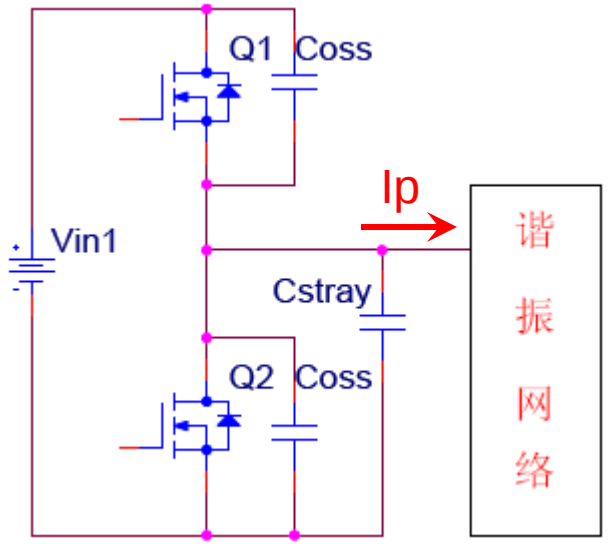
版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

ZVS的另一个限制



Im



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

保证ZVS的Ip

$$\mathrm{Im} = \frac{V_{inMax}}{L_s + L_p} * \frac{T_{\min}}{4}$$

$$= \frac{V_{inMax}}{4 f_{\max} * (L_s + L_p)}$$

输入电压最高时的Im

核算Im>Ip，不满足重选Q

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

归一化的计算步骤

1. 确定输入输出指标
2. 选择谐振频率和选择操作区域
3. 计算变压器变比和谐振元件值
4. 计算功率器件电压电流应力
5. 选择器件和变压器设计

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

1. 输入输出指标

输入电压范围： V_{inMin}=250V, V_{inMax}=420V

额定输入电压：V_{inNom}=400VDC

输出电压电流（最大值）：24V/10A, 12V/4A

输出功率：P_o=24×10＋12×4＝288W

2. 选择谐振频率和工作区域

谐振频率fr=100KHz

额定输入输出时电源工作在fr

3. 计算变压器变比和谐振元件值

3.1 理论变比

$$n=\frac{\frac{V_{inNom}}{2}}{V_o+V_D}=\frac{\frac{400}{2}}{24+0.7}=8.1$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

3.2 最高、最低输入电压的增益

$$G_{\min} = 2n * \frac{(Vo + Vd)}{V_{inMax}} = 2 * 8.1 * \frac{(24 + 0.7)}{420} = 0.952$$

$$G_{\max} = 2n * \frac{(Vo + Vd)}{V_{inMin}} = 2 * 8.1 * \frac{(24 + 0.7)}{250} = 1.6$$

3.3 计算等效为24V输出的负载电阻和反射电阻

$$R_L = \frac{V_O^2}{P_O} = \frac{24^2}{288} = 2\Omega$$

$$R_{AC} = n^2 \frac{8}{\pi^2} R_L = 8.1^2 * \frac{8}{\pi^2} * 2 = 106.5$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

3.4 取k=3

3.5 计算Q,fmin,fmax,Ls,Lp,Cr

$$Q=\frac{0.95}{k*G_{\max}}*\sqrt{k+\frac{G_{\max}{}^{2}}{G_{\max}{}^{2}-1}}=\frac{0.95}{3*1.6}*\sqrt{3+\frac{1.6^{2}}{1.6^{2}-1}}=0.426$$

$$f_{\min}=\frac{f_r}{\sqrt{1+k(1-\frac{1}{G_{\max}{}^{2}})}}=\frac{100}{\sqrt{1+3(1-\frac{1}{1.6^{2}})}}=59.5KHz$$

$$f_{\max}=\frac{f_r}{\sqrt{1+k(1-\frac{1}{G_{\min}})}}=\frac{100}{\sqrt{1+3(1-\frac{1}{0.952})}}=108.5KHz$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

$$C_r = \frac{1}{2\pi * f_r * R_{AC} * Q} = \frac{1}{2\pi * 100 * 106.5 * 0.426} = 35nF$$

$$L_s = \frac{Q * R_{AC}}{2\pi f_r} = \frac{0.426 * 106.5}{2\pi * 100} = 72uH$$

$$L_p = k * L_r = 3 * 72 = 216uH$$

3.6 核算Im>Ip

$$\mathrm{Im} = \frac{V_{inMax}}{4 f_{\max *} (L_r + L_p)} = \frac{420}{4 * 108.5 * (72 + 216)} = 3.36A$$

$$I_p = (2C_{oss} + C_{stray}) \frac{V_{in}}{T_d} = 500 * 10^{-12} * \frac{420}{200 * 10^{-9}} = 1.05A$$

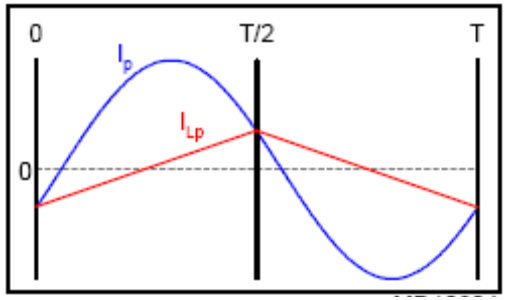
$\mathrm{Im} > I_p$ 如不满足需降低Q或增大Lr+Lp

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

4. 计算功率器件电压电流应力



4.1 初级电流有效值

$$I_{rms}=\frac{V_O}{8nR_L}\sqrt{\frac{2n^4R_L^2}{L_m^2 f_r^2}+8\pi^2}=1.6A$$

4.2 MOSFET电压,电流最大值,电流有效值

$$V_{Mos}=V_{inMax}=420V$$

$$I_{Max_Mos}=I_{OCP}$$

$$I_{rms_Mos}=\frac{I_{rms}}{\sqrt{2}}=\frac{1.6}{\sqrt{2}}=1.13A$$

$$P_{Conduct_loss}=I_{rms_Mos}{}^2R_{ds}=1.28R_{ds}$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

4.3 次级整流管电压,电流,损耗(24V输出）

$$V_{D_Max} = 2 * V_O = 2 * 24 = 48$$

$$I_{D_Avg} = \frac{I_o}{2} = \frac{10}{2} = 5A(24V)$$

$$P_{D_Conduct_loss} = V_{D_Conduct_Avg} * I_{D_Avg} = 0.7 * 5 = 3.5W$$

4.4 谐振电容电流有效值、最大电压

$$I_{Cr_rms} = I_{rms} = \frac{V_O}{8nR_L}\sqrt{\frac{2n^4 R_L^2}{L_m^2 f_r^2} + 8\pi^2} = 1.6A$$

$$V_{Cr_Max} \cong \frac{V_{in_Max}}{2} + \sqrt{2} * I_{rms_Max} * \frac{1}{2\pi f_r C_r} = \frac{420}{2} + \frac{I_{OCP}}{2\pi f_r C_r}$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

4.5 输出电容的电流有效值(f=fr,24V输出)

$$I_{Co_Rms}=\sqrt{\left(\frac{\pi I_o}{2\sqrt{2}}\right)^2-I_o^2}=\sqrt{\frac{\pi^2-8}{8}}I_o=2.32A$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

5. 选择器件和变压器设计

MOSFET: 满足20％裕量,电压500V，电流从发热和Coss考虑(保证高压时ZVS)

Cr: 满足RMS电流的要求，电压为计算值1.5倍左右

Co:满足RMS电流要求

D: 电压满足20％裕量;电流考虑到不平衡,取40％裕量，其余从发热考虑

变压器实际变比

$$n_{real} = n * \sqrt{\frac{Lr + Lp}{Lp}} = n * \sqrt{\frac{k+1}{k}} = 8.1 * \sqrt{\frac{3+1}{3}} = 9.35$$

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

实际计算步骤

初级最小匝数(EER40)

$$N_{P_Min}=\frac{n_{real}(V_o+V_d)}{2f_{\min}*\Delta B*A_e}=\frac{9.35(24+0.7)}{2*59.5*0.4*149}*10^3=32.5$$

选择次级匝数，计算初级匝数使其大于32.5T

N_{12}=2T; N_{24}=4T

Np=9.35*4=37.4>33

最终结果：

Np=37T

N_{12}=2T

N_{24}=4T

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

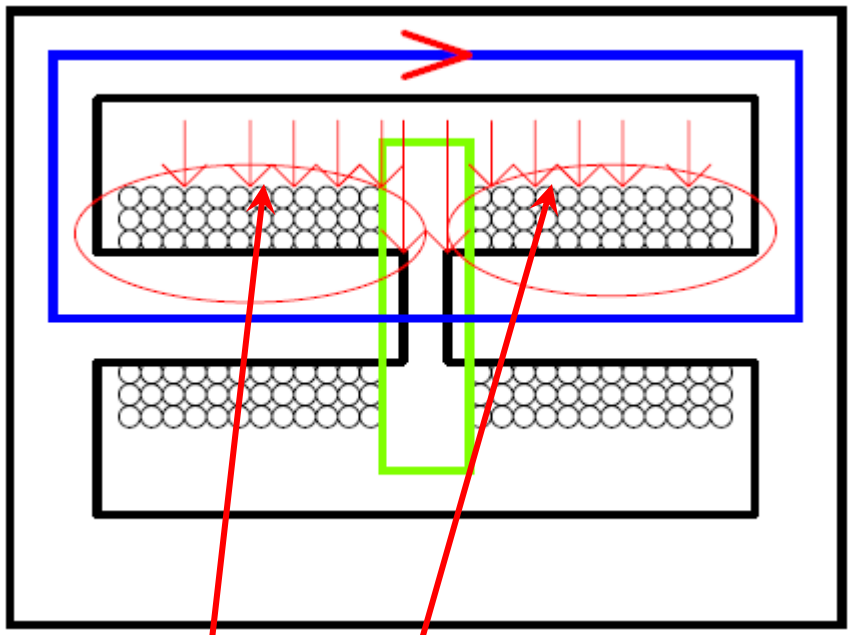
LLC的几个问题讨论

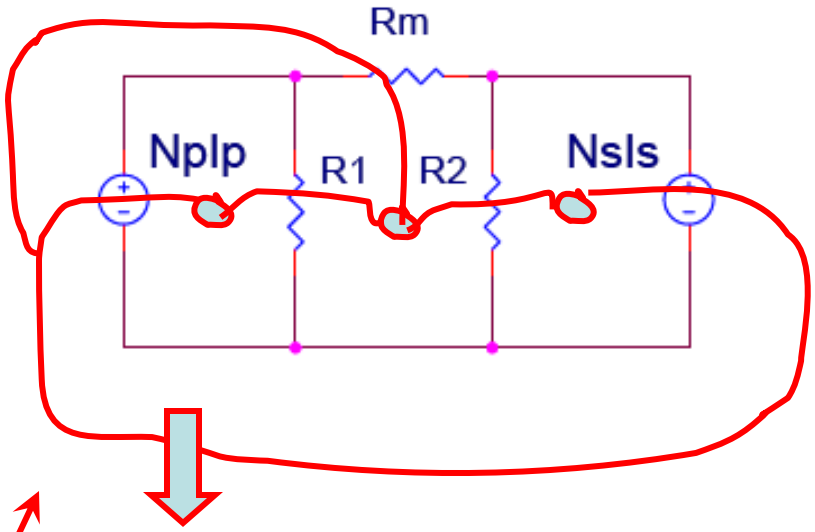
1. 变压器变比和结构
2. 电流不对称

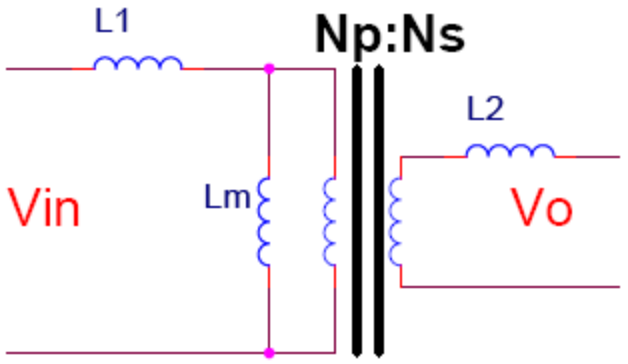
版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC变压器磁阻模型







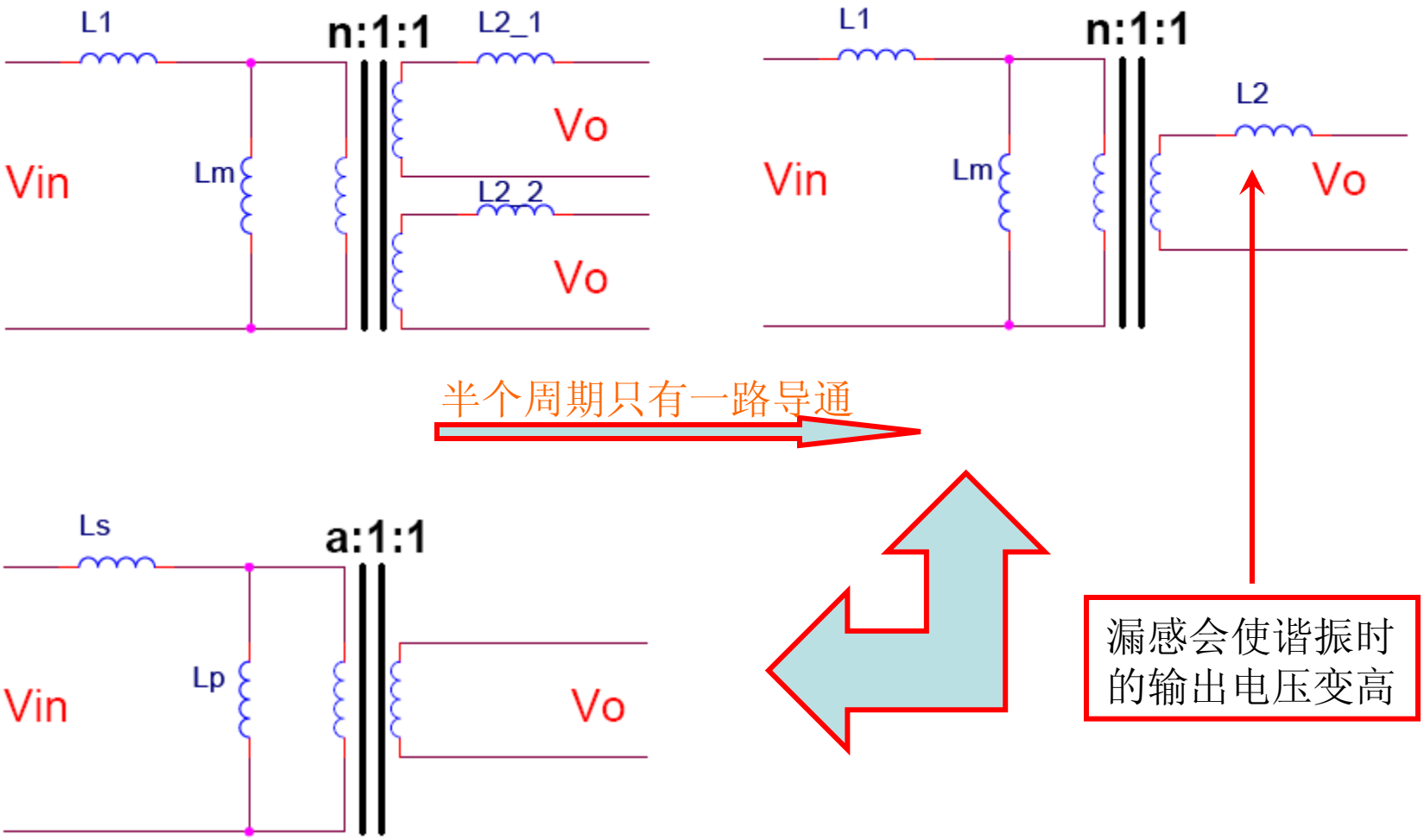
除了普通变压器的空气漏磁外,LLC变压器有新的漏磁路径，使漏感很大

磁电对偶关系得到电路模型

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

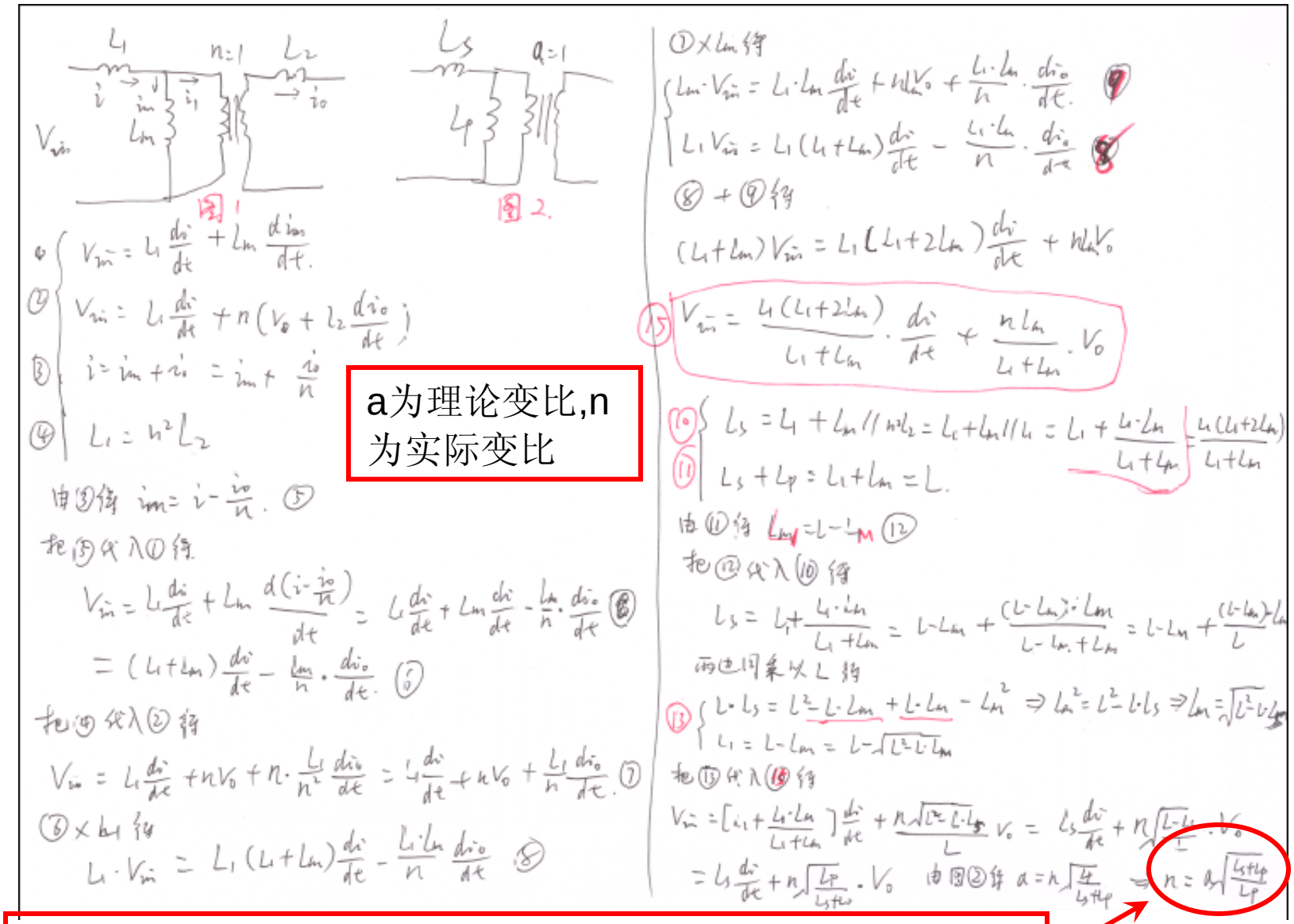
LLC变压器电路模型



版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

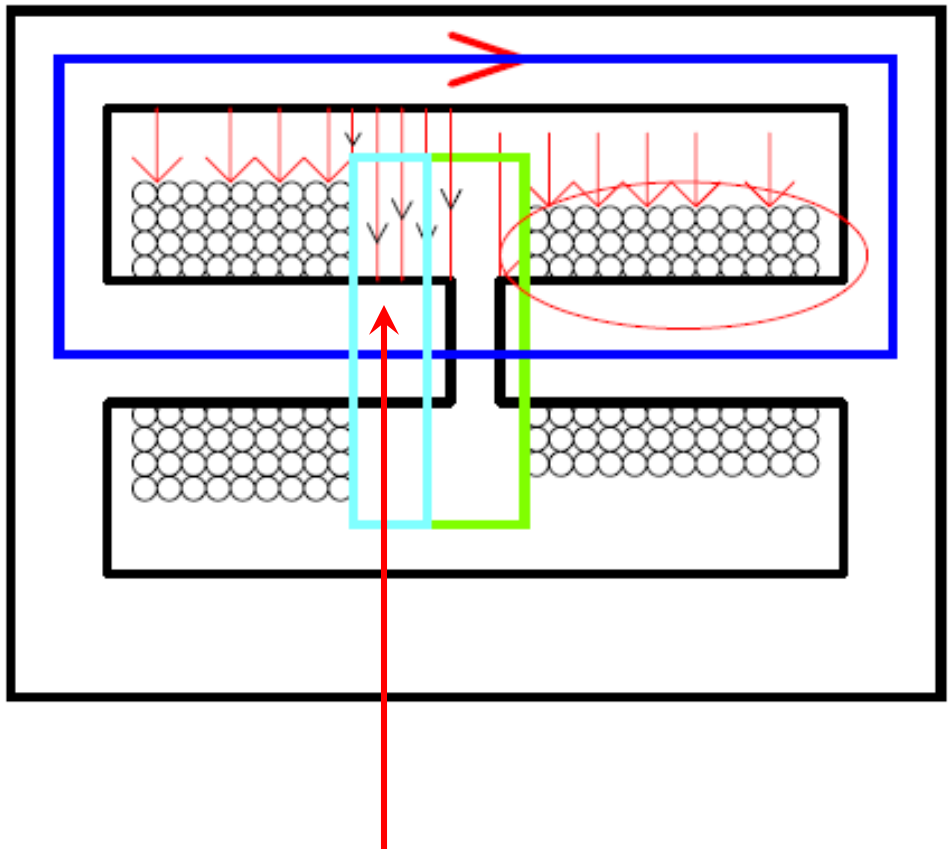
LLC变压器电路模型



版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

LLC变压器漏感的调整

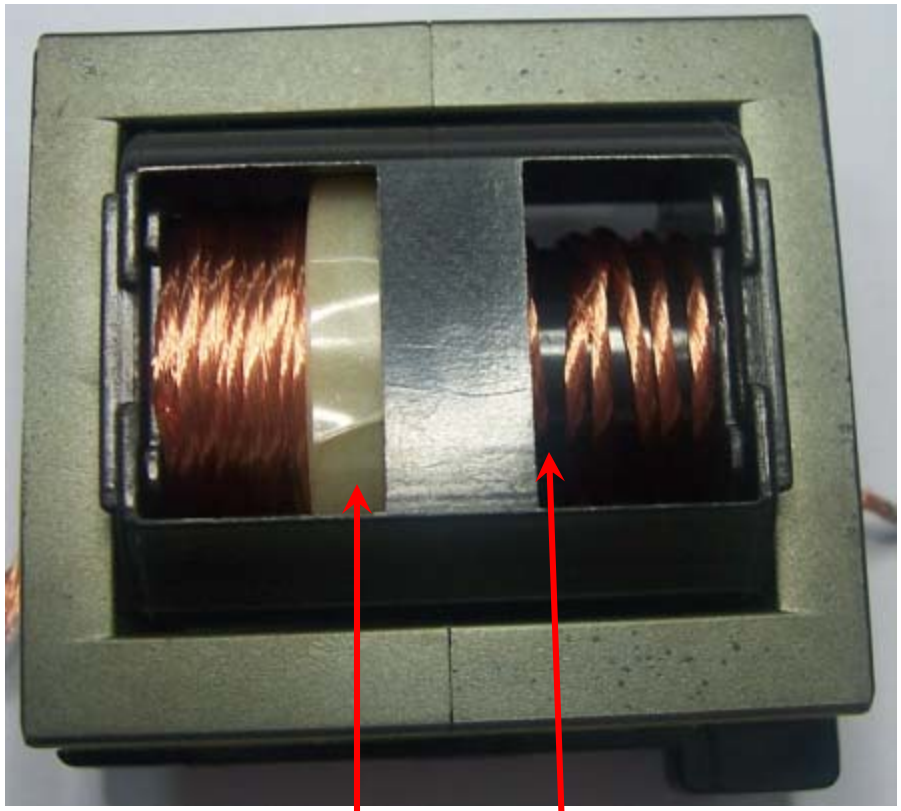


增加初次级的距离增加了漏感

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

一个变压器实测结果



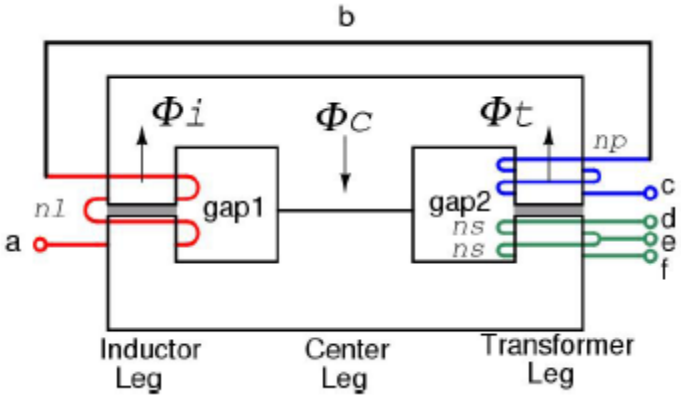
初次级都不加3.6mm档墙
Lm=680uH,Ls=123uH
在次级加3.6mm档墙
Lm=680uH,Ls=140uH

初级加3.6mm,次级不加3.6mm档墙
Lm=700uH,Ls=146uH
初级、次级都加3.6mm档墙
Lm=700uH,Ls=160uH

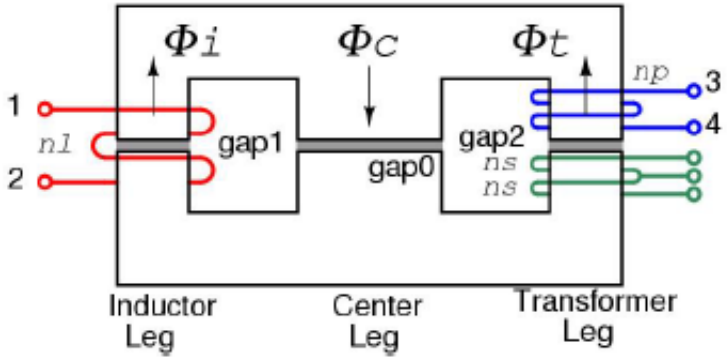
版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

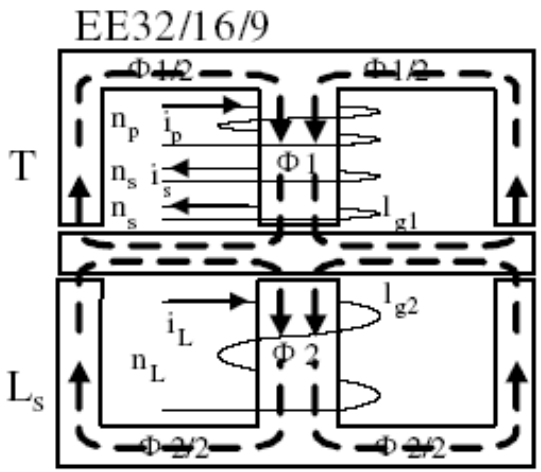
可能的变压器集成方式



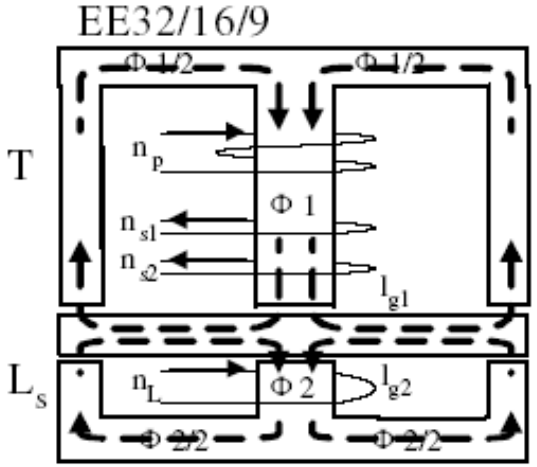
A



B



C

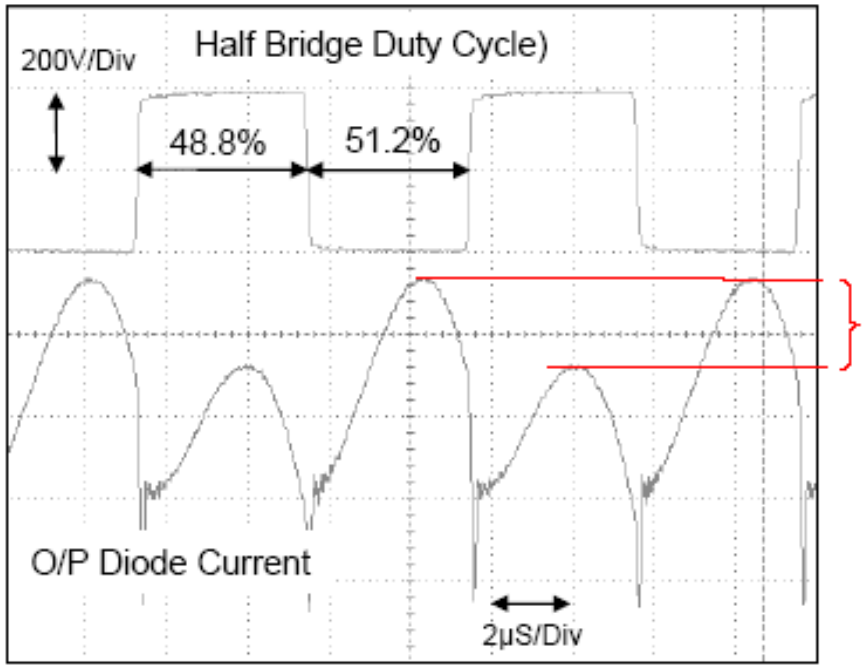


D

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

驱动不对称造成电流不对称



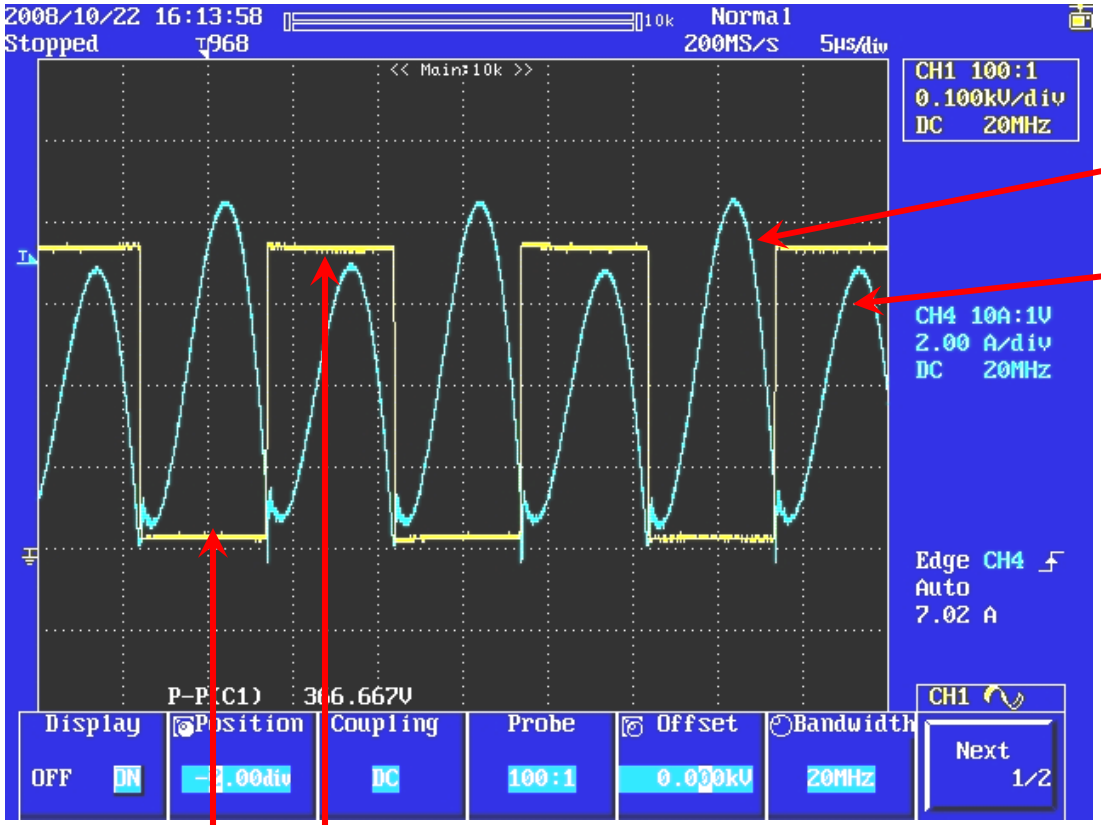
实际测量结果：

- 二极管经受2.4%的占空比失衡时，就会存在±20%的RMS电流失配
- 导致二极管过度设计

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

驱动对称就好了吗？



电流不平衡由正负半周的漏感不同引起

驱动几乎完全对称

双线并绕可以减少这种情况

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

一款新颖的控制芯片

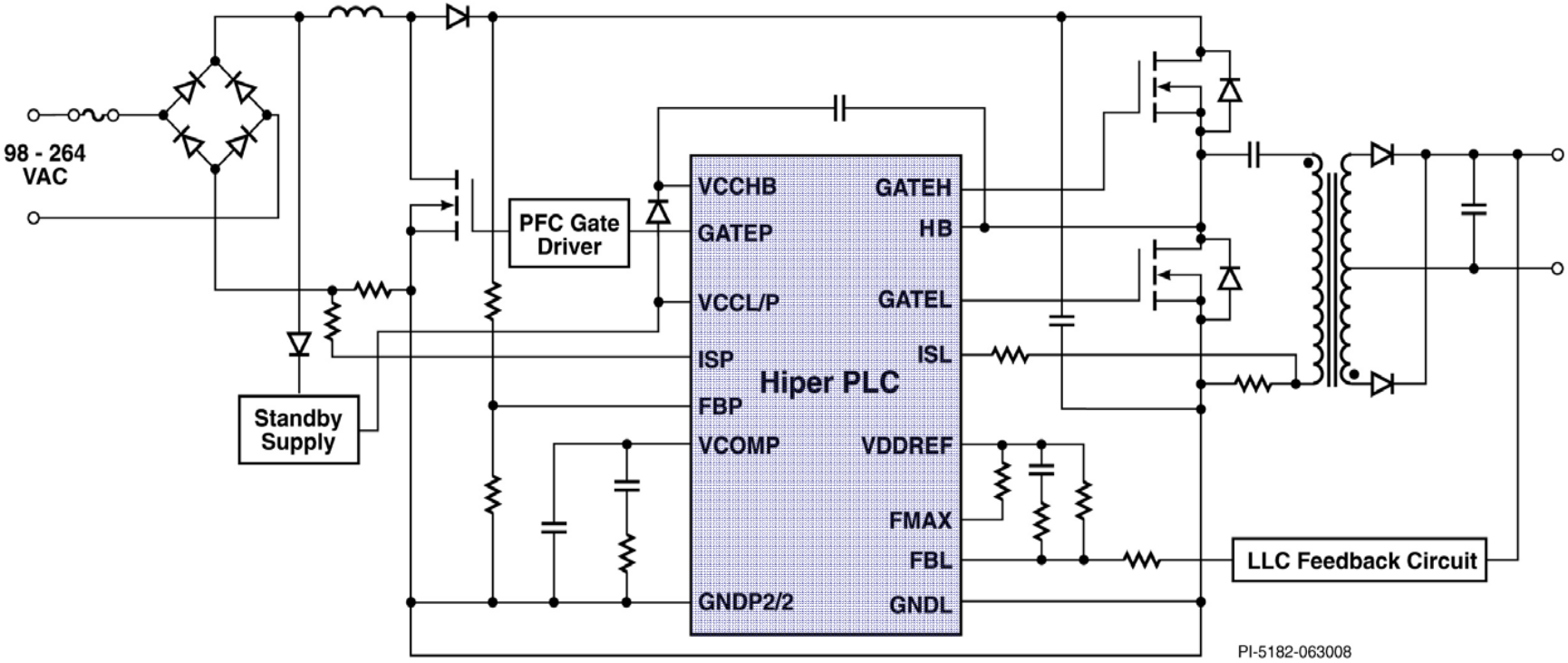


版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

HiperPLC：LCD TV主电源解决方案

- 集成度最高的LCD TV，LED路灯主电源解决方案
  - 集成了PFC、LLC控制器以及LLC半桥驱动器
- 非常适合150 W至600 W的功率应用



版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

主要特点及优点

1. 连续模式PFC，Doff 控制无需检测输入波形

   CCM模式降低了差模干扰和磁损，Doff控制减少了外部元件

2. PFC与LLC级之间的频率相位锁定

   避免差频干扰，纹波电流抵消降低了高压电解成本

3. PFC/LLC避免边缘冲突

   避免了互相干扰

4. 占空比匹配与严格限制的死区时间优化了LLC效率

   两相不平衡度小于1%

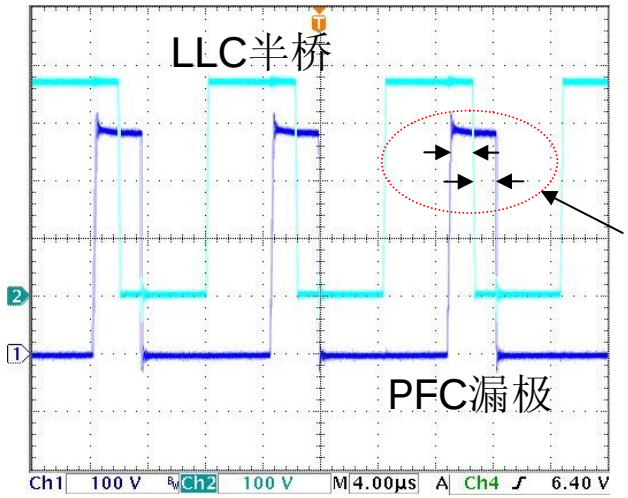
5. 集成了供电控制和各种保护功能

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

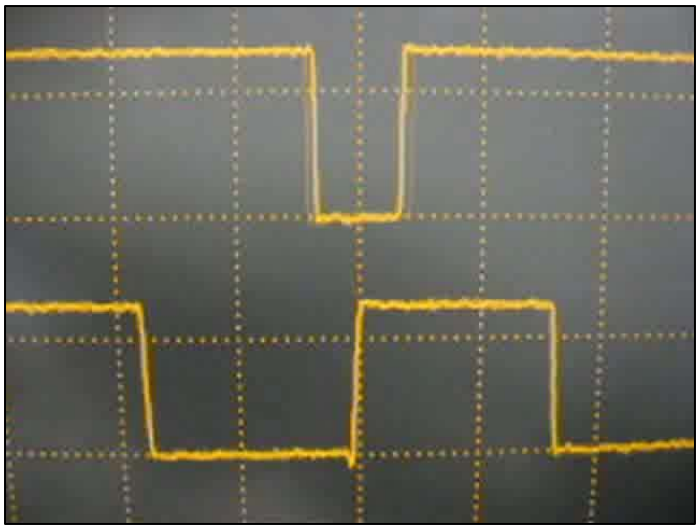
HiperPLC LLC/PFC同步可节省成本

- LLC与PFC之间无差频
- 纹波抵消
- 无内部边缘冲突
  - 边缘从不相交，这样可以降低噪声及互相干扰
- 简化单层电路板的布局



PFC围绕LLC边缘对称分布

HiperPLC – 显示LLC与PFC相位锁定



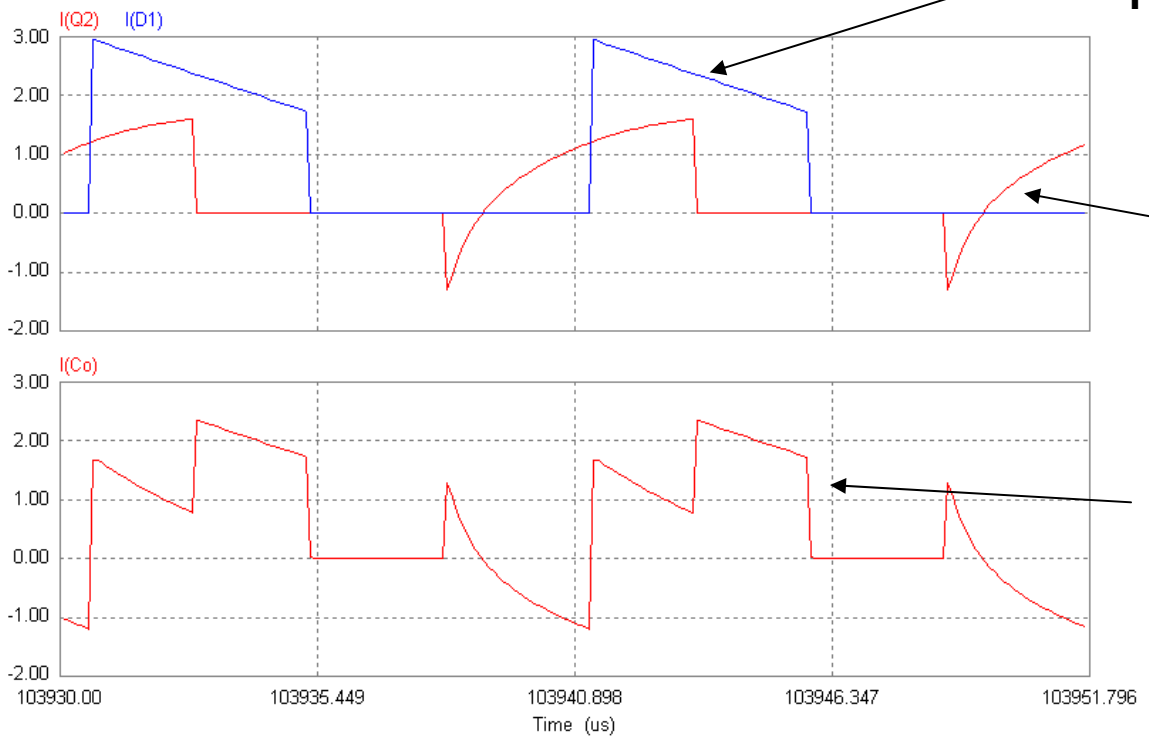
实测波形

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

PFC & LLC 仿真

纹波减少 (Vac(max), 接近正弦)



PFC 电流流入 PFC 输出电容

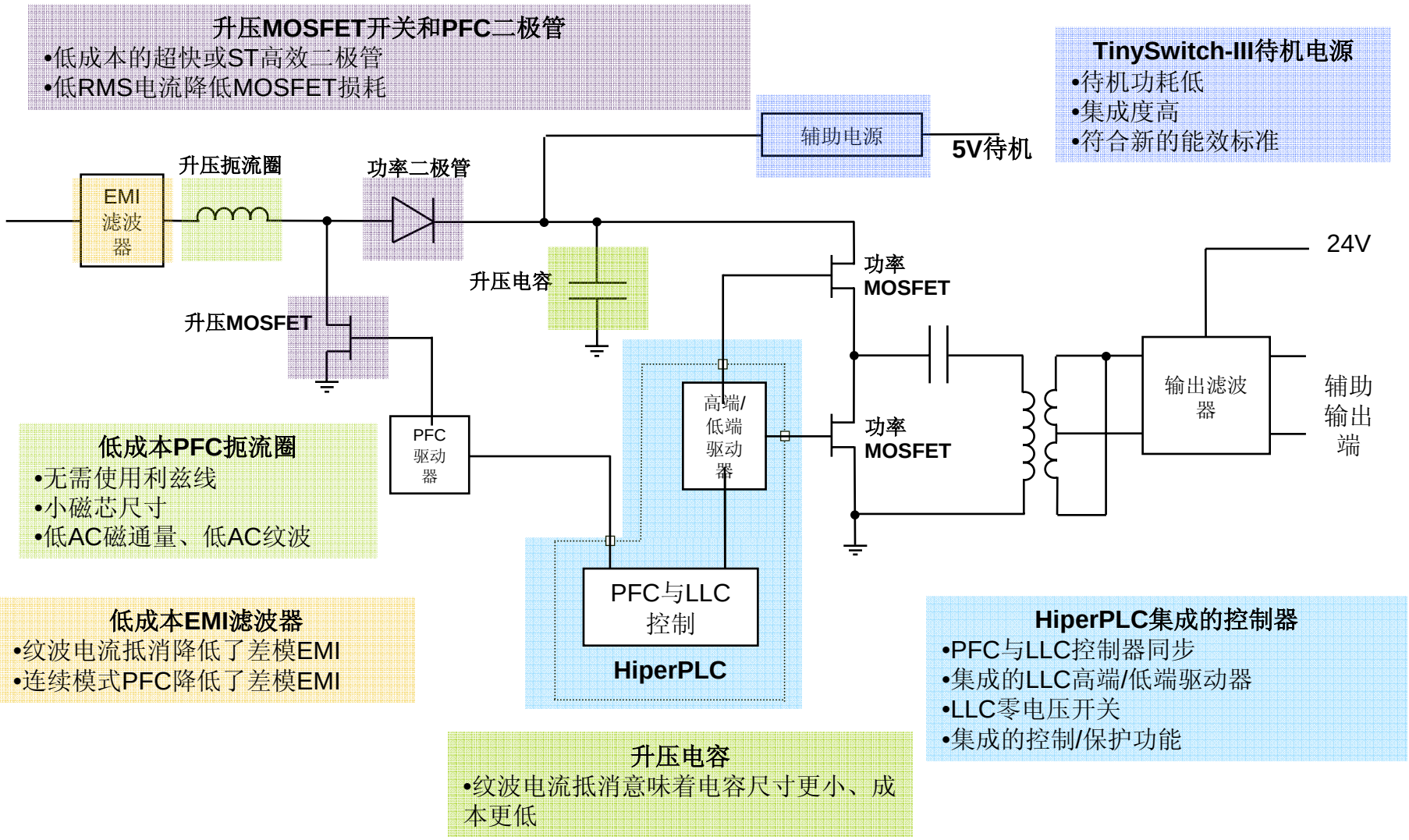
LLC 流出 PFC 输出电容

PFC 输出电容的电流减少 (电流抵消)

版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

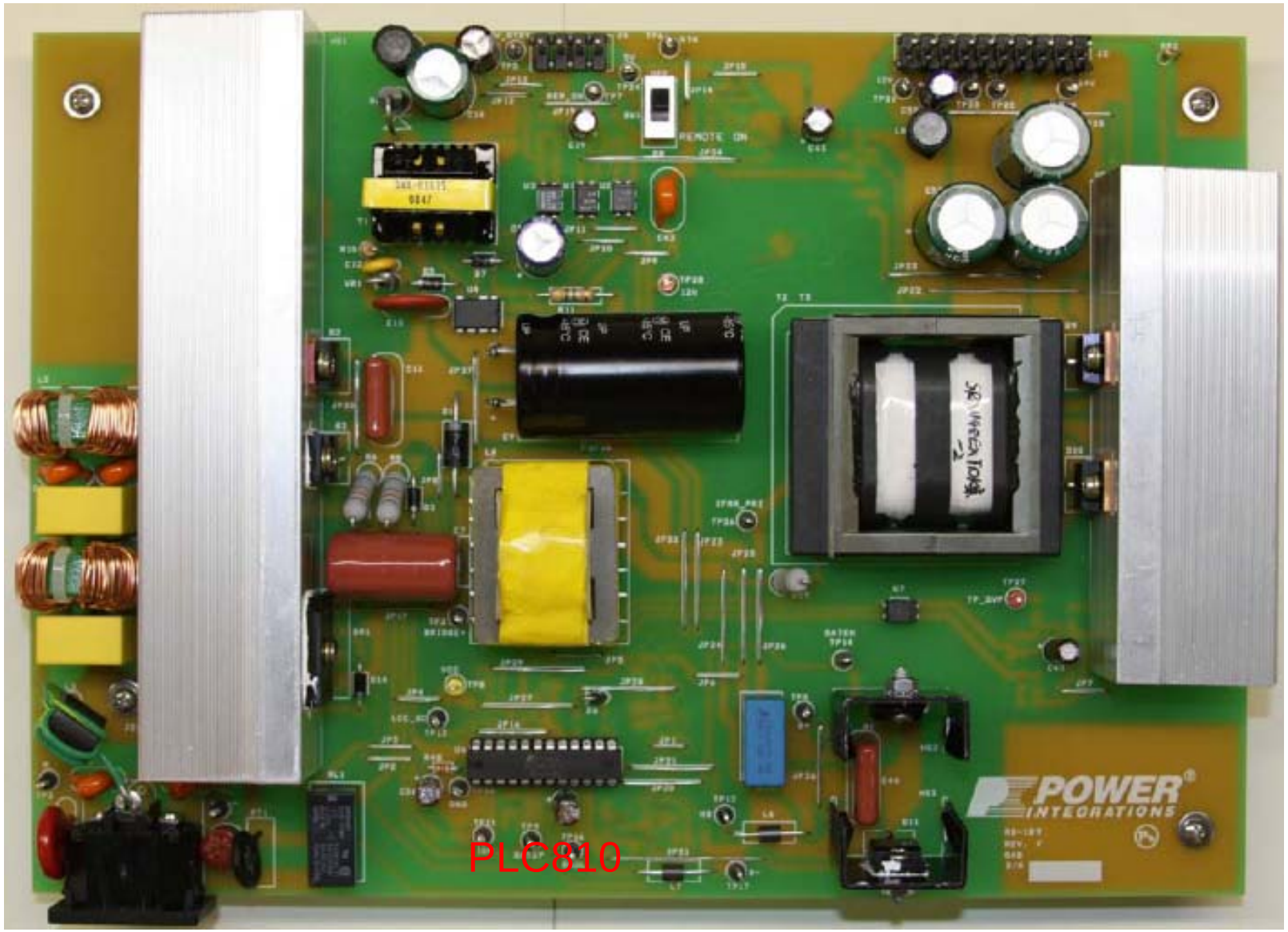
参考设计结构框图



版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！

www.21dianyuan.com

参考样板



版权：世纪电源网|作者：郭春明，未经允许不得转载！