

# 单级功率因数校正与 特殊功率因数校正

陈永真

辽宁工业大学

辽宁省锦州市士英街169号

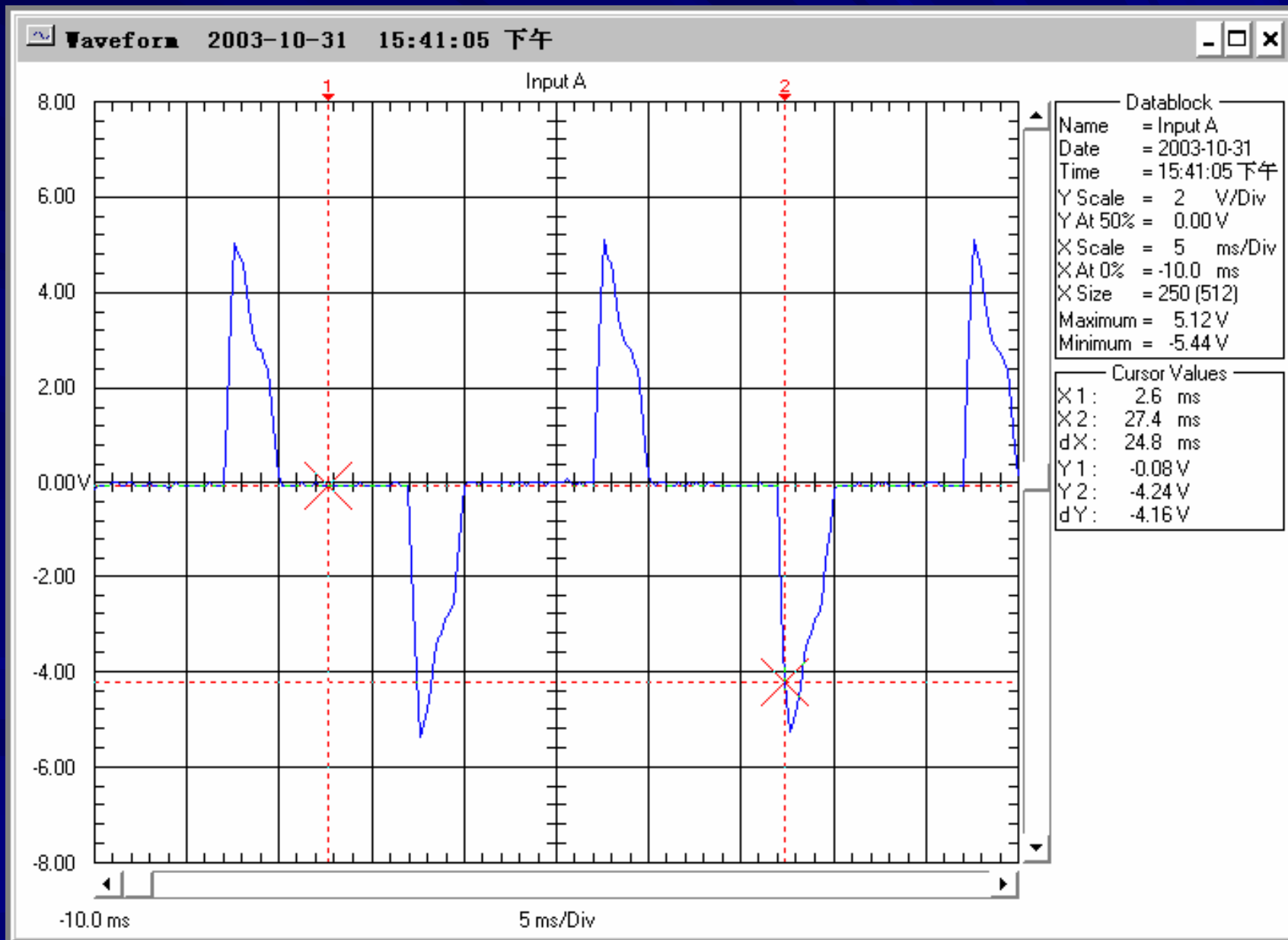
121001

[0416chenyongzhen@163.com](mailto:0416chenyongzhen@163.com)

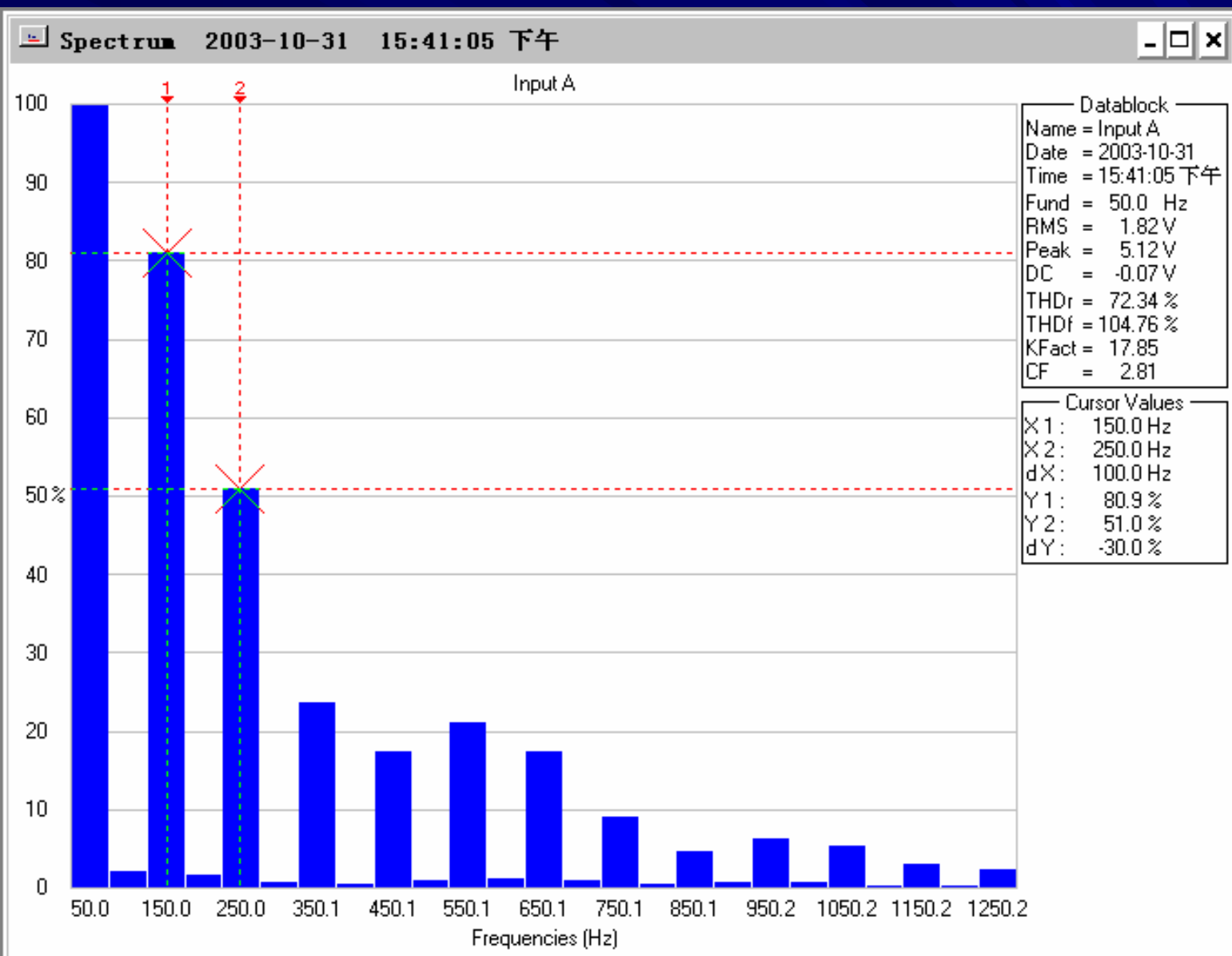
# 为什么要功率因数校正？

- 常规的开关电源采用**AC220V**直接整流，电容输入式滤波方式，这样做电路是最简单的。
- 所带来的问题是：输入电流不再是正弦波。与此同时，功率因数大幅度的降低，约**0.6**。
- 所带来的波形畸变将影响电网供电质量与安全。

# 电容输入式滤波的电网侧电流波形



# 电容输入滤波的谐波分析



Datablock

Name = Input A  
Date = 2003-10-31  
Time = 15:41:05 下午  
Fund = 50.0 Hz  
RMS = 1.82 V  
Peak = 5.12 V  
DC = -0.07 V  
THDr = 72.34 %  
THDf = 104.76 %  
KFact = 17.85  
CF = 2.81

Cursor Values

X1: 150.0 Hz  
X2: 250.0 Hz  
dX: 100.0 Hz  
Y1: 80.9 %  
Y2: 51.0 %  
dY: -30.0 %

Cursor Values

X1: 350.1 Hz  
X2: 450.1 Hz  
dX: 100.0 Hz  
Y1: 23.5 %  
Y2: 17.4 %  
dY: -6.1 %

Cursor Values

X1: 350.1 Hz  
X2: 450.1 Hz  
dX: 100.0 Hz  
Y1: 23.5 %  
Y2: 17.4 %  
dY: -6.1 %

Cursor Values

X1: 550.1 Hz  
X2: 650.1 Hz  
dX: 100.0 Hz  
Y1: 21.1 %  
Y2: 17.4 %  
dY: -3.7 %

Cursor Values

X1: 750.1 Hz  
X2: 850.1 Hz  
dX: 100.0 Hz  
Y1: 9.0 %  
Y2: 4.7 %  
dY: -4.3 %

Cursor Values

X1: 950.2 Hz  
X2: 1050.2 Hz  
dX: 100.0 Hz  
Y1: 6.2 %  
Y2: 5.3 %  
dY: -1.0 %

# 220V直接整流电容输入式滤波的功率因数

- 一般的220V直接整流电容输入式滤波的功率因数约0.6
- 3次、5次、7次、9次、11次、13次、15次、17次、19次、21次的谐波分量为基波的81%、51%、23.3%、17.4%、21.1%、17.4%、9.0%、4.7%、6.2%、5.3%
- 波峰系数为2.81，其电流峰值是基波有功电流有效值的4.68倍。

采用功率因数校正后可以大大改善功率因数和  
谐波电流

# 临界电流型功率因数校正后的相关波形

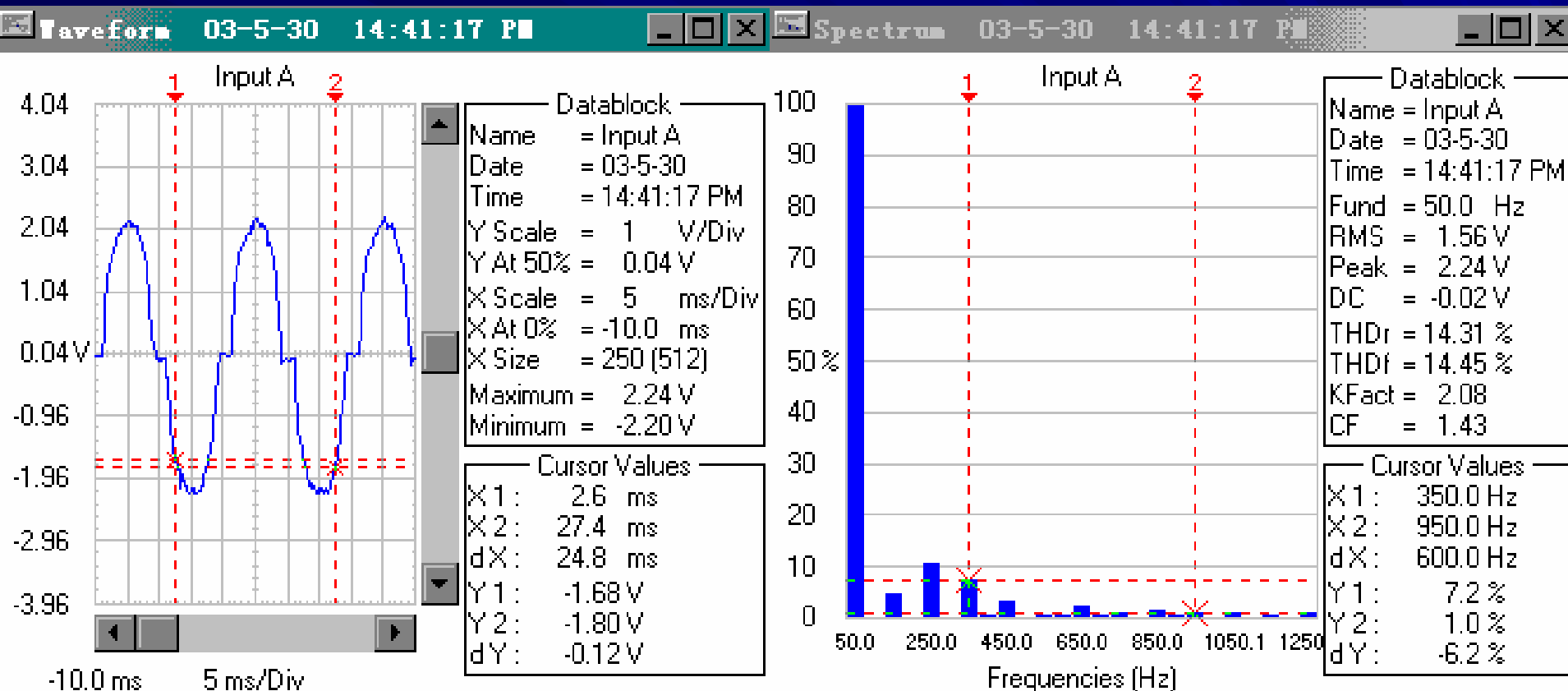


图 3 输入电流波形及谐波分析

# 临界电流型功率因数校正后

- 功率因数可以达到**0.9**以上
- 最高幅值的谐波也不大于基波的**10%**
- 总谐波可以控制在基波的**15%**以下
- 采用电流连续型可以将功率因数做的更高



# 开关电源加入功率因数校正带来的 困扰

- 电路变得复杂
- 成本提高很多，这对习惯了常规开关电源的用户来说是很难接受的
- 如何降低添加功率因数校正部分的成本将是很多应用领域不需考虑的
- 这也是荧光灯电子镇流器不能采用功率因数校正的最主要的原因

# 降低开关电源加入功率因数校正附加成本的有效方法——单级功率因数校正

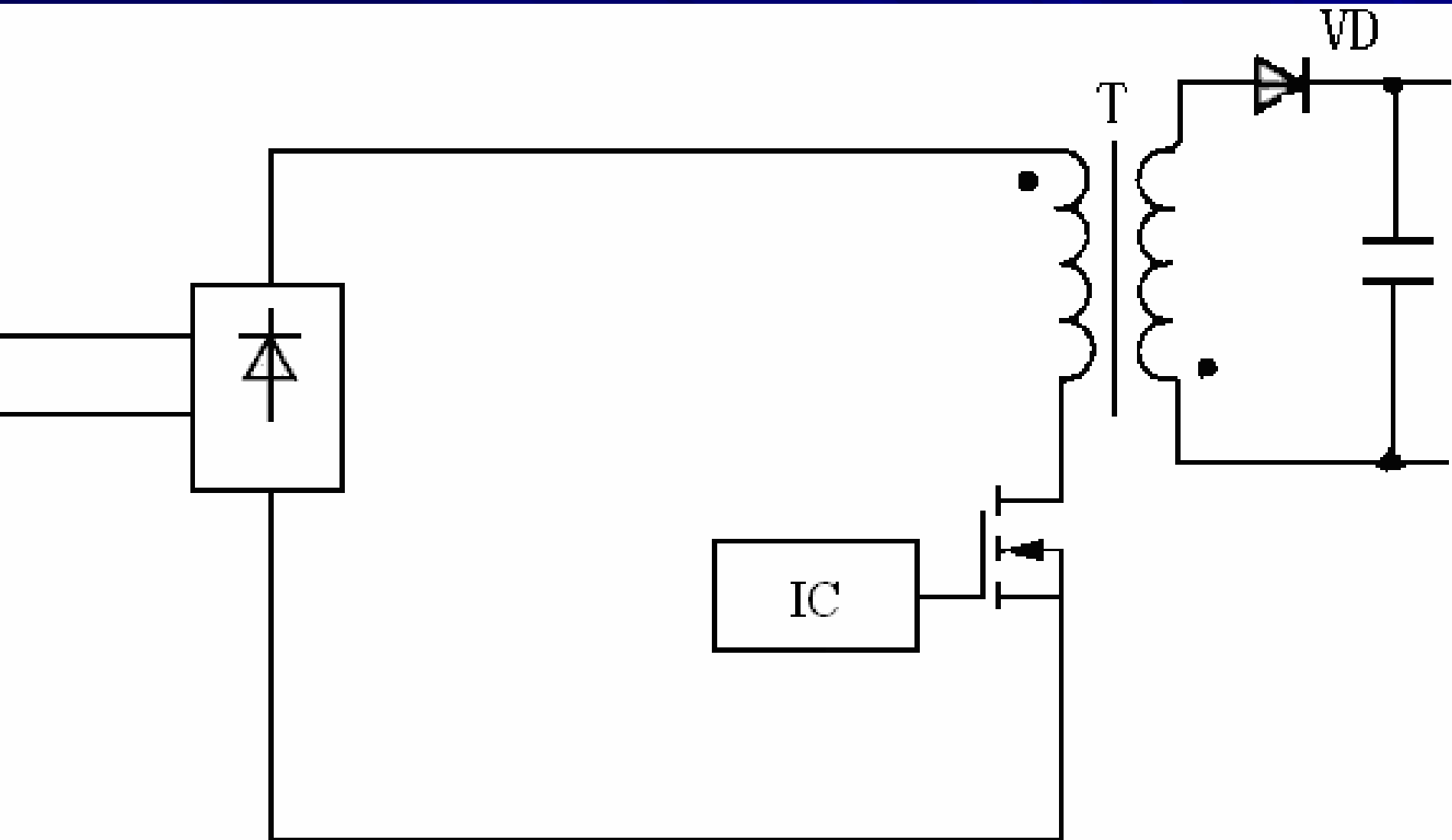
- 1 应用反激式变换器同时完成功率因数校正和**DC/DC**变换
- 2 将升压性功率因数校正电路与**DC/DC**变换器的电路重合部分合并，以减少器件的数量和电路成本

# 1、应用反激式开关电源 原理的单级功率 因数校正

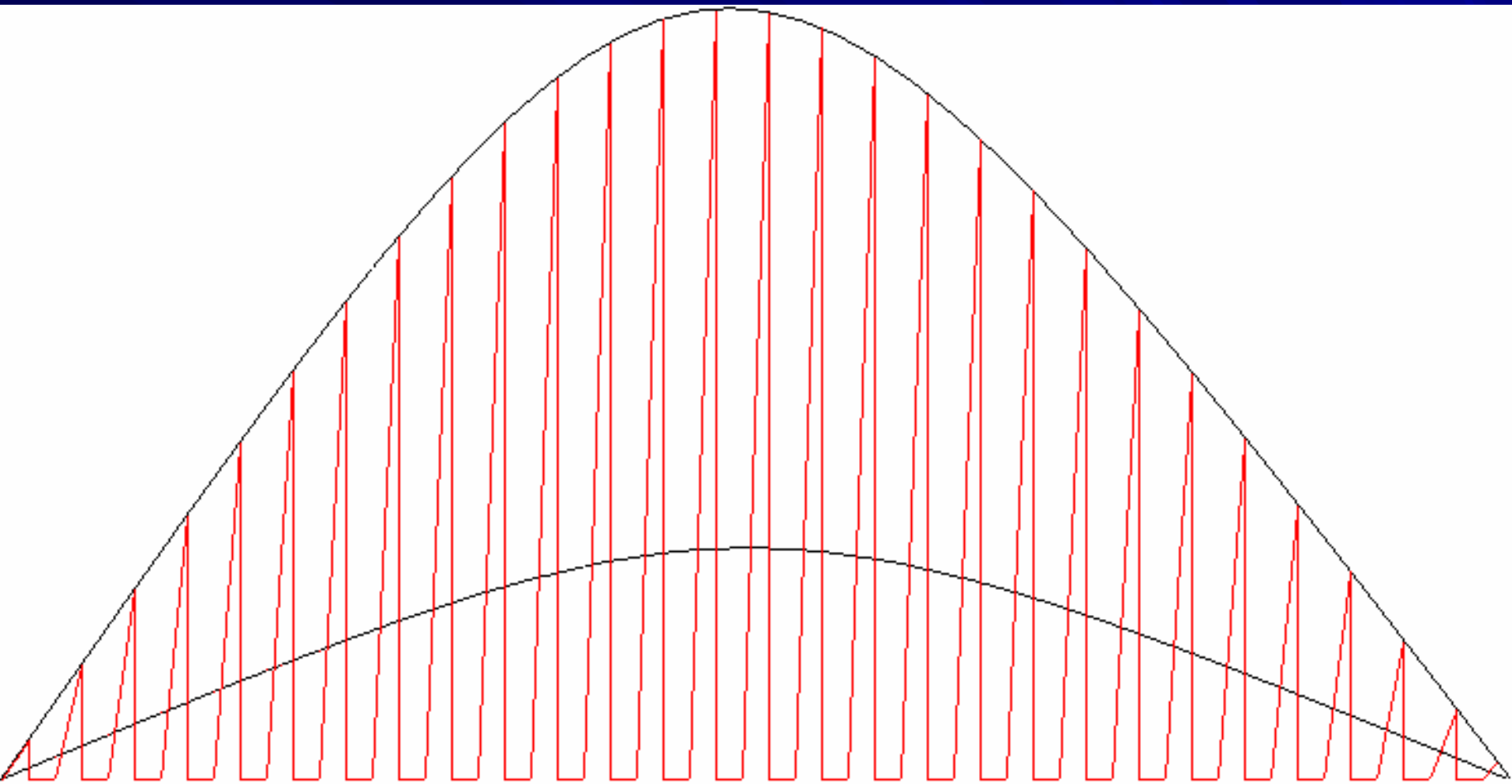
# 1.1 应用反激式变换器同时完成功率因数校正和DC/DC变换

- 基本思路：
- 利用反激式变换器在电流断续状态下电感电流峰值与电源电压成正比（开关管得导通时间固定）的特点获得与电源电压成正比的电感峰值电流。
- 如果整流输出不接滤波电容器则整流输出电压随电网电压正弦变化

# 应用反激式变换器的单级功率因数校正电路框图



# 电流断续型反激式变换器在正弦电压作用下的电感峰值电流和“平均电流”波形



$$u = U_m \cdot |\sin \omega t|$$

# 对应的公式

$$u = U_m \cdot |\sin \omega t|$$

$$i_{pm}(t) = T_{on} \cdot U_m \cdot |\sin \omega t| / L_p$$

$$A(t) = L_p \cdot i_{pmax}^2(t) \cdot \eta / 2$$

$$P_0 = \eta \cdot 2f_1 \left( \sum L_p \cdot i_j^2 / 2 \right)$$

$$i_j = \sqrt{2U} \sin(2\pi f_1 \cdot j T_m) \cdot T_m \cdot D / L_p$$

$$I_m = 4P_0 / (\sqrt{2U} \cdot D_{max} \cdot \eta)$$

# 从波形和数学推导可以看到：

- 将每一个开关周期的电感电流波形“平滑”后，可以得到这样“平滑”后的电流波形的组合称为“正弦”波电流波形。
- 这样，就获得到与电网电压波形相同、相位相同的电流波形，从而获得“1”的功率因数。



# 应用反激式变换器的单级功率因数校正电路的特点

- 由于电路需要保证交流输入电流正弦化，不随瞬态负载变化，因此控制电路对瞬态变化的负载电流不应敏感，应表现得迟钝。
- 控制电路应首先满足功率因数校正的要求，输出稳压则是在满足功率因数的基础上获得满足。

# 常规功率因数校正出数电容器的作用

- 常规功率因数校正的输出有一个平滑电容器，作为储能以缓冲变化的交流输入与平稳得直流输出的矛盾。
- 不仅如此，后级的**DC/DC**变换器还具有电压调节能力，这就保证了开关电源输出电压的平稳

# 存在的问题

- 由于平滑电容器接在整个电路的输出端，中间缓冲的电容器不再存在，输出电压的平滑完全落在输出平滑电容器上。
- 如果这个平滑电容器的电容量不是十分大，就可能造成输出电压纹波过大。
- 为了获得 $1\text{V}_{\text{p-p}}$ 的纹波电压，需要约 $1600\ \mu\text{F}/\text{A}$ 的电容量，如果输出电流是 $10\text{A}$ ，则需要 $16000\ \mu\text{F}$ 的电容量。

# 存在的问题

- 然而，即使采用相对常规开关电源而采用超大电容量的平滑电容器，所获得的**1Vp-p**的纹波电压峰值，在绝大多数的应用中也是绝对不允许的。
- 因此这种单级功率因数校正方式的应用是有问题的。

# 使用领域

- 如果在输出端并联有可以恒定电压的电池（如用于不停电供电电源功能）可以“消除”电网频率倍频的纹波电压。
- 负载对电源电压变化不敏感。如负载自身带有稳压电源，如笔记本电脑。

# 笔记本电脑电源适配器

- **ON Semi的NCP1651控制的90W笔记本电脑电源适配器的设计实例**
- **参见ON Semi的TND317-D.pdf**

# 基本性能

## 5 Specifications

**Input Voltage:** Universal input 90 Vac to 265 Vac, 47-63 Hz

**Output:** +19.5 V, 4.62 A max (90 W) regulated

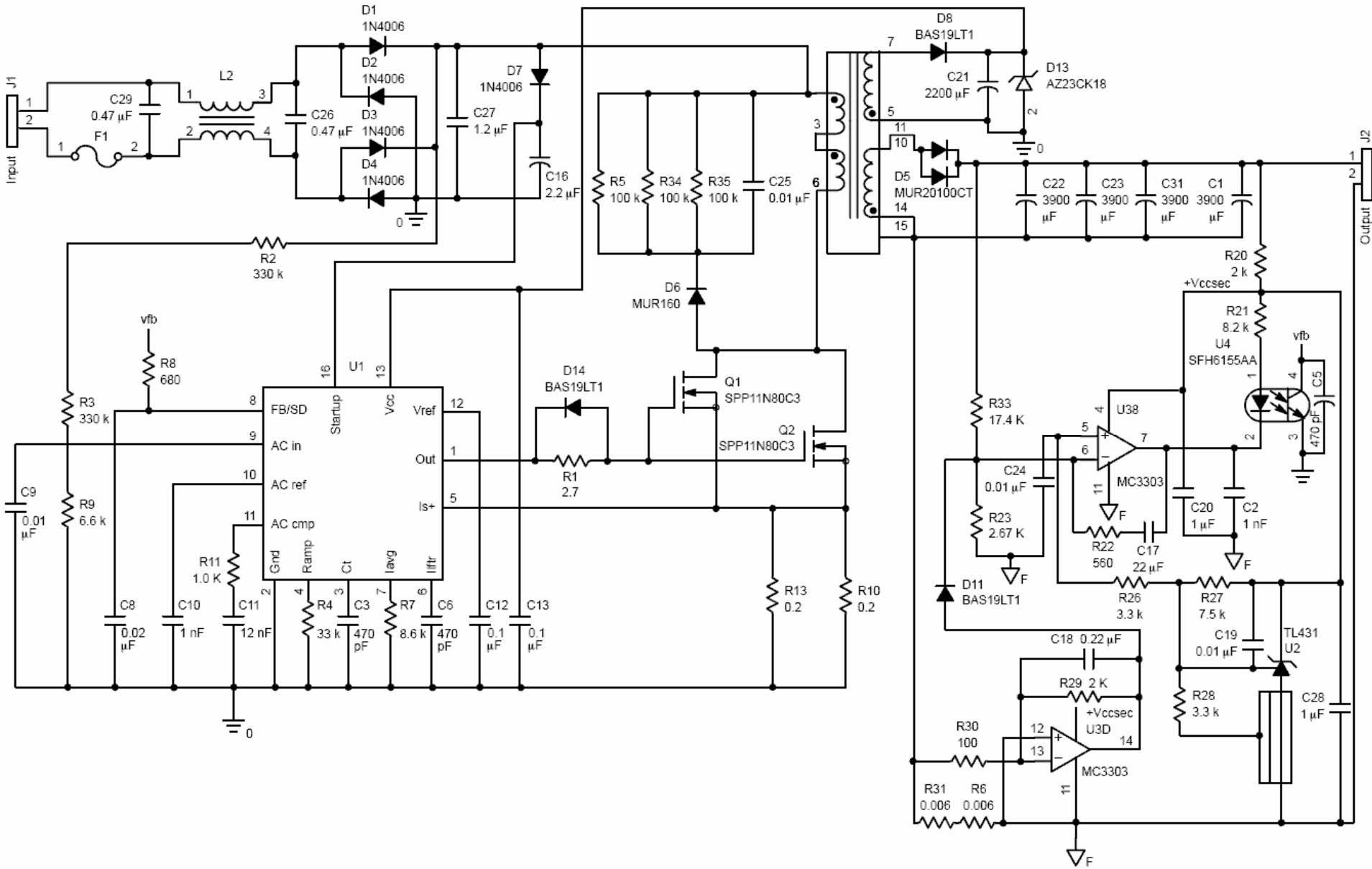
### Protections:

- Short-circuit,
- Latching over-power
- Latching over-voltage

**Standby Power:**  $P_{in} = 390 \text{ mW}$  @  $P_{out} = 0$  and  $V_{in} = 230 \text{ Vac}$

**Power Factor Correction / Current Harmonics:** Compliant with IEC1000-3-2 for class D

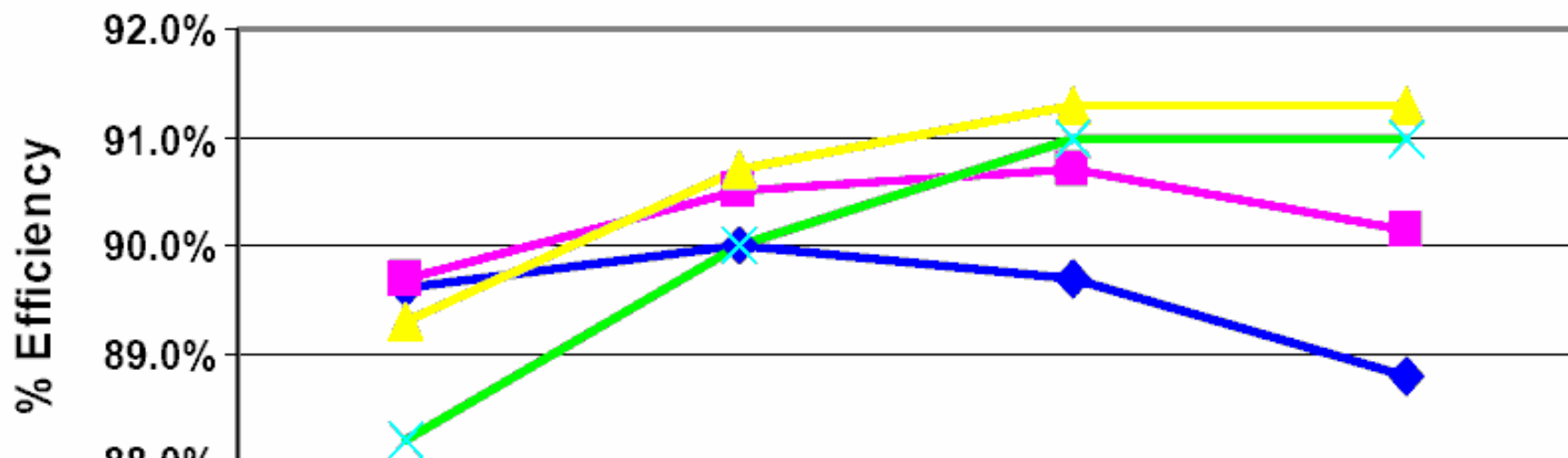
# 电路





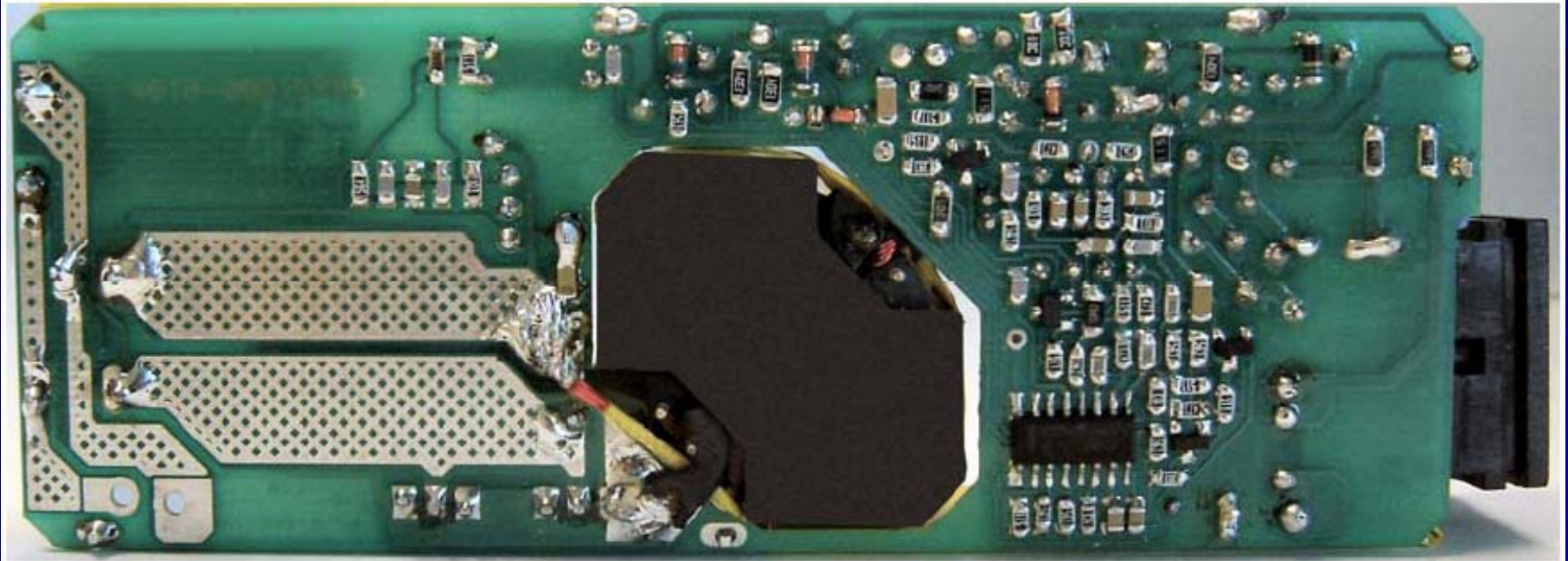
# 效率曲线

## 6.1 Efficiency



	1.5 A	2.5 A	3.5 A	4.5 A
◆ 90 Vac	89.6%	90.0%	89.7%	88.8%
■ 115 Vac	89.7%	90.5%	90.7%	90.2%
▲ 230 Vac	89.3%	90.7%	91.3%	91.3%
× 264 Vac	88.2%	90.0%	91.0%	91.0%

Output Current (A)

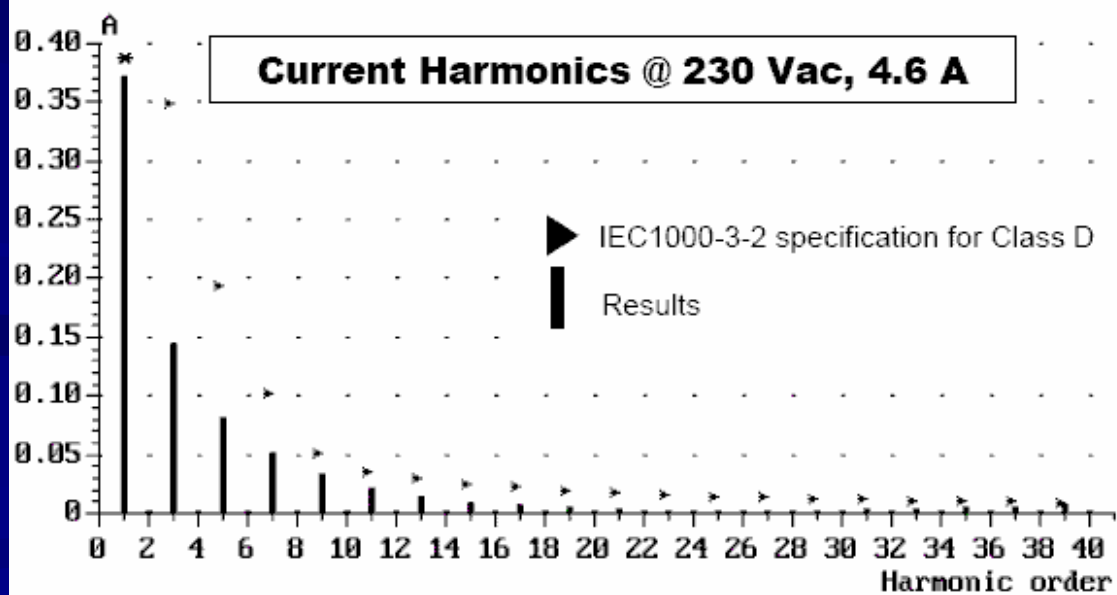
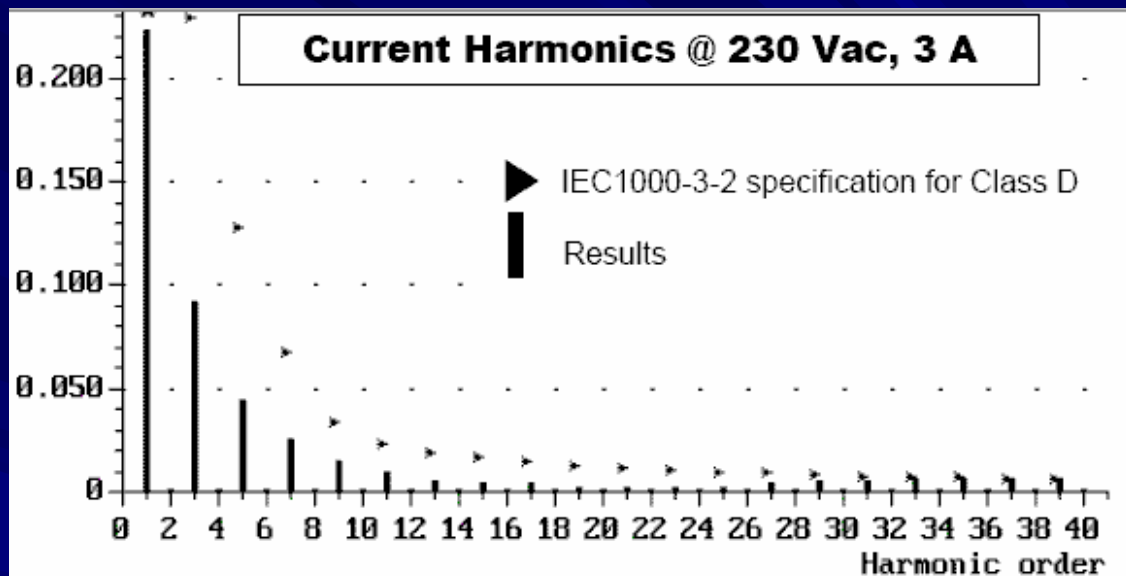


Bottom view

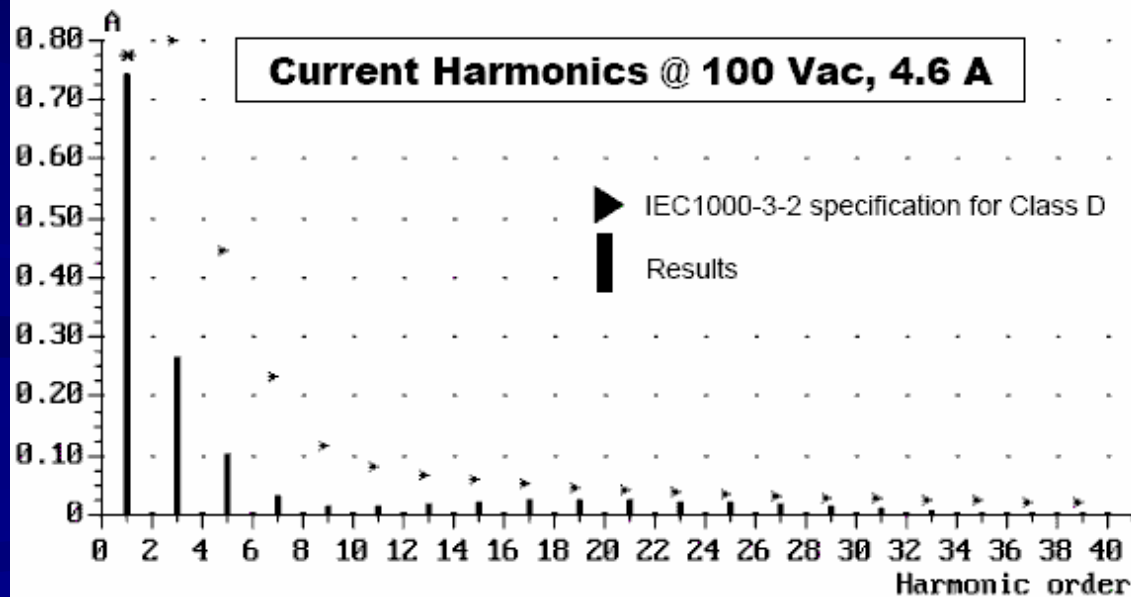
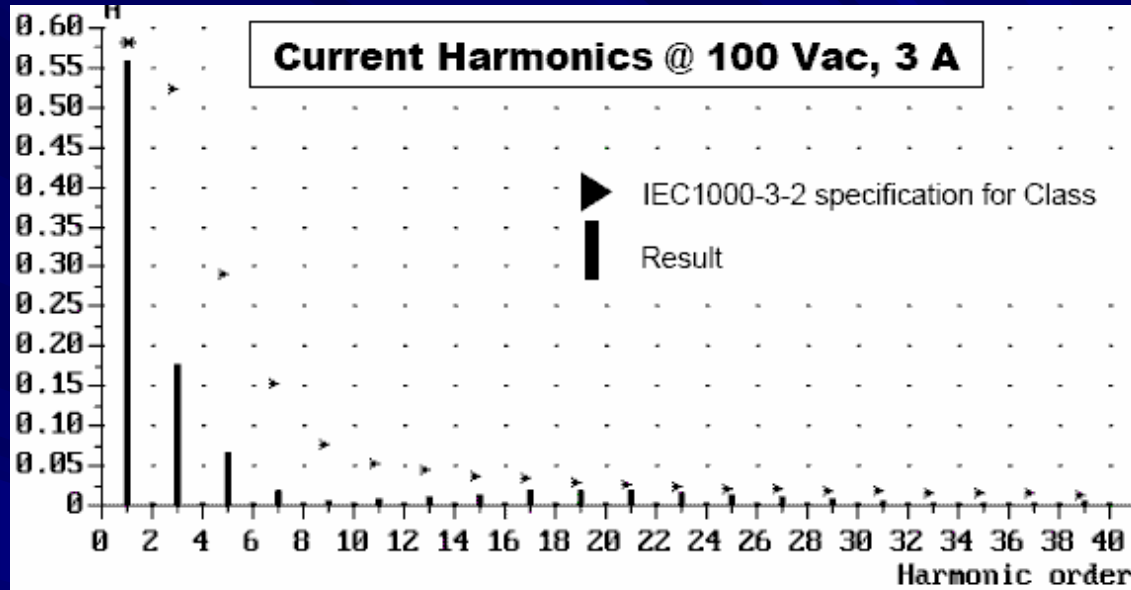


Top view

# 输入电压为230V时的谐波分析



# 输入电压为100V时的谐波分析



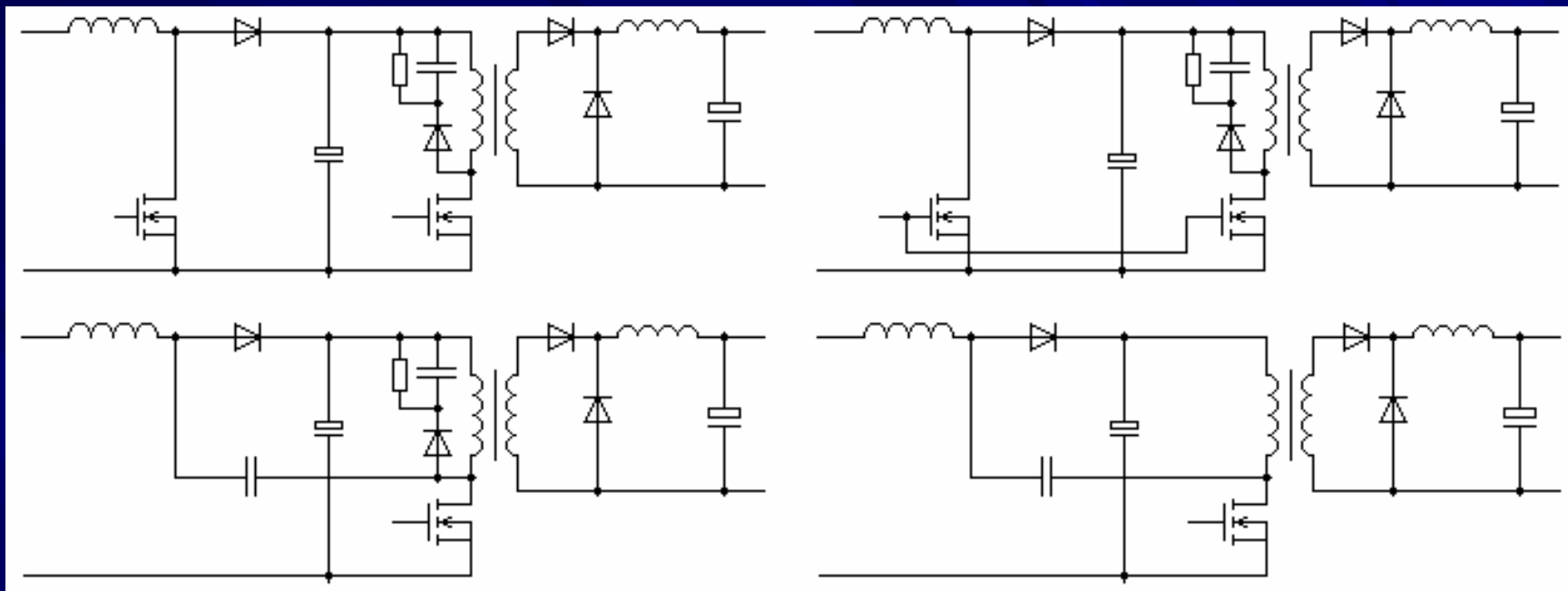
还可以采用如**SG3535**、**TL494**等电压型**PWM**控制芯片实现单级功率因数校正功能，相对**NCP1651**而言，**SG3535**、**TL494**等不具备准谐振和低功耗待机功能。如果没有准谐振和低功耗待机功能就可以采用**SG3535**、**TL494**等电压型**PWM**控制芯片

还可以应用TOP Switch实现

## 1.2 单级功率因数校正的第二种方案

- 将升压性功率因数校正电路与**DC/DC**变换器的电路重合部分合并，以减少器件的数量和电路成本。
- 这就是**infineon**的解决方案。

# 电路变换思路

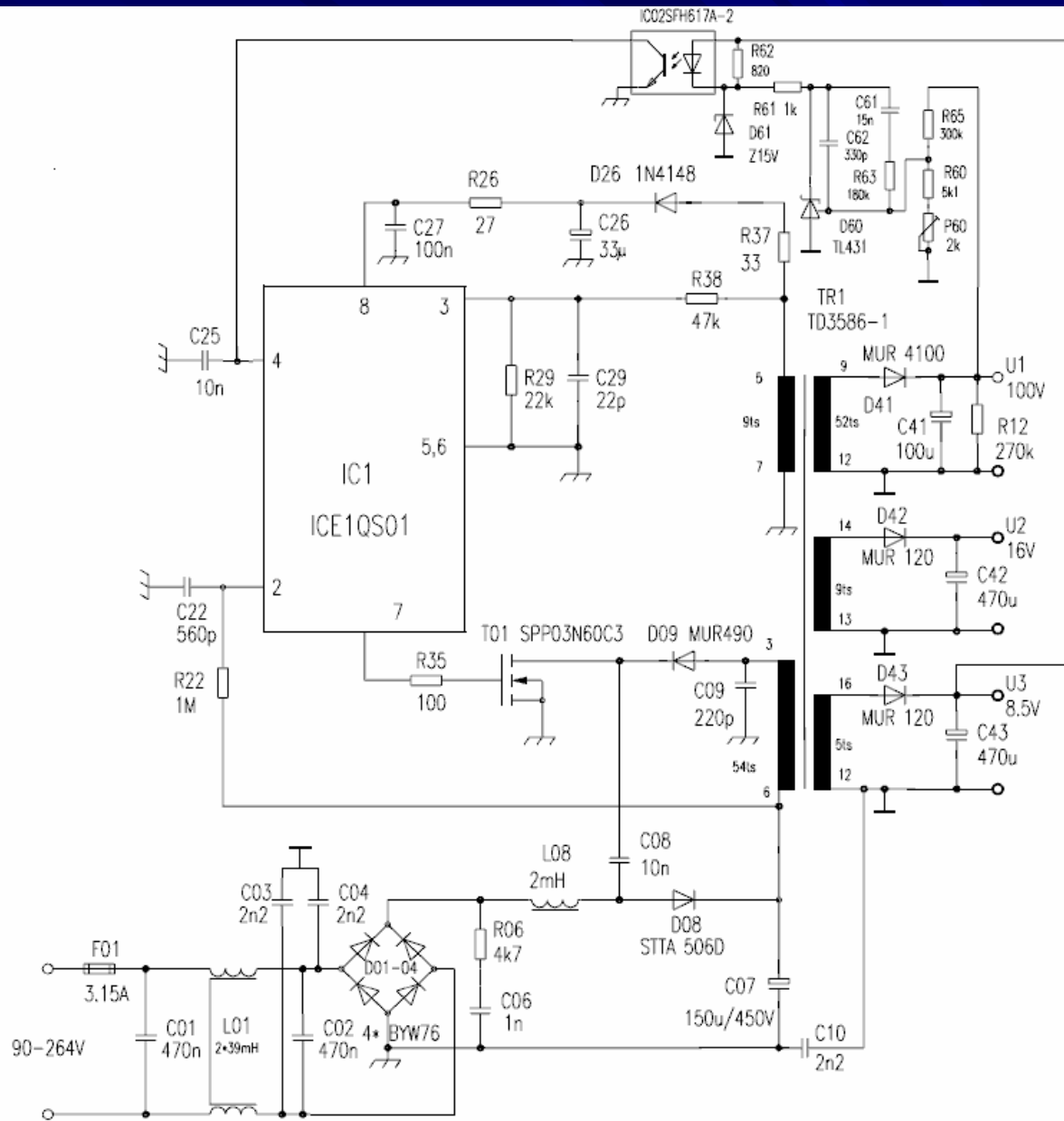


■ 很显然，电路变幻的最终结果是省掉了一个控制IC和开关管，与常规的带有RCD缓冲电路反激式DC/DC变换器相比之多了一个电感。

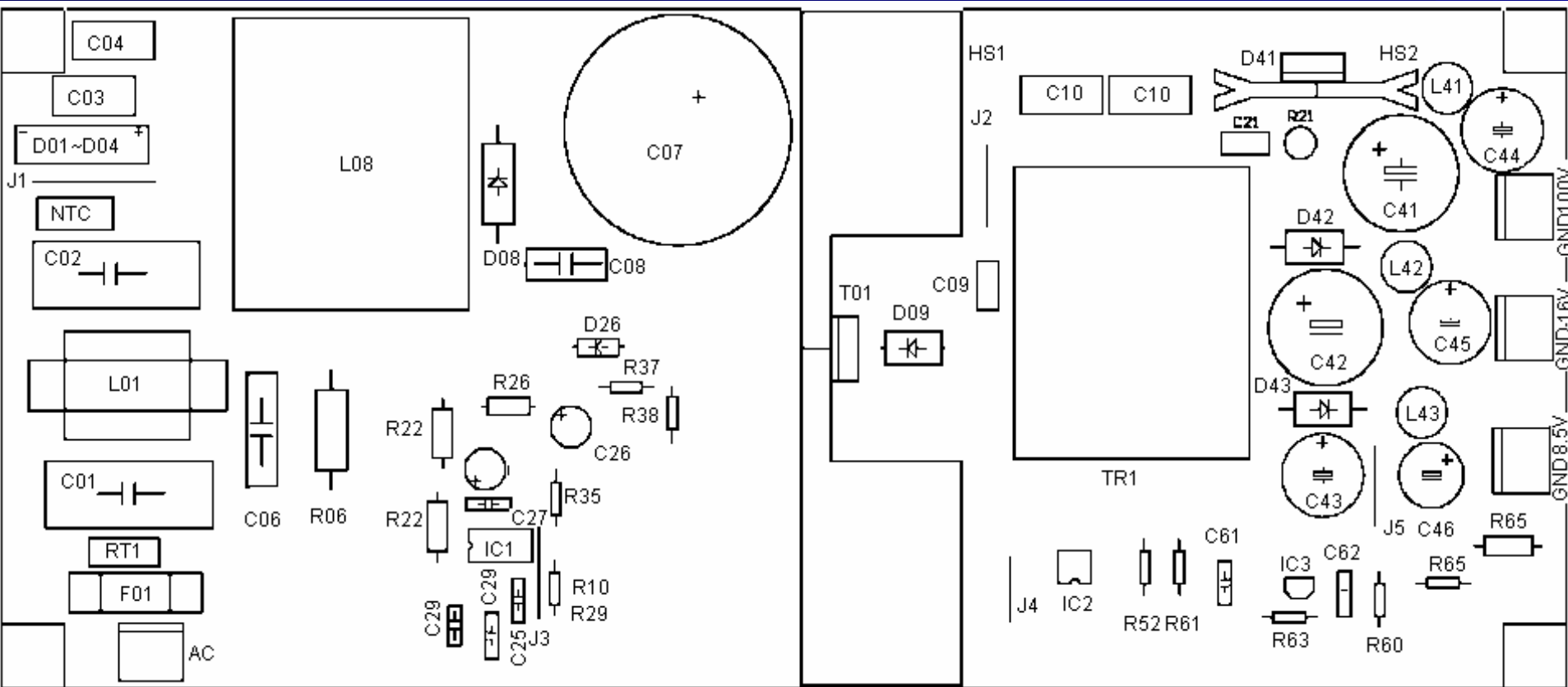
■ 由于这个电路是boost和反激式的组合，boost输出有平滑电容器缓冲输入变化功率对输出的影响，因此这种功率因数校正方式的输出电压比较平稳。



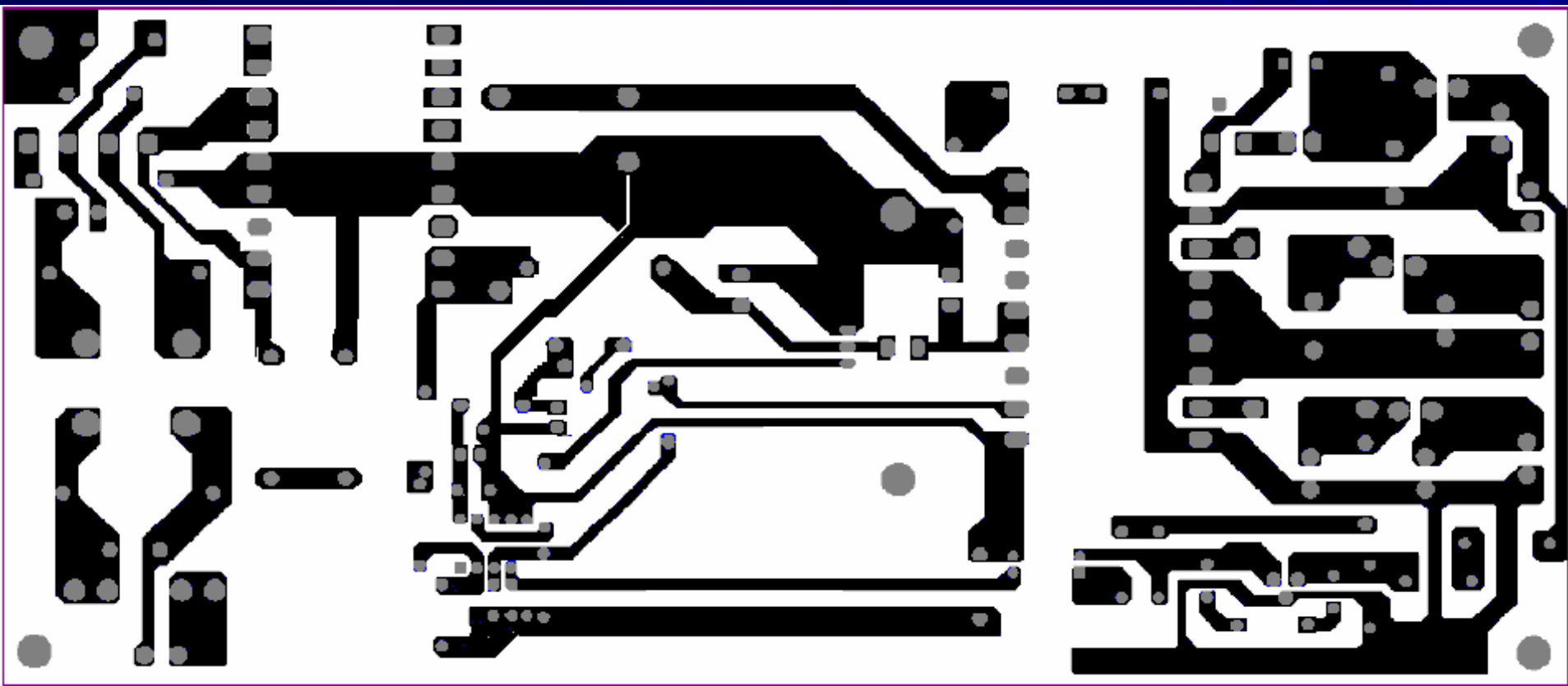
# 80W电视机电源电路



# 电路板图（元件排布图）



# 电路板图 (PCB)





# 关键波形

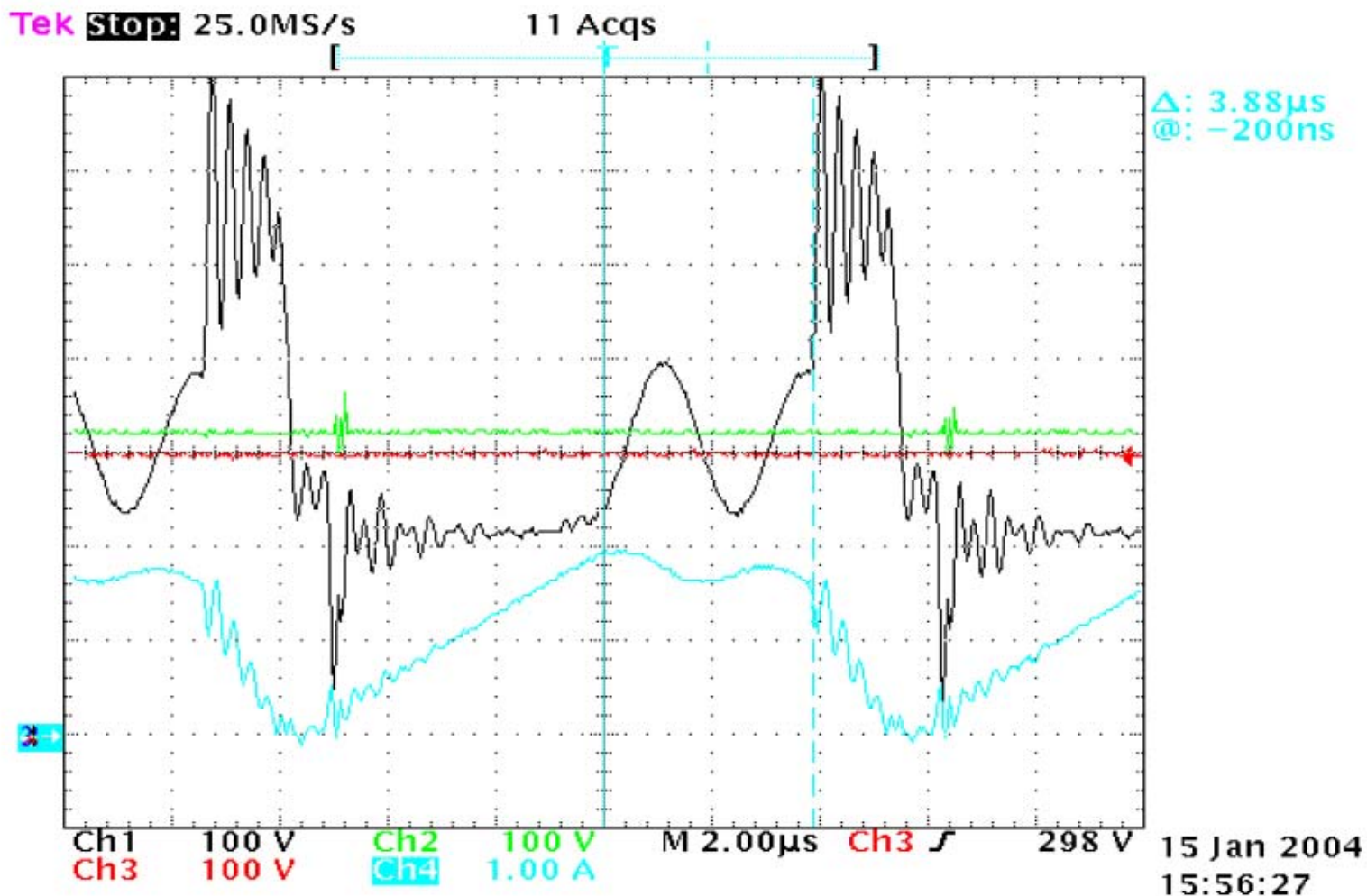


Figure 24: Voltages and current in PFC charge pump circuit (Ch1=VLpfc, Ch2=Vc07, Ch3=Vd01-d04, Ch4=IL08).

# 特点

- 采用**Infineon**的解决方案不仅可以获得可以满足要求的功率因数校正指标，还可以获得与常规开关电源相近的稳压性能（低输出电压纹波），可以实现准谐振功能，具有良好的低输出电压尖峰的特点。
- 特别是用于电视机、显示器等对输出电压尖峰有严格要求的电源。

## 2、功率因数校正的特殊方式

- 常规功率因数校正存在几个令人不舒服的问题：
- 不具有过电流和短路保护功能；
- 输出电压过高，使得后级**DC/DC**变换器不得不采用比较高耐压的器件，而高电压器件的开关性能比低耐压的器件要差得很多。
- 电网对功率因数校正的输出而言能量流是断续的，不利于效率的提高。

# 基于**CUK**电路的功率因数校正电路

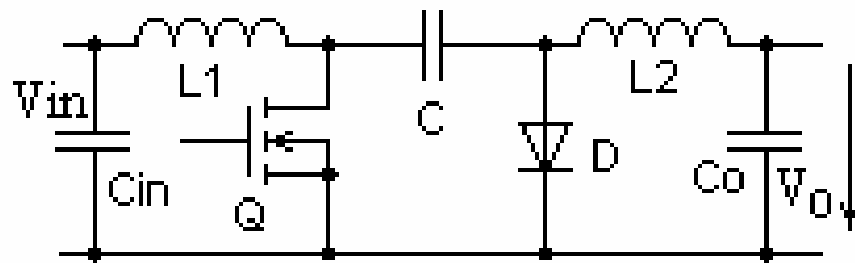
- 针对上述问题，可以采用基于**CUK**电路的功率因数校正技术。
- 众所周知，**CUK**电路的输入在整个开关周期均可以直接向输出提供电能。
- **CUK**电路的问题是两级变换器，效率相对会降低、需要开关管的耐压高于电源电压。
- 输出电压极性以输出电压急性相反。



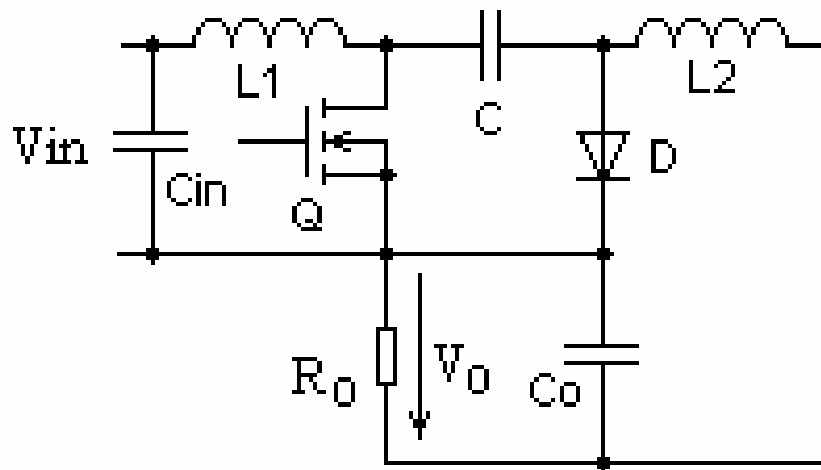
# CUK变换器演化的思路

- 针对**CUK**变换器的问题可以通过演化，避开缺点，发挥优点。

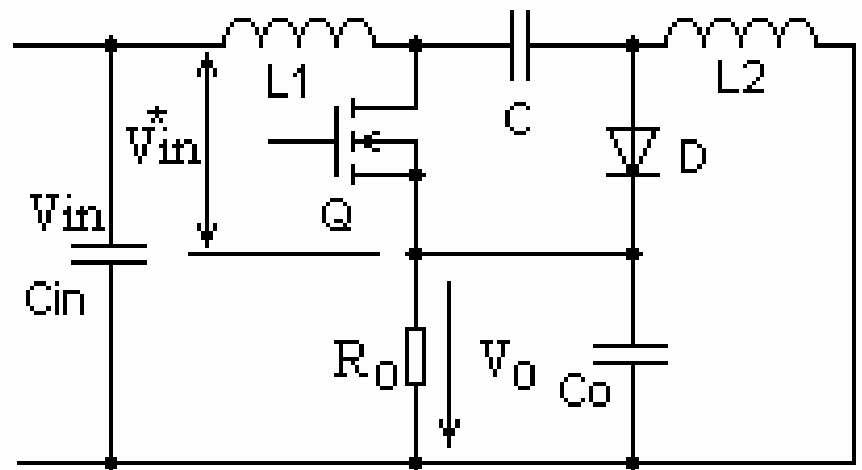
# CUK变换器的演化过程



(a) 基本 CUK 变换器



(b) CUK 变换器的等效变换

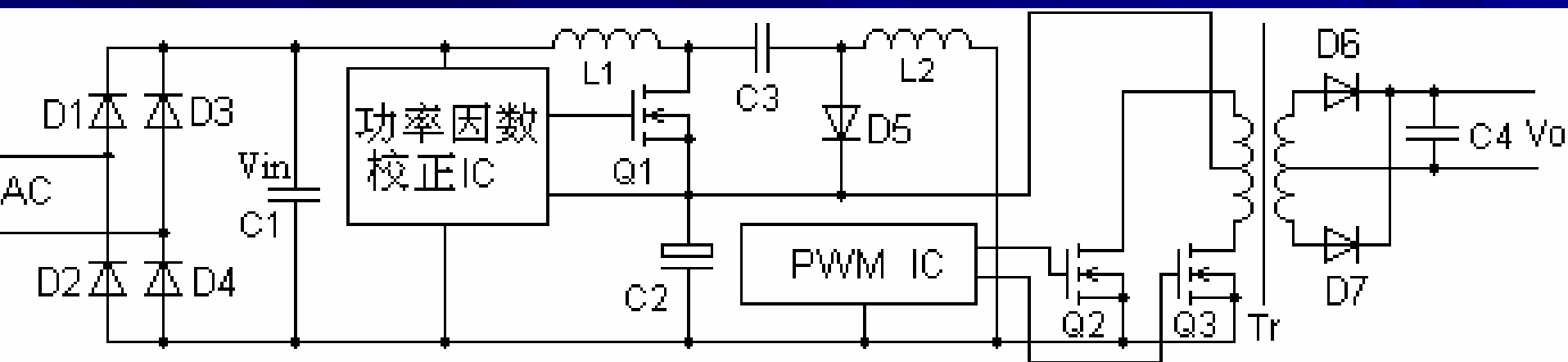


(c) 变形演化后的 CUK 变换器

# 特点

- 通过电路的演化，变形**CUK**电路的输入输出电压关系以及开关管、二极管的耐压要求与降压型变换器相同；
- 可以通过耦合电感方式改善电路性能，使其成为降压型变换器与反激式变换器的组合。

# 应用变形**CUK**电路作为功率因数校正的开关电源设计思路





# 结论

- 利用变形CUK电路实现功率因数校正可以获得如下特点：
- 在开关周期的整个过程，输入均可以向输出提供电能；
- 可以获得过电流保护和短路保护功能；
- 输出电压低于输入电压，可以将输出电压降低到48V电压等级，这样就可以直接利用DC/DC变换器模块；

# 结论（续）

- 功率因数将比常规功率因数校正电路差，但可以满足谐波限制的要求；
- 可以应用常规PWM控制芯片作为控制电路。

以上思路参见：  
中国电力出版社08年3月出版的  
“高效率开关电源设计与制作”一书



更详尽的叙述见**2010**年底出版的  
“单级功率因数校正”

谢谢！

让我们继续努力！

*0416chenyongzhen@163.com*

*13841685729*