Is Now Part of

ON Semiconductor®

To learn more about ON Semiconductor, please visit our website at
www.onsemi.com

应用指南AN-9041

采用模拟 PFC IC 的 PFC SPM® 设计指南

编写:

应用工程部分
电机控制系统团队
HV PCIA
飞兆半导体

目录

说明：

在本指南及其他飞兆文档和产品手册中，下列术语可以互换：

DIP = SPM2、Mini-DIP = SPM3、Tiny-DIP = SPM5、μMini-DIP = SPM45H、PFCM = PFC SPM®。

1. 系统配置

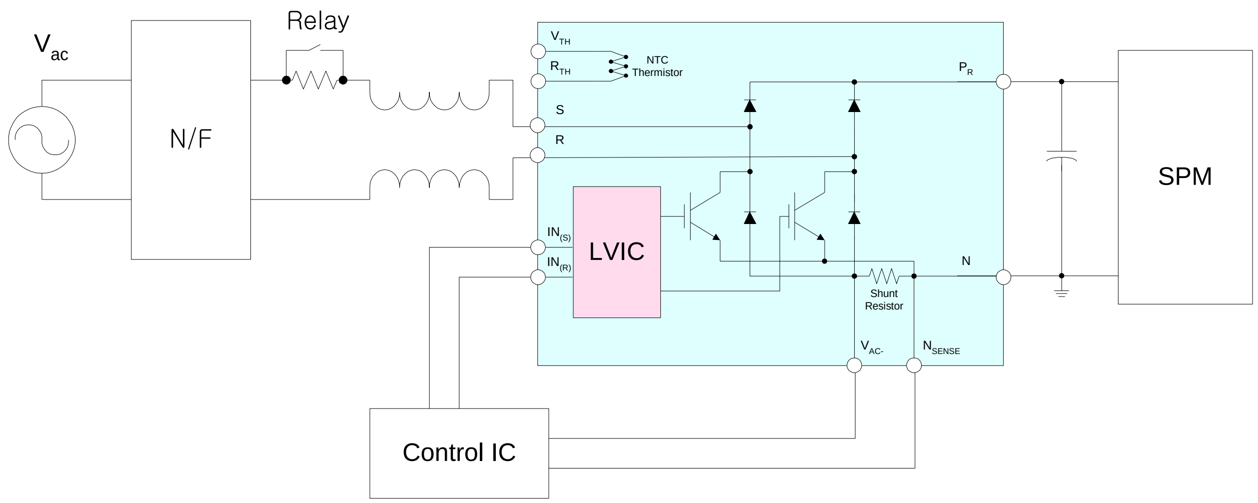


图 1 PFC SPM® 系统的典型框图

由于存在较大的直流母线电容，需要一个浪涌电流抑制电路，如图 1 所示。直流母线电容充满电后，应关闭电路中继。PFC SPM®、迷你 SPM 和控制 IC 可共享单个 GND 级。通常来说， PFC SPM 的 GND 和 N_{SENSE}端子应该具有相同的电势。通过较大的电流开关，很容易在 P 和 N 端子之间产生较大的浪涌电压。为了减小过冲电压，缩短在PFC SPM和直流母线电容间的连线变得尤为重要。此外，应在 P 和 N 端子附近安装高频电容，如聚丙烯膜电容，用作缓冲器。

2. 保护电路

下面图 2 显示保护功能的时序图。OCP 和 OVP 各有两个保护等级。通常来说，PFC 控制 IC 自身具有 OCP 和 OVP 功能。另外，用户还可以利用 Csc 输入在预置 OC 和 OV 条件下停止运行 PFC SPM® 并输出 FO 信号。

过流保护（OCP）

[OCP 等级 1 －PFC SPM®]PFC SPM 在过流情况下具有保护功能。出现过流（OC）情况时，PFC SPM 停止工作并在故障输出时段（由 C_{FOD}设定）生成故障输出信号。该时段过后，PFC SPM 根据输入命令重新开始工作。其总传输延迟时间取决于外部运算放大器的速度。我们建议使用具有快速保护功能的低成本、速度较慢的运算放大器解决方案。即下一段中介绍的 OCP 等级 2 保护。

[OCP 等级 2（SCP）－PFC 控制 IC]通过 PFC 控制 IC 的峰值电流限制功能，系统受到短路（SC）保护。OCP 等级 2 的推荐电流限值比 OCP 等级 1 的高。它不会生成故障输出信号，但响应速度非常快。在 OCP 等级传输延迟时间内，系统受到短路保护。

过压保护

过压 (OV) 保护也可以实现双重保护。由于存在较大的电容，直流母线电压变化缓慢。这样，OVP 不需要快速响应。因此，是否激活 PFC 控制器的 OVP 功能是可选的。

[OVP 等级 1 - PFC 控制器] OVP 等级 1 抑制瞬变情况下的电压击穿。不会生成故障输出信号。

[OVP 等级 2 - PFC SPM®] OVP 等级 2 的电压电平比 OVP 等级 1 的高。出现过压情况时，PFC SPM 停止工作并在故障输出时段（由 C_{FOD}设置）生成故障输出信号。然后，PFC SPM 重新开始工作。

欠压保护

当控制电压降至 UV 断路电平以下时，IGBT 栅极会中断，若控制电压恢复至 UV 重置电平，该保护功能自动释放。

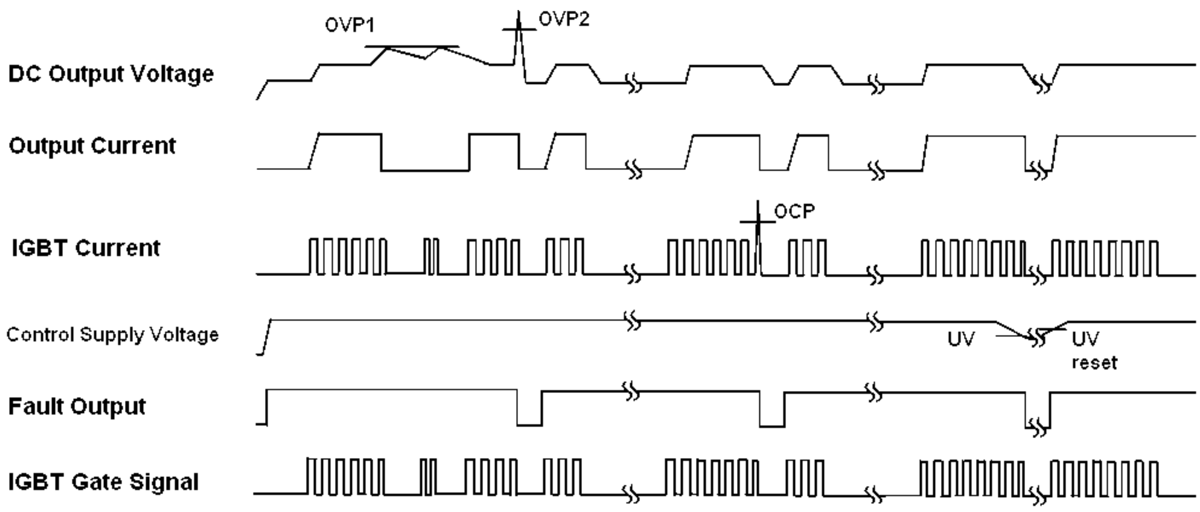


图 2 保护功能的时序图

3. 设计实例（PFC SPM® 演示板）

一个常见的 PFC 实例是实现输入电压为 187~276[V] 的 5[kW] 空调应用。

PFC SPM® 演示板的工作条件：

表 1 工作条件

	项目	符号	数值	单位
1	开关频率	Fsw	40	KHz
2	最小输入电压	Vimin	176	Vac
3	标称输入电压	Vinom	220	Vac
4	最大输入电压	Vimax	264	Vac
5	最大输出功率	Po	5000	W
6	最小输出电压	Vomin	350	Vdc
7	标称输出电压	Vonom	380	Vdc
8	OVP 等级 1	V_{OV1}	420	V
9	OVP 等级 2	V_{OV2}	440	V
10	峰值纹波电流	Iripple	5	A
11	OCP 等级 1	Iocp1	40	A
12	OCP 等级 2 (SCP)	Iocp2	50	A
13	分流电阻	Rsh	2	MOhm
14	直流电容	Cout	940	uF

输出电容和电感设计

输出电压纹波 & 输出电容

$$\left|V_{OUTRIPPLE}\right|_{PEAK} = I_{OUTDC}\sqrt{\left(\frac{1}{4\pi f_L \times C_{OUT}}\right)^2 + ESR^2}$$

where:

f_L = line frequency.

ESR = the ESR of the output capacitor.

纹波电压 V_{DC}的减少可通过采用较大的 C_{OUT}实现。在演示板中，C_{OUT}设置为 940[μF] (470[μF] x 2)

电感 & 输入电流纹波

$$\Delta I_{L_{p-p}} = \frac{V_{IN}(V_{OUTDC} - V_{IN})}{fLV_{OUTDC}}$$

其中： ΔI_{Lp-p} ： PFC 电感器峰对峰电流
V_{IN} ： 输入交流电压
V_{OUTDC} ： 直流母线电压
f ： 开关频率
L ： PFC 电感器电感

$$\Delta I_{L_{p-p}} = \frac{V_{IN}(V_{OUTDC} - V_{IN})}{fLV_{OUTDC}}$$

$$\therefore (\Delta I_{L_{p-p}})_{MAX} = \frac{V_{OUTDC}}{4fL} \quad (\because V_{IN} = \frac{1}{2}V_{OUTDC})$$

$$(\Delta I_{L_{p-p}})_{MAX} = 5A \rightarrow L = \frac{V_{OUTDC}}{20f} = \frac{380}{20 \cdot 40000} = 475[\mu H]\ (fs=40kHz)$$

电流纹波由开关频率和电感决定。为了减少电流纹波，需要较高的开关频率和较大的电感值。也就是说，采用较高的开关频率能够减少电感器尺寸。但是，功耗会增加，因而需要效率更高的散热器结构。

开环响应

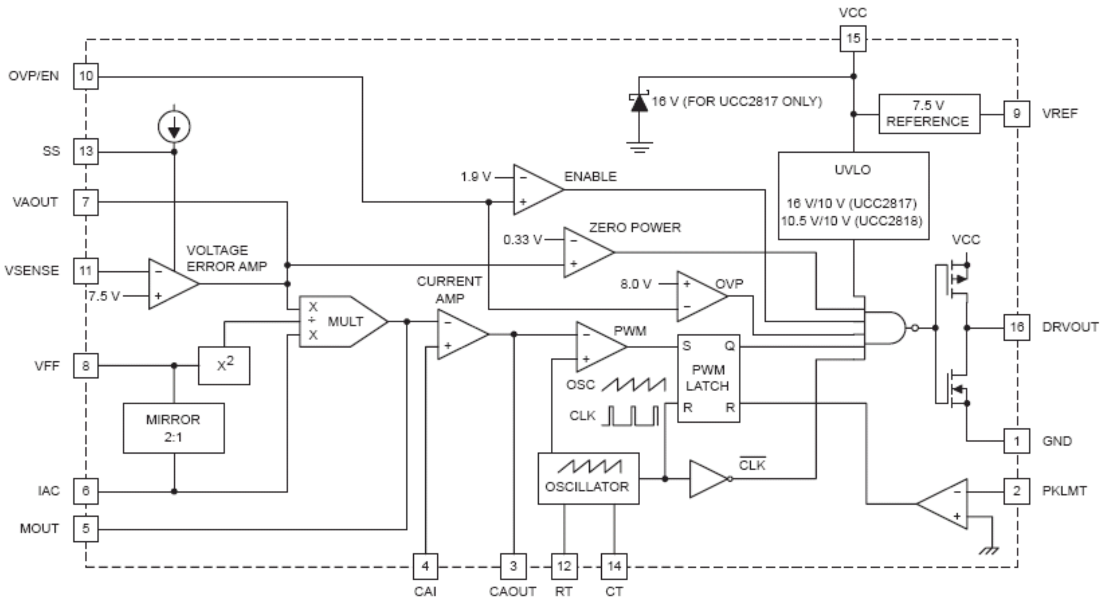


图 3 PFC 控制 IC 框图

下面是 PFC 控制器 ucc3818 的框图。平均电流模式控制包含两种环路：电压环路和电流环路。电压环路控制输出直流母线电压。它调节输出电压。输出直流母线中存在一个 120[Hz] 的纹波电压， 是由 60[Hz] 的交流输入电流产生的。因此，电压环路的设计带宽必须足够低，从而抑制 120[Hz] 纹波电压。

在通用连续导通模式 (CCM) 下，存在一个乘法器。乘法器将 V_{EA}（电压环路输出）乘以 I_{AC}（输入交流电流波形基准值），然后除以 V_{RMS}（RMS 输入电压基准值）。乘法器的输出（$I_{MO} = K \cdot \frac{V_{EA} \cdot I_{AC}}{V_{RMS}{}^2}$）是 PFC 输入电流 ($I_{AC}$) 的基准值。

I_{MO}引脚的电压（乘法器输出）和电流感测电阻的电压之间的差值被电流环路放大。V_{EA}（电流环路输出）是生成栅极信号的比较器的基准电压。电流环路应足够快， 从而赶上 120[Hz] 的输入交流电流。由于存在开关噪声，速度太快会导致电流波形失真。因此， 电流环路必须设计的足够快， 以便赶上 120[Hz] 的整流输入电流，但又不能太快，以便抑制开关噪声。

电流环路放大器

方程式 1 显示功率级的开环响应。（请参阅 UCC3818 数据表）

$$G_{PST} = \frac{V_S(s)}{V_{IAOUT}(s)} = \frac{V_{DC} R_{SH}}{4sL} \quad \text{(UCC3818)} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

其中： V_S ： 分流电阻的电压

V_{IAOUT} ： R_{MO}电压

V_{DC} ： 直流母线电压

R_{SH} ： 用于电流感测的分流电阻 (2 mohm)

L ： PFC 电感

s ： $j\omega(= j\cdot 2\pi f)$

电压环路放大器

方程式 2 显示功率级的开环响应。（请参阅 UCC3818 数据表）

$$G_{V.O.L.} = \frac{P_{IN}}{sC_{OUT} V_{OUTDC} \Delta V_{EAOUT}} \quad \text{(UCC3818)} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

其中： P_{IN} ： 输入功率

C_{OUT} ： 直流母线电容

V_{OUTDC} ： 直流母线电压

ΔV_{EAOUT} ： 误差放大器输出差值 ($\approx$5V)

s ： $j\omega(= j\cdot 2\pi f)$

控制环路实现

电流环路

[步骤 1]穿越频率

下面方程式计算理论穿越频率：

$$f_C = \frac{f_S}{6} \Rightarrow 6.7kHz$$ （方程式 3）

[步骤 2]确定 Fz 和 Fp

$$f_Z = \frac{f_C}{2} = 3.3kHz, \quad f_P = 6f_Z = 20kHz$$

[步骤 3]确定 Rz、Cp、Cz

R_i等于 R_{MO}。（请参阅第 10 页上的“其它参数”）

R_i = 470[Ω],

在方程式 1 中， $G_{PST}\Big|_{f_C=6.6kHz} = \frac{V_{DC}R_{SH}}{4sL} = \frac{V_{DC}R_{SH}}{4(2\pi f_C)L} = 0.0103 = -39.8dB$

因此需要以 fc(= 6.6 kHz) 的频率提高电平 40 dB。

R_z由方程式 7 得出。

$|G|_{dB} = 20\log\frac{R_z}{R_i} = 40dB$ → R_z = 47[kΩ]。

根据方程式 4 和 5，可以得到 Cp 和 Cz。

C_p = 180[pF], C_z = 1[nF]

$$f_z = \frac{1}{2\pi R_z C_z}$$ （方程式 4）

$$f_p = \frac{C_z + C_p}{2\pi R_z C_z C_p}$$ （方程式 5）

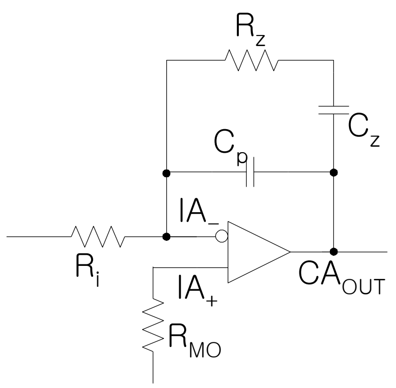


图 4 电流环路电路

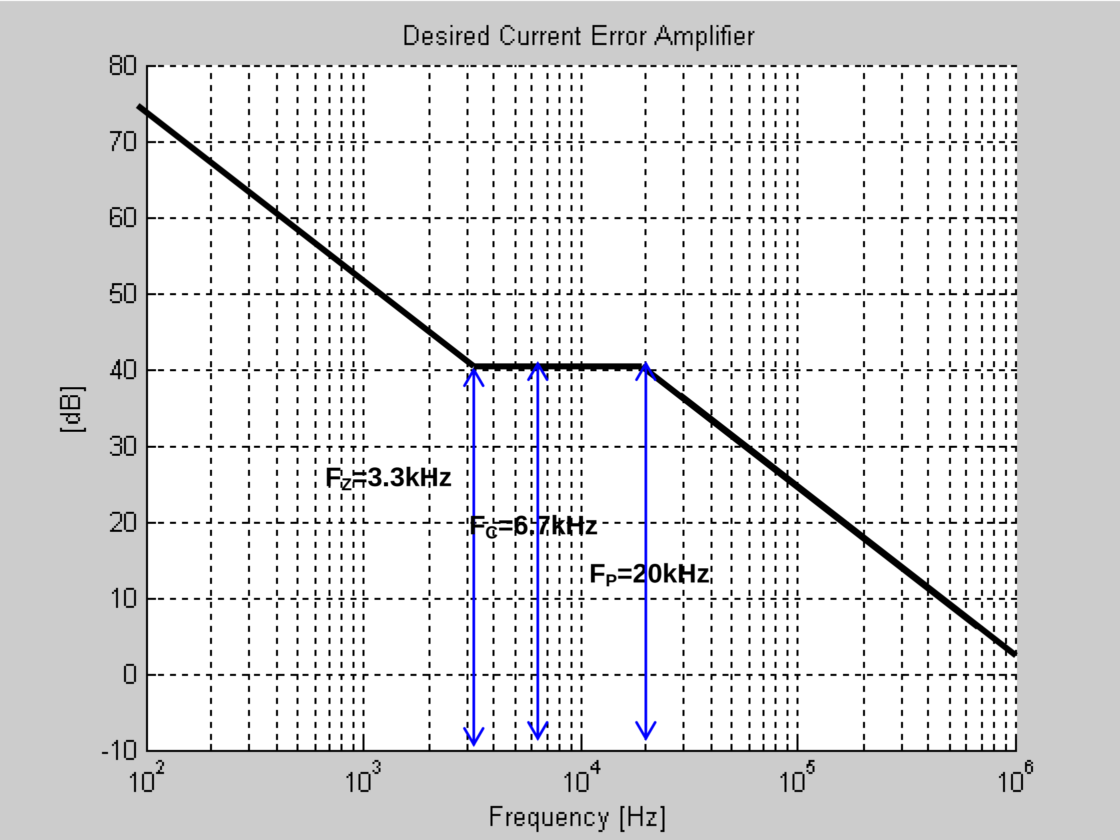


图 5 所需的电流误差放大器响应

[1] $$\left|G\right|_{dB}=20\log\frac{1}{2\pi fR_iC_z}$$ (Eq. 6)

[2] $$\left|G\right|_{dB}=20\log\frac{R_z}{R_i}$$ (Eq. 7)

[3] $$\left|G\right|_{dB}=20\log\frac{1}{2\pi fR_iC_p}$$ (Eq. 8)

电压环路

$$G_{V.O.L.}\Big| =\frac{P_{IN}}{sC_{OUT}V_{OUTDC}\Delta V_{EAOUT}}=\frac{5000}{2\pi f\cdot 0.001\cdot 380\cdot 5}=\frac{419}{f}$$

在 E/A 输入和感测电阻中间，加入了电阻 (R_{VD})。通过采用较大的 R_{VD}，可以用较小的 SMD 电容替换掉 C_{VF}。

→ $R_{VD}=120k\Omega$ (>R_{VS})

$R_{VF}=8\cdot R_{VD}\approx 1M\Omega$ (>R_{VD})

$$f_{CV}=\frac{1}{2\pi R_{VD}C_{VF}}<<120 \rightarrow C_{VF}=1uF\ \left(f_{CV}=1.3Hz\right)$$

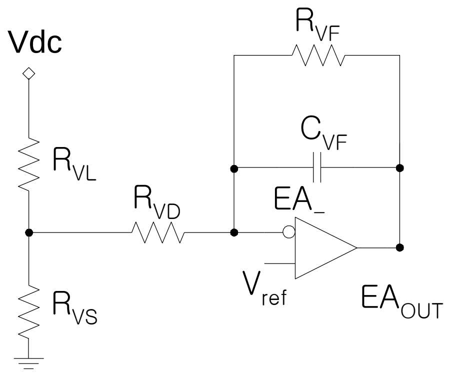


图6 电压环路电路

其它参数

R_T, C_T: 确定开关频率

$$f=\frac{0.6}{R_T C_T}$$

R_T = 15[kΩ]

C_T = 1[nF]

➔ F_s = 40[kHz]

R_{MO}: （请参阅图 4）

$$R_{MO}=\frac{I_{AC\_peak}\cdot R_{sense}}{I_{GMMAX}}=\frac{50\sqrt{2}\cdot 0.002}{300\times 10^{-6}}=471\approx 470[\Omega]$$

（假设输入电流是 50 A_{RMS} @ V_{AC} = 100 V_{RMS}）

➔ R_{MO} = 470[Ω]

R_{sense} = 0.002[Ω]（在低电平电流下，较小的电阻可能导致失真）

R_{AC} & 光电耦合器电路：

光电耦合器： TLP180

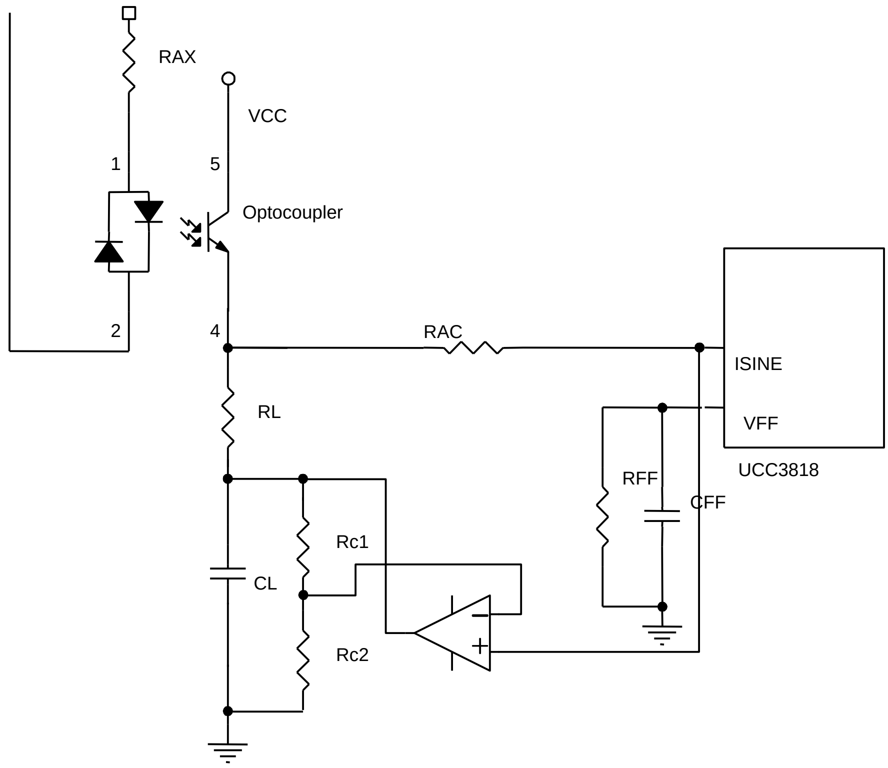


图 7 输入交流电压感测电路

R_{AX}和 R_L取决于光电耦合器：

$$R_{AX}=\frac{V_{RMS\_\max}\cdot\sqrt{2}}{I_{LINEAR\_\max}}=\frac{270\cdot\sqrt{2}}{6\times10^{-3}}=64[k\Omega]$$

$$\rightarrow\ 18+18+18+18[k\Omega](0.5\times4=2W)$$

$$R_{AC}=\frac{V_{RL\_PEAK}}{I_{AC\_\max}}=\frac{9}{0.5\times10^{-3}}=18[k\Omega]$$

$$R_L=390[\Omega]$$

R_{C1}、R_{C2}、C_L和 运算放大器→ I_{SINE}偏移补偿

C_L = 1[uF]，R_{C1} = 0[Ω]，R_{C2} = 150[Ω]，

V_{FF}：

$V_{FF}=1.4[V]$（当输入电压 V_{AC} = 90[V_{AC}]）

R_{FF} = 33[kΩ]，C_{FF} = 100[uF]

过流保护

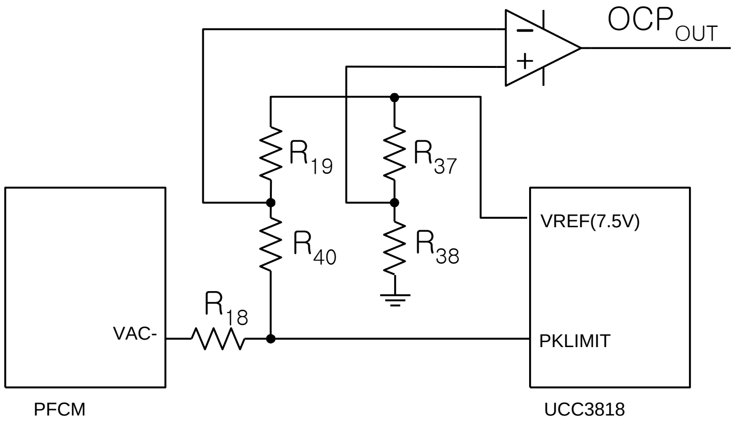


图 8 过流保护电路

实际保护等级与计算值稍有不同。取决于 PCB 布局样式。有关演示板，设计值为：

R_{18} = R_{40} = 1.2[kΩ], R_{19} = R_{37} = 82[kΩ], R_{38} = 1.5[kΩ]

预期 OC 值为：

1） OCP 等级 1

$$\frac{R_{38}}{R_{37}}V_{REF} = \frac{(R_{18}+R_{40})V_{REF} - R_{SH}I_{PK}R_{19}}{R_{18}+R_{19}+R_{40}} \Rightarrow I_{PK} = \frac{V_{REF}}{R_{SH}R_{19}}\left(R_{18}+R_{40}-\frac{R_{38}}{R_{37}}\left(R_{18}+R_{19}+R_{40}\right)\right)$$

$$\therefore I_{PK} \approx 40[A]$$

2） OCP 等级 2

$$\frac{R_{19}+R_{40}}{R_{18}} = \frac{V_{REF}}{R_{SH}I_{PK}} \Rightarrow I_{PK} = \frac{R_{18}V_{REF}}{R_{SH}\left(R_{19}+R_{40}\right)}$$

$$\therefore I_{PK} \approx 50[A]$$

过压保护

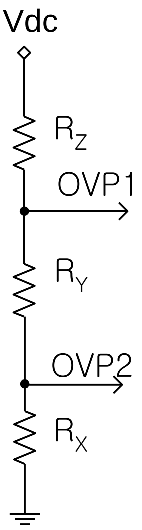


图 9 过压保护电路

有关演示板，设计值为：

R_X = 15 [kΩ]，R_Y = 1.8 [kΩ]，R_Z = 870 (270+270+330) [kΩ]

预期 OC 值为：

1） OVP 等级 1

$$\frac{R_X+R_Y}{R_X+R_Y+R_Z}=\frac{V_{REF\_OV}}{V_{DC\_PK}}\Rightarrow V_{DC\_PK}=\frac{R_X+R_Y+R_Z}{R_X+R_Y}V_{REF\_OV}=\frac{886.8}{16.8}\cdot 8=422[V]$$

2） OVP 等级 2

$$\frac{R_X}{R_X+R_Y+R_Z}=\frac{V_{REF}}{V_{DC\_PK}}\Rightarrow V_{DC\_PK}=\frac{R_X+R_Y+R_Z}{R_X}V_{REF}=\frac{886.8}{15}\cdot 7.5=443[V]$$

直流母线电压控制

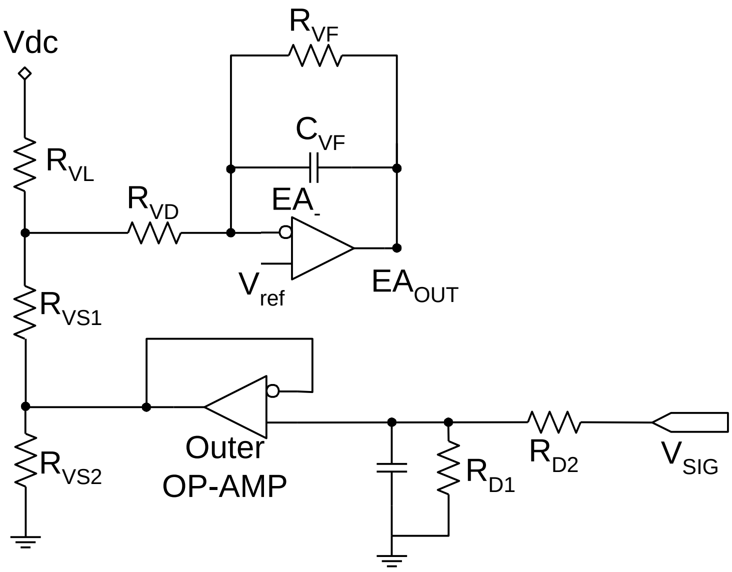


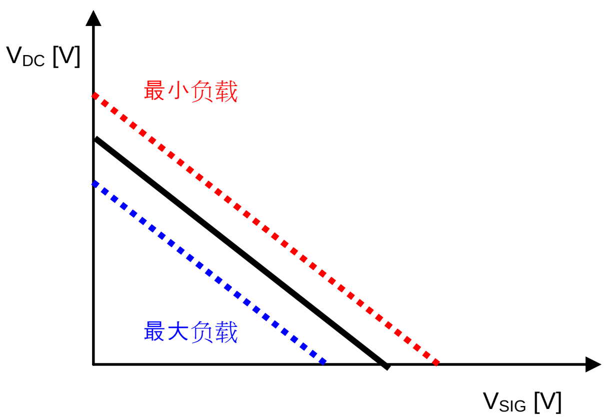
图 10 直流母线电压控制电路

V_{DC}和参数之间的关系是：

$$V_{DC}=7.5\left(R_{VL}\left(\frac{R_{VD}}{R_{VF}R_{VS1}}+\frac{1}{R_{VF}}+\frac{1}{R_{VS1}}\right)+\frac{R_{VD}}{R_{VF}}+1\right)-\frac{1}{R_{VF}}\left(R_{VD}+R_{VL}+\frac{R_{VL}R_{VD}}{R_{VS1}}\right)V_{EA}-\frac{R_{VL}}{R_{VS1}}\left(\frac{R_{D1}}{R_{D1}+R_{D2}}\right)V_{SIG}$$

变量 V_{DC}电压可通过调整 V_{SIG}电压获得。电压误差放大器的输出 V_{EA}随其负载电流在 0 至 5.5 V 间变化。在无负载条件下， V_{EA}值几乎为零。同时， V_{DC}的值达到最大值。下图显示 V_{SIG}和 V_{DC}电压。低负载条件下的电压 V_{DC}比最大负载条件下的电压高。

图 11 直流母线电压与控制电压



4. 实验结果

图 12 显示实现 PFC 转换器的整体原理图。表 2 显示实现硬件的组件。图 13 显示输入交流电流和直流母线电压波形。表 3 详细说明这些图。

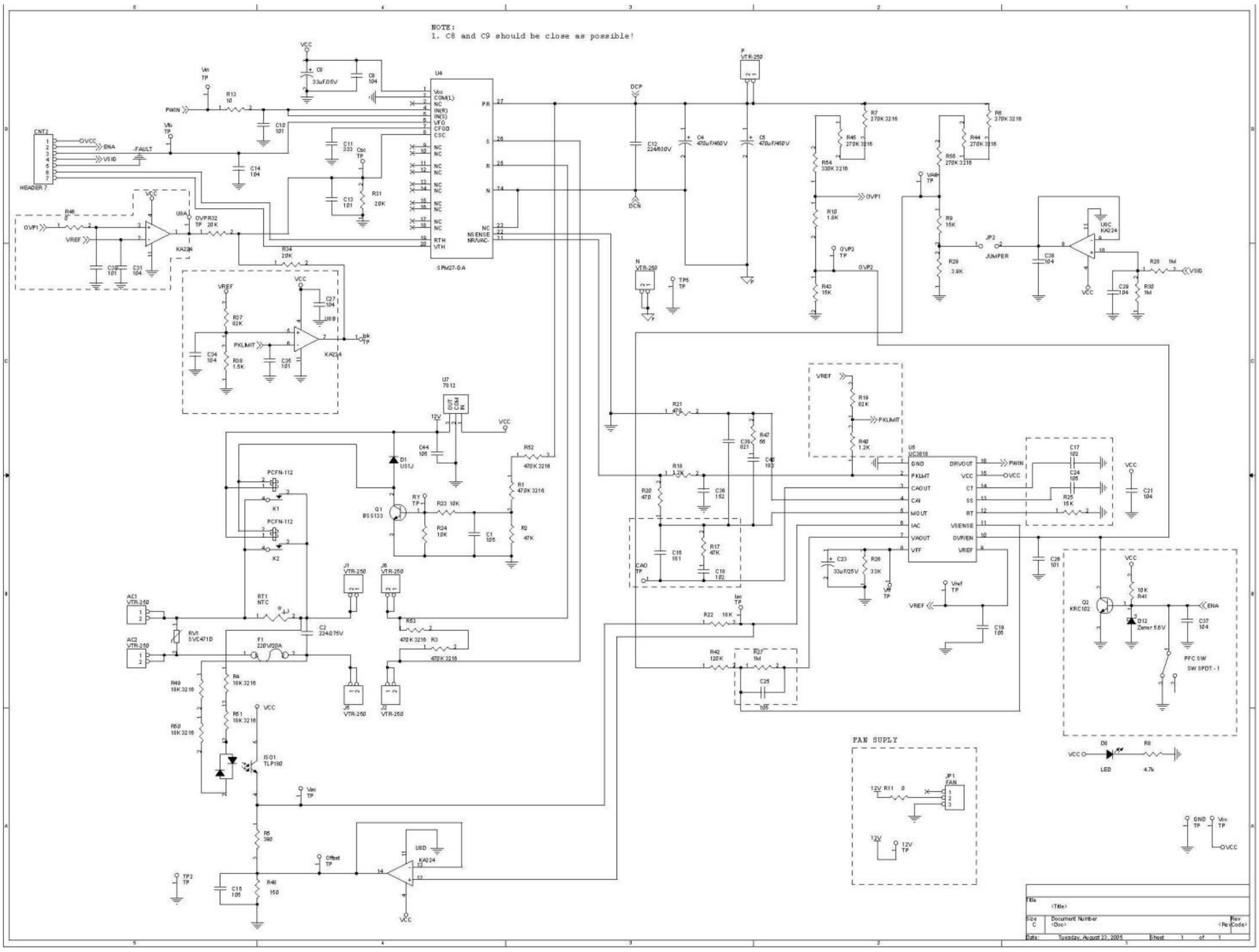


图 12 实现 PFC 转换器的原理图

表 2 PFC SPM® 演示板 BOM

Item	Part	Reference	Quantity
1	C-Ceramic : 101 2012	C10,C13,C26,C30,C35	5
2	C-Ceramic : 102 2012	C17,C18	2
3	C-Ceramic : 104 2012	SC2,SC4,C9,C14,C21,C27,C29,C31,C34,C37,C38	11
4	C-Ceramic : 105 2012	C1,C15,C19,C24,C25,C44,SC6	7
5	C-Ceramic : 152 2012	C36	1
6	C-Ceramic : 183 2012	C40	1
7	C-Ceramic : 221 2012	C16	1
8	C-Ceramic : 333 2012	C11,SC7	2
9	C-Ceramic : 821 2012	C39	1
10	C-Elec : 220uF 35V	SC5	1
11	C-ELEC : 33uF 35V	C8,C23	2
12	C-ELEC : 470uF 450V	C4,C5	2
13	C-Elec : 47uF 35V	SC3	1
14	C-FILM : 105 630V	C12	1
15	C-FILM : 220nF AC275V	C2	1
16	Connector : 7-pin, 2.54mm pitch	CNT2	1
17	DIODE : US1J	D1,SD2,SD3,SD4	4
18	FAN connector : 3-pin, 2.54mm pitch	JP1	1
19	FPS : KA5M02659RN	U10	1
20	Fuse : 220V/20A	F1	1
21	JUMPER : 2-pin, 2.54mm pitch	JP2	1
22	LED	D8	1
23	Main Relay : PCFN-112	K1,K2	2
24	Mosfet : BSS138	Q1	1
25	NTC : 6D-22	RT1	1
26	Op-Amp : KA224	U8	1
27	Opto-coupler : TLP180	ISO1	1
28	Opto-coupler : TLP181	ISO2	1
29	PFC IC : UC3818	U5	1
30	PFCM : FPDB30PH60	U4	1
31	R-Chip : 0ohm, 1/8W, J, 2012	R11,R46	2
32	R-Chip : 1.2Kohm, 1/8W, J, 2012	R40,R18	2
33	R-Chip : 1.5Kohm, 1/8W, J, 2012	R38	1
34	R-Chip : 1.8kohm, 1/8W, F, 2012	SR6,R10	2
35	R-Chip : 1.8kohm, 1/8W, J, 2012	SR2	1
36	R-Chip : 100kohm, 1/2W, J, 5025	SR7,SR8	2
37	R-Chip : 10Kohm, 1/8W, J, 2012	SR4,R23,R24,R41	4
38	R-Chip : 10ohm, 1/8W, J, 2012	R13	1
39	R-Chip : 10ohm, 1/8W, J, 2012	SR1	1
40	R-Chip : 120Kohm, 1/8W, J, 2012	R42	1
41	R-Chip : 150ohm, 1/8W, J, 2012	R48	1
42	R-Chip : 15Kohm, 1/8W, J, 2012	R9,R25,R43	3
43	R-Chip : 18Kohm, 1/4W, J, 3216	R4,R49,R50,R51	4
44	R-Chip : 18Kohm, 1/8W, J, 2012	R22	1
45	R-Chip : 1Mohm, 1/8W, J, 2012	R27,R28,R30	3
46	R-Chip : 20Kohm, 1/8W, J, 2012	R31,R32,R34	3
47	R-Chip : 270Kohm, 1/4W, F, 3216	R6,R7,R44,R45,R55	5
48	R-Chip : 3.3kohm, 1/8W, J, 2012	SR3	1
49	R-Chip : 3.9Kohm, 1/8W, J, 2012	R29	1
50	R-Chip : 33Kohm, 1/8W, J, 2012	R26	1
51	R-Chip : 330Kohm, 1/4W, F, 3216	R54	1
52	R-Chip : 390ohm, 1/8W, J, 2012	R5	1
53	R-Chip : 4.7Kohm, 1/8W, J, 2012	R8	1
54	R-Chip : 470Kohm, 1/4W, F, 3216	R1,R3,R52,R53	4
55	R-Chip : 470ohm, 1/8W, J, 2012	R20,R21	2
56	R-Chip : 47Kohm, 1/8W, J, 2012	R2,R17	2
57	R-Chip : 56ohm, 1/8W, J, 2012	R47	1
58	R-Chip : 82Kohm, 1/8W, J, 2012	R19,R37	2
59	R-Chip : 9kohm, 1/8W, F, 2012	SR5	1
60	Regulator : KA78M12	U7	1
61	Switch : SW SPDT - 1	PFC SW	1
62	Terminal : VTR-250	J1,J2,J5,J6,AC1,AC2,P,N	8
63	TR : KRC102	Q2	1
64	Transformer : EI-1916	T1	1
65	TVS : SMBJ170	SD1	1
66	Varistor : SVC471D	RV1	1
67	Voltage detector : KA431A	SD5	1
68	Zener Diode : 1N4734A, 5.6V	D12	1

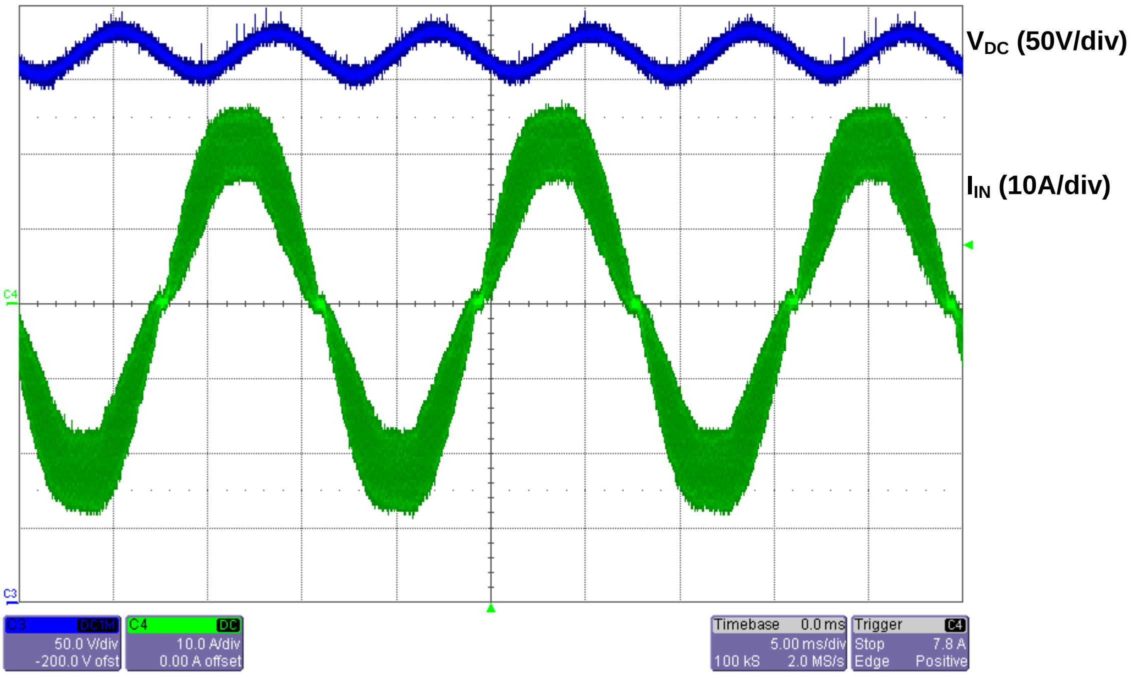


图 13 完整负载测试结果（I_{IN} = 16 A_{RMS}）

表 3 功率因数和输入功率测试

	V_{AC} [V]	I_{AC} [A]	功率 [kW]	功率因数 [%]
图 13	220	16	3.5	99

＊ V_{AC}和 I_{AC}为 RMS 值

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
19521 E. 32nd Pkwy, Aurora, Colorado 80011 USA
Phone: 303−675−2175 or 800−344−3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303−675−2176 or 800−344−3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800−282−9855 Toll Free USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81−3−5817−1050

ON Semiconductor Website: **www.onsemi.com**

Order Literature: http://www.onsemi.com/orderlit

For additional information, please contact your local Sales Representative