

3500W 与 6000W 高档开关电源的剖析

刘胜利 (深圳中电公司电力所, 广东 深圳 518031)

摘要: 剖析了直流输出 48V/70A 与 350V/10A 两种 3500W 和 48V/112A 与 350V/17A 两种 6000W 高档开关电源的电路设计与元器件应用特点, 并提出了有待继续分析的问题。

关键词: 功率因数校正; Buck-Boost 变换器; 分段式控制

1 引言

在 2001 年 7 月, 有位电源技术爱好者送来了两种据称是“军用绝密级”的高档电源各 2 台, 希望我能作专题解剖, 深入分析, 以消化吸收其先进技术。

该电源铁壳上的铭牌标明, 是 IBM 公司的“Bulk”大型舰船专用电源。

一种是直流输出 48V/70A 的长型通信电源, 长×宽×高=70cm×22cm×12cm, 重量约 14kg。电网输入三相 380~415V(电流 13A), 也可降低输入 200~240V(电流 24A), 频率 50~60Hz。这种电源装有电风扇强迫风冷, 还在外壳上安装了一只三相高压大开关。电网输入先经大屏蔽盒滤波。

另一种是直流输出 350V/10A 的短型特种电源, 长×宽×高=40cm×30cm×8cm, 重约 10kg, 无强迫风冷, 散热器也较短。其铁壳上铭牌标明为电网三相输入, 有三种输入范围: 200~240V、380~415V、460~480V。低电压时 $I_{IN}=25A(\text{MAX})$; 其输出直流为 350V/12.5A(MAX)。电网频率 50~60Hz。

2 3500W 电源解剖

解剖工作第一步是拆焊两种(两台)电源主板上的大功率元器件, 共有三类:

- 1) 最重的大号磁性组件主功率变压器和 Boost 储能电感器, 铁粉芯磁环电感 5 只;
- 2) 大号 MOSFET、IGBT 功率开关管模块, 和两只电网整流器模块 P425 等;
- 3) 大号高压铝电解电容器 940 μ F/450V4 只, 220 μ F/450V2 只, 以及多个 CBB 高频、高压、无感、无极性聚丙烯大电容器, 都是优质的突波吸收元件。

2.1 IR 公司的功率器件

首先, 让我意外新奇的是: 均为 IR 公司商标的 MOSFET、IGBT 大模块, 其产品型号标记居然都被假代号替换, 它们在 IR 公司厚本产品手册上均查不到。

- 1) 侧壁贴出一个 IGBT 内接一只二极管的模块, 标号为“F530(9604)”、“F826(9615)”、“F1670(9726)”、“F4702(9845)”等。
- 2) 从电路判断是一个 MOSFET 内含一只二极管的模块, 标号为“M4005(6315)”、“M4427

(9624)”、“M3422(9611)”等。

3) 从电路判断是二只 MOSFET(半桥双管)的模块,标号为“M5220(9708)”、“M5662(9726)”、“M3419(9603)”、“M6768(9814)”等。

在市场上从未见过这种特殊外壳,每只重近 100g 的 MOSFET 大模块。每台电源用 4 只,其散热顶层的铜块厚达 6mm,长×宽=9.2cm×2cm。48V 电源有炸裂。

4) PFC 控制板上的主芯片标记为“53H1747”,4 台电源均同,本应是 UC3854。

我先把拆焊下来的 IR 公司产品 MOSFET 和 IGBT 共 8~9 只,带到 IR 深圳分公司找技术人员询问和鉴定,回答是“军用绝密级”产品,非工业民品,故手册上无。按 3500W 电源分析,该 MOSFET 反向耐压应在 500V~600V,工作电流在 30A~40A。由于 IR 代理商确认了这两种大功率电源主板上使用的大号高频开关管,是为军用装备特制的高档产品,为了保密才改用假代号。因此,值得下功夫认真细致地对两种 3500W 电源作深入解剖、全面测量、专题分析。随后我又几次在供货商处查看多台开盖电源主板上的 MOSFET、IGBT 模块侧壁商标,并详细记录主要符号,才发现 IR 公司设在墨西哥(MADEINMEXICO)厂地的特制 MOSFET,暗藏了下述重要标记:

——凡是在最下层标上“82-5039+”者,不论假代号怎么变,均为半桥双管 MOSFET,如“M7471(9846)”、“M3937(9613)”、“M3438(9602)”、“M5706(9732)”、“M3467(9602)”;

——凡是最下层标记为“82-6252+”者,不论假代号如何换,均为单管 MOSFET 加一只二极管,如“M7453(9845)”、“M4045(9616)”、“M3721(9609)”、“M5394(9714)”、“M3161(9547)”、“M3453(9602)”等。

2.2 EC 公司的电容器

电源上使用的 EC 公司 CCB 高压无极性电容器,其工艺之精致,市场上难见到。

- 1) 每台电源用 3 只大号长园柱形 CBB—2.5 μ F/DC850V, $H \times D = 6\text{cm} \times 2.4\text{cm}$;
- 2) 用 2 只椭圆形 CBB—8 μ F/DC500V, $L \times W \times T = 4.7\text{cm} \times 3.9\text{cm} \times 2.6\text{cm}$;
- 3) 每台用 2 只 CBB—1.0 μ F/DC850V(扁平形、4 引脚),上述三种电容器用在三相输入滤波与 Boost 电路;
- 4) 48V/70A 通信电源输出滤波电容器 CBB—50 μ F/DC100V,是最粗胖的,无极性;
- 5) 350V/10A 特种电源输出滤波电容器 CBB—3.3 μ F/DC500V,均用半透明硅胶封装。

2.3 磁性元件

对两种 3500W 高档电源主板上实用的大型磁件组合拆开细看,其特殊的设计结构和选材,让我大开眼界,并悟到多项技巧。

2.3.1 主功率变压器漆包线绕组和绝缘胶带

拆解之后发现，两种 3500W 电源均是用两块大号磁环叠合而成。每块磁环的外径达 $\phi 73\text{mm}$ ，磁环厚（高）12mm，其绕组线的宽度为 $\phi 18\text{mm}$ 。选用磁环在 100kHz 开关高频时不存在漏感问题；而两块扁平面磁环叠合在一起，再紧绕制主变压器的原边绕组和副边绕组、加多层绝缘胶带等。在两块金属铁粉芯磁环平面之间，实际上仍然存在许多小的天然气隙（虽已压紧靠拢），这使得主功率变压器在重负载高频大电流工作时，抗饱和能力大增。这与大号功率铁氧体磁芯的截断面被细磨抛光“镜亮”的状况大不相同。

美、德公司在大功率高频开关电源关键部件上采用的先进技术值得借鉴。可以预计，如果 3500W 电源的主功率变压器改用传统常规的 EE85 厚型铁氧体磁芯，不仅体积和重量会成倍增大，而且过载抗饱和能力会明显降低，使电源在浪涌冲击下损坏 MOSFET 功率管的几率大为增加。由 Ascom 研制的 6000W—48V/112A 大功率电源，其主变压器磁芯改为三块 $\phi 73\text{mm}$ 扁平磁环叠合，这个惊人之举太巧妙、独特而意义深远，十分值得学习采纳。

2.3.2 Boost 变换器的方形铁壳储能电感器

拆解后才发现新奇的结构与选材。350V/10A 电源 Boost 电感器是采用三付 6 块 EE55 铁氧体磁芯复合而成，但其中心柱截面气隙达 5.2mm（每块为 2.6mm）。Boost 储能电感器的绕组导线并不用常规的多股 $\phi 0.47\text{mm}$ 漆包线卷绕，而是采用两条极薄的（厚度仅 0.1mm）、宽度 33mm 红铜带叠合，每条薄铜带总长约 6.5m，叠合压紧在（可插 6 块 EE55 磁芯的）塑料骨架上共绕 26 圈，再接焊锡导线引出，用多层耐高压绝缘胶带扎紧包裹。这种特殊薄铜带工艺绕制的 Boost 储能电感量 = $267\mu\text{H}$ 、 $Q=0.36$ ，它对于减小高频集肤效应、改善 Boost 变换器开关调制波形、降低磁件温升均有重要作用。

这又是一项前所未见的重大技术革新。多年来电源技术论文中有关 PFC-Boost 磁件的设计论文尚未见过这种报道。前几年我在 2000W-PFC 试验时换用几种大号铁粉芯磁环，或用较大罐形铁氧体磁芯加大气隙，绕制的 Boost 储能电感器仍发热过快、过高，效果不理想。现受到很大启发。

2.3.3 附加谐振电感器

拆焊 350V/10A 电源时，发现主功率变压器原边绕组串联的附加谐振电感器，是一种直径为 $\phi 33\text{mm}$ 的铁硅铝磁环，绕组用多股细线绕 3.5 圈，电感量为 $3.2\mu\text{H}$ 。而拆焊 6000W 电源 350V/17A 输出型，其原边串接的附加谐振电感器是用 $\phi 42\text{mm}$ 的铁硅铝磁环。比较几年前试验用的 1000W、2000W、3000W 电源，曾用加气隙的 EE55、EE65、EE70 铁氧体做附加谐振电感器，它们比主功率变压器磁芯只小一个等级，且温升较高。可见改用铁硅铝磁环，能大大减小附加谐振电感器重量和体积，是发现的又一项新技术。

为了准确绘制两种 3500W 电源主板上的所有元器件焊点位置，印制板铜箔走线，以便画

出真实的电源电路设计图，我预先测量尺寸，尽量避免焊点，在主板中间位置锯开了印制板（厚 2mm 的玻璃纤板），终于按 1: 1 的实际比例，用 2 张 A4 复印纸即可绘制出电源主板正面元器件布局图、两块控制板焊点位置等。再用 2 张 A4 白纸绘制电源主板背面印制板铜箔走线、一些贴片阻容、许多穿孔焊点定位等。并由此初步绘出了 3500W 电源的主功率变换电路，如图 1 所示。两种电源的设计结构大同小异，并给出了图 2 总方框图与 PFC、全桥控制板的关系图。

3 3500W 两种电源主电路的特点与分析

从实体解剖、拆焊绘制 48V/70A 通信电源和 350V/10A 特种电源主板上的所有元器件、印制板铜箔正反两面实际走线、众多焊点的真实定位（有的穿孔、有的并不穿孔只在单面），由此绘出的图 1 主功率变换电路图，以及图 2 电源总结构框图与 PFC、全桥控制板相互关系，看出一个总体规律。

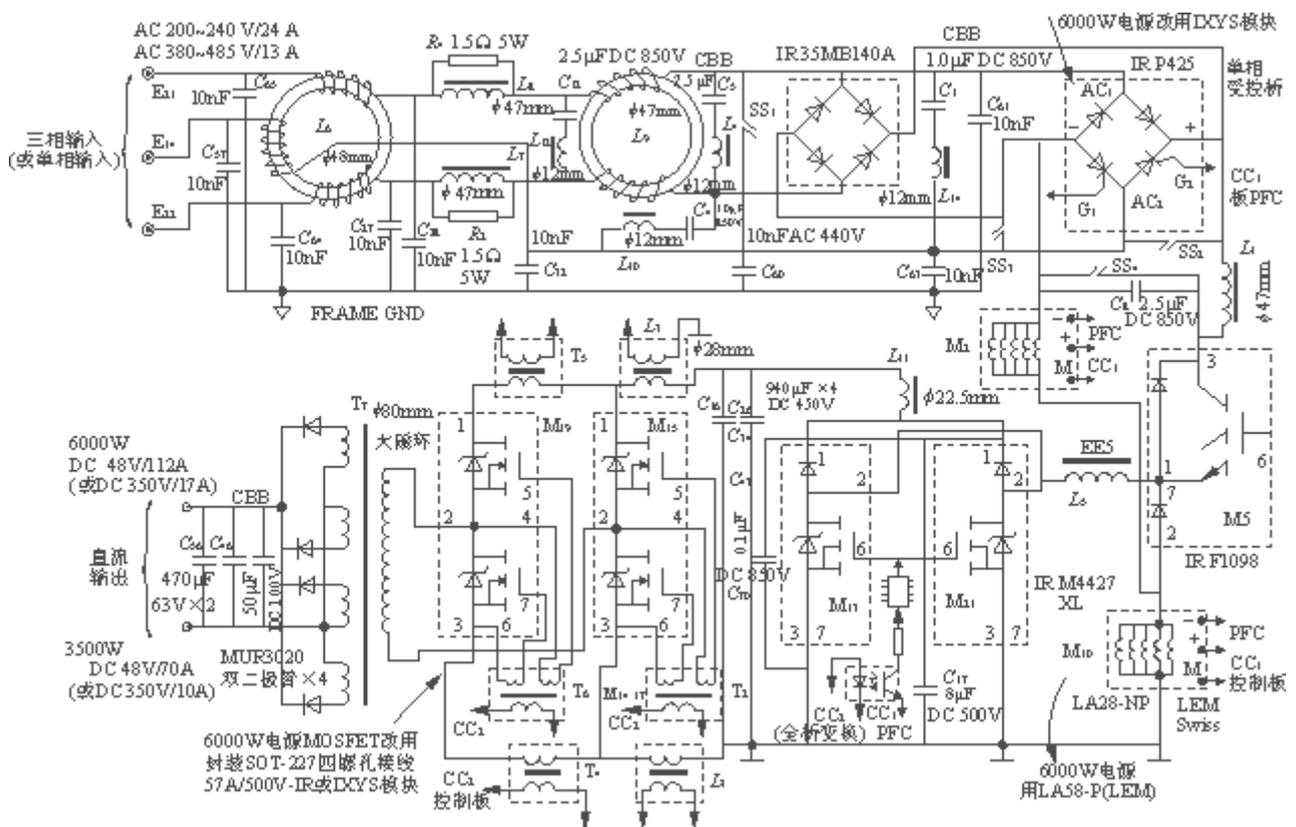


图 1 3500W、6000W 高档开关电源主功率变换器（三环节）电路图初拟

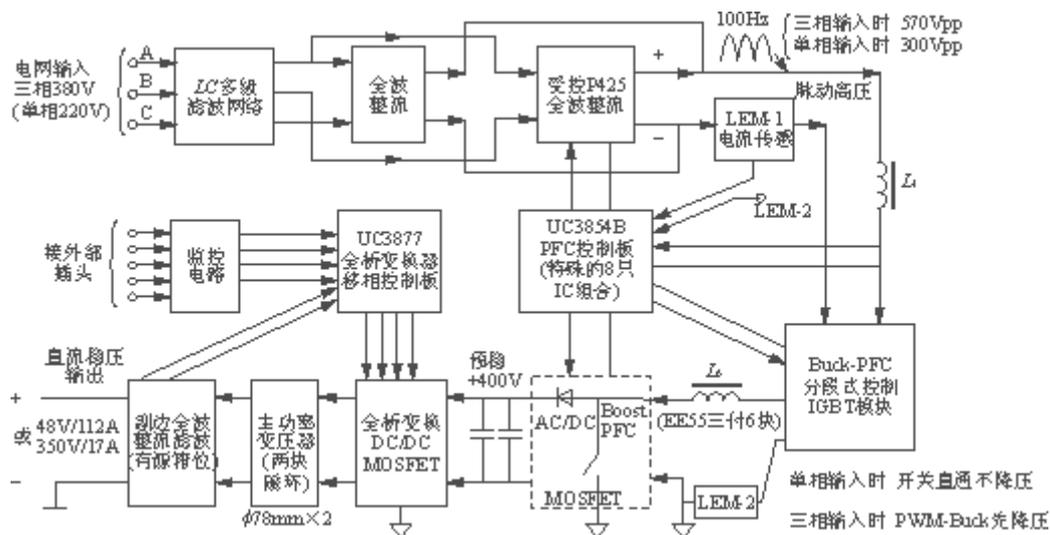


图 2 3500W、6000W 高档开关电源总方框与 PFC、全桥控制板关系图

1) 两种直流输出电压和电流大不相同的 3500W 高档电源 (V_o 、 I_o 均相差 7 倍)，其主功率变换电路的三大环节基本相同，即电网输入滤波整流电路；PFC 系统的 Buck-Boost 组合电路亦分段控制；全桥变换器移相式控制 ZVS 软开关电路。

2) 两种电源的 PFC 贴片元器件控制板完全相同。有 8 只 IC 和上百个阻容。包括 PFC 控制板与电源主板连接的双列插头 16 芯焊脚也完全相同。高密度的 PFC 贴片控制板仅厚 1.0mm，但解剖发现印制板内部还有两个夹层电路设计。

3) 两种电源的贴片元器件高密度全桥控制板实体大不相同，其主芯片均用 UC3877。48V/70A 电源全桥控制板单面布元器件。其总面积比双面均焊贴片元器件的 350V/10A 电源全桥控制板大一倍；单面元器件的印制板夹层铜箔走线也较简单些。两种电源接外壳监控电路插座结构也不同。48V 电源全桥控制板上与主芯片 UC3877DWP 配合的另外 7 只 IC 是 LM339X2，74HC05，74HC86，LM358X2，MAX875。350V 电源全桥控制板与主芯片 UC3877DWP 配合的另外 8 只 IC 是 OP177G、AD620、LM393X3、LM358、74HC05、74HC86 等。48V/70A 通信电源长 70cm，主板空间宽裕。但该电源 Boost 储能电感器磁芯只用了两付 4 块 EE55，功率容量偏小，有两台电源炸毁 Boost-MOSFET，是设计失误。

4) 350V/10A 电源实体副边整流之后加设了有源箝位电路，使主功率变换器副边也实现软开关，明显降低了在空载恶劣条件下电源整机的高频噪声。特别是 350V 电源的 Boost 储能电感器设计是采用三付 6 只 EE55 磁芯组合（中心柱气隙均 5.6mm），没有发现一台 350V 电源炸 Boost-MOSFET。说明该专题设计组成功了。

表 1 及图 3 分别给出了一台 350V/10A 电源在空载恶劣条件下，仪器测量打印的数据和波形。图 4 给出加负载 400W 之后测量打印的电网输入电流、电压波形，功率因数，频谱

特性等。

IBM、Ascom 电源把市电三相输入，巧妙地先分解成两个单相输入，然后再分别作全波整流，其中一只受控。这在大功率开关电源设计上具有重大优势和实用价值。普通的三相 PFC 变换器输出电压高达 DC760~800V（有的甚至 DC1000V）这就要求后级变换器的功率开关管耐压达 DC1000~1200V。因此，国际上热门研究用三电平软开关变换器克服该难题，它需要多串联一只开关管降低反向电压，使电路元器件及成本明显增加。而 IBM 独辟新路，用较简化方法解决了该难题。图 4 为加载波形。图 5 给出了 350V/10A 电源在 4 种不同负载条件下，测量打印的电网输入电流、电压波形等。

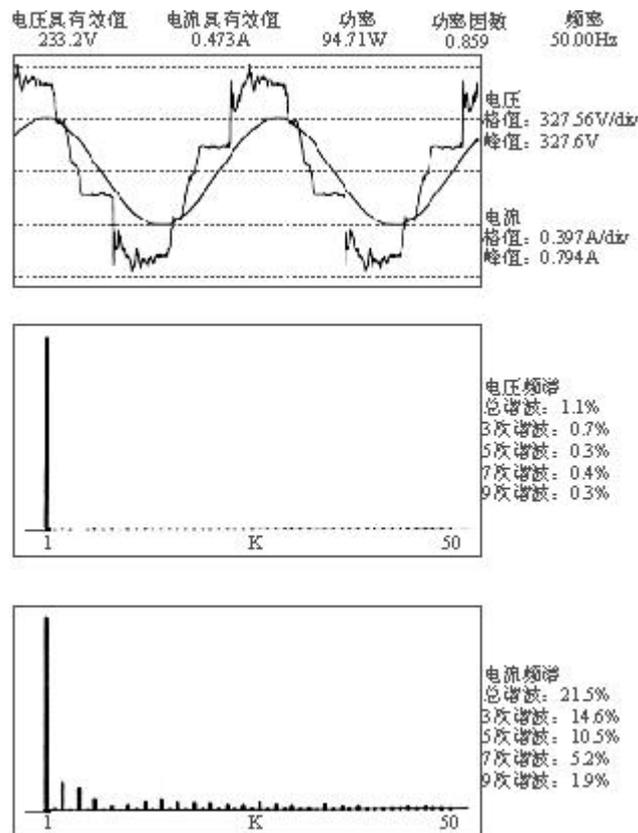


图 3 用 PF9811 测量仪及专用软件、配合联想电脑测量打印的电源波形与数据

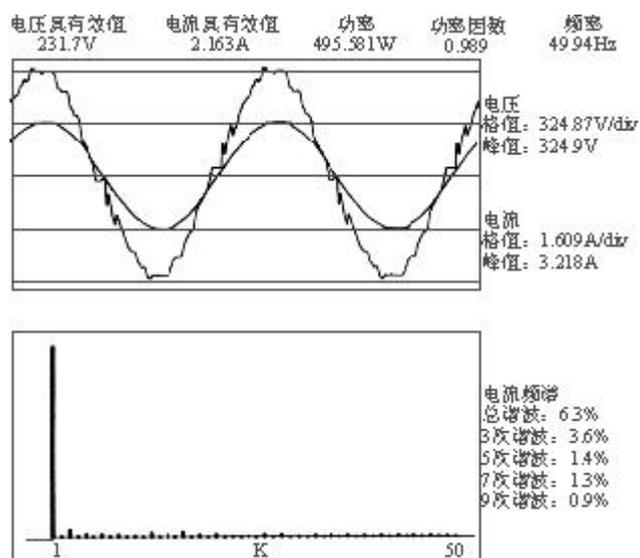
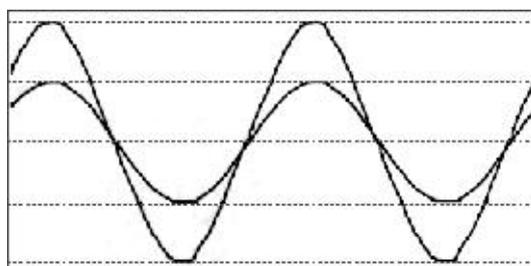
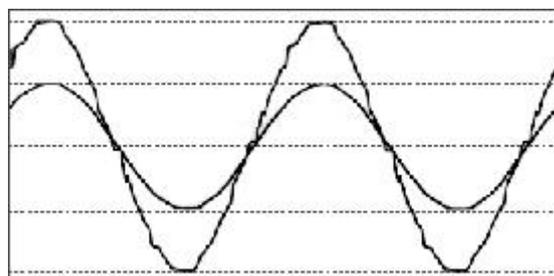


图4 350V/10A 电源在加载 400W 后

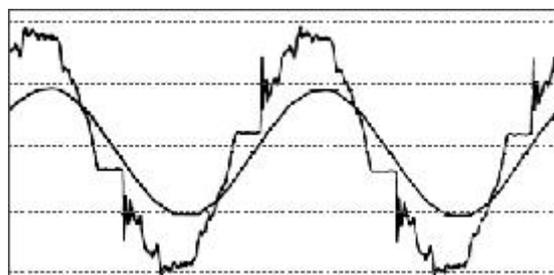
测量打印的电网输入波形、电流频谱（省略了电压频谱）



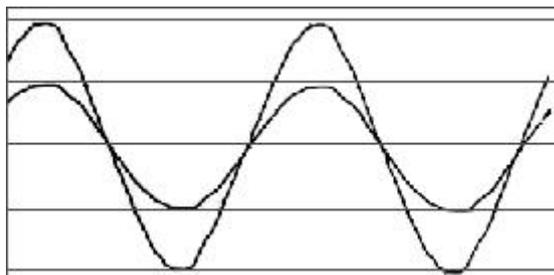
(a) 中等负载: 228.5V/5.718A, 1303.69W, $PF=0.998$



(b) 较轻载: 230.3V/3.884A, 891.35W, $PF=0.996$



(c) 极轻载: 232.9V/0.752A, 163.18W, $PF=0.932$



(d) 重载：221.2V/9.677A，2146.52W，PF=0.999

图 5 在 4 种不同负载时测量打印电源的电网输入电流电压波形

表 1 PF9811 配合电脑、专用软件测量打印的第 2 页测试报告：高次谐波数据群

谐波次数	电压谐波	电流谐波
1	100.0%	100.0%
2	0.0%	0.5%
3	0.7%	14.6%
4	0.0%	0.1%
5	0.3%	10.5%
6	0.1%	0.3%
7	0.4%	5.2%
8	0.0%	0.3%
9	0.3%	1.9%
10	0.0%	0.2%
11	0.4%	2.2%
12	0.0%	0.4%
13	0.4%	3.7%
14	0.0%	0.2%
15	0.1%	4.9%
16	0.0%	0.4%
17	0.2%	3.6%
18	0.0%	0.0%
19	0.1%	3.0%
20	0.0%	0.3%
21	0.0%	2.8%
22	0.0%	0.2%
23	0.0%	2.0%
24	0.0%	0.1%
25	0.1%	1.9%

谐波次数	电压谐波	电流谐波
26	0.0%	0.3%
27	0.1%	3.6%
28	0.0%	0.2%
29	0.0%	2.1%
30	0.0%	0.2%
31	0.0%	1.5%
32	0.0%	0.1%
33	0.0%	0.6%
34	0.0%	0.2%
35	0.0%	2.2%
36	0.0%	0.1%
37	0.0%	1.1%
38	0.0%	0.2%
39	0.0%	1.2%
40	0.0%	0.1%
41	0.0%	0.2%
42	0.0%	0.1%
43	0.0%	0.2%
44	0.0%	0.3%
45	0.0%	0.8%
46	0.0%	0.1%
47	0.0%	0.8%
48	0.0%	0.2%
49	0.0%	0.2%
50	0.0%	0.0%

4 6000W 电源剖析

经实体解剖证实，两种 3500W 电源的 PFC 贴片控制板电路结构、元器件完全相同。随后解剖了两种新搞到的 6000W 电源证明，其 PFC 贴片控制板电路结构与原 3500W 也基本相同。Ascom 公司 2000 年投产的两种高档 6000W 电源（直流输出 48V/112A 和 350V/17A），是更换淘汰 IBM 军用电源的工业级产品。说明了 PFC 控制电路设计已十分成熟，没有必要再改。

在打开 6000W 电源的外壳铁盖后，看到其大号的 CBB 多只高压电容器上，均标出了厂

年月为“9926”、“9938”等。其中 48V/112A 通信电源的散热器加高了 2~3 倍，重达 8kg；细看电源主板上的 5 只大号 $\phi 47\text{mm}$ 磁环电感器与 3500W 电源相同，主功率变压器和 Boost 储能电感器的外形结构也相似相近，只是又加长了约 30% 或体积增大了些。后来解剖发现两种 6000W 电源相同的 Boost-PFC 大电感器磁芯增加到 4 付 8 块 EE55 组合而成；48V/112A 电源的主功率变压器改用 3 块 $\phi 73\text{mm}$ 扁平磁环叠合而成。

6000W 电源的 MOSFET 均改用工业级标准型号公开的新品，是 IR 公司或 IXYS 产品，每台电源用 6 只 MOSFET 均为 SOT-227B 封装的四螺孔接线形式，并新增加一块专用功率印制板紧固 6 只 MOSFET 的漏极、源极、栅极螺孔连线片，明显改善了维修更换条件。功率板上的 99”驱动变压器和驱动 IC-M1C4421(99”)等，与 3500W 电源相同。

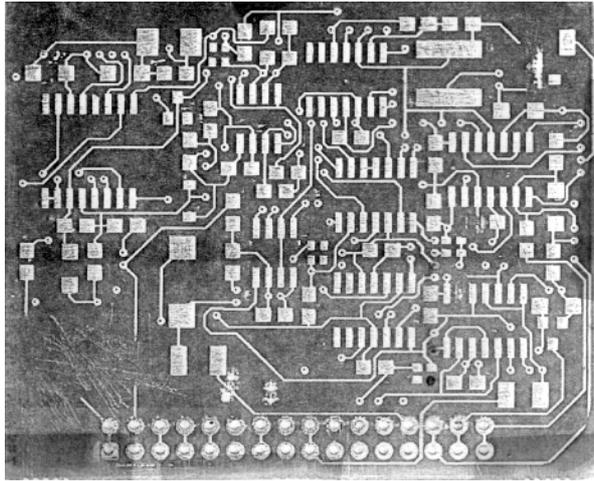
5 高功率因数的实现

在实体拆焊解剖原贴片式 PFC 控制板时发现二个非常奇怪的现象：一是 PFC 主芯片 IC 脚 16 驱动输出端铜箔走线居然被悬空，不接电路板上任何其他元器件；二是 IC 脚 14 反常地接地线，它原是 IC 内部高频振荡器的 CT 电容器外接引脚端。为此，我于 2001 年底特别请教了李龙文先生，他是十年前我国最早消化、吸收、引进美国 Unitrode 公司专用 IC 的开关电源应用专家。

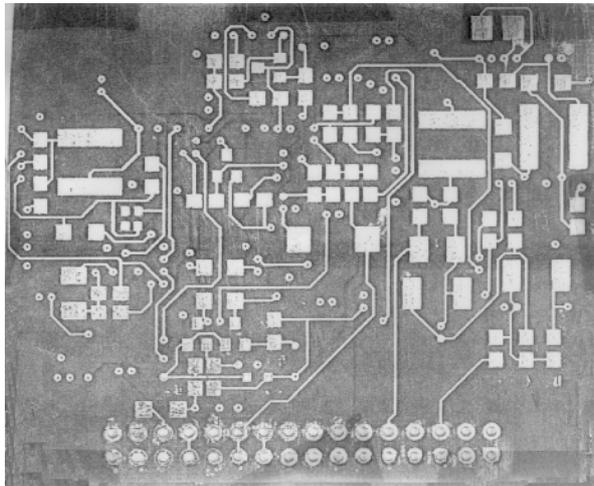
早期问世的 UC3854，作为高频有源功率因数校正器的代表性产品，专用于大功率电源抑制谐波电流污染电网，它是国际上经典的 PFC 功率因数校正“绿色能源”产品，早已选作美国的国家电源工业标准。十几年来专业期刊上发表的研究文献，均是整体选用 UC3854 作为 PFC 电路主芯片，没有见过停用 UC3854 内部高频振荡器和驱动输出的 8 只 IC 组合的 PFC 设计。

为什么 3500W 电源的实测 $PF \geq 0.999$ ，能达到如此高性能指标，结论只有在调查的末尾才可得到。在充分准备之后，用特殊烙铁头逐一拆焊了高密度贴片 PFC 控制板上的近百个元器件，并逐一粘固在事先作了编号的硬壳白纸上。随后又细致测量了每一只电阻器和电容器的实际数值；并用万用表的 $R \times k\Omega$ 档（内含 1.5V 电池）、 $R \times 10k$ 档（内含 9V+1.5V 电池）量程测量记录了十几只二极管的正向电阻值和反向电阻值，包括整流、开关、稳压二极管，肖特基二极管等。

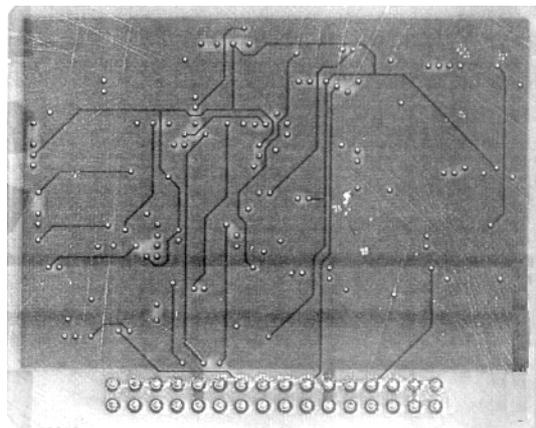
现给出 PFC 控制板拆焊全部贴片元器件，并用砂纸磨掉焊锡和绿漆之后，显露出来的印制板铜箔走线，其正面和反面分别见图 6(a)及图 6(b)。然后继续磨掉铜线后，两面分别显现的内部双夹层走线、焊点、绝缘圈等，见图 6(c)及图 6(d)。



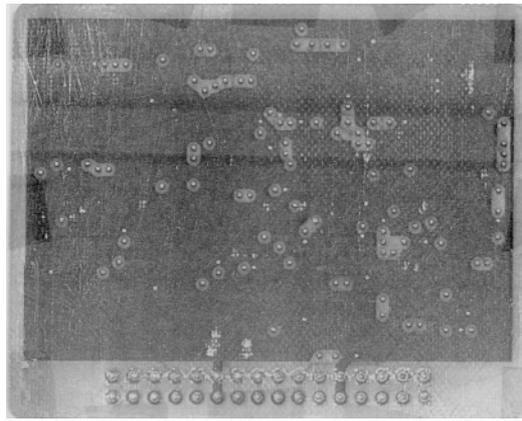
(a) 印刷板正面



(b) 印刷板反面



(c) 内部夹层一



(d) 内部夹层二

图6 PFC控制板拆焊磨漆后显露的铜箔线及磨掉铜箔后显出了内夹层线点

图7是放大的PFC控制板8只IC各引脚铜箔走线实体布局图。经过反复测查两面的穿心焊点连线之后，可绘制真实的PFC控制板电路图。现给出主芯片M1-UC3854（假代号53H1747）与其他7只IC内部单元电路相连的关系网图（图8）。并给出PFC控制板经插脚与电源整机主板上重点器件的连线简图（图9）。

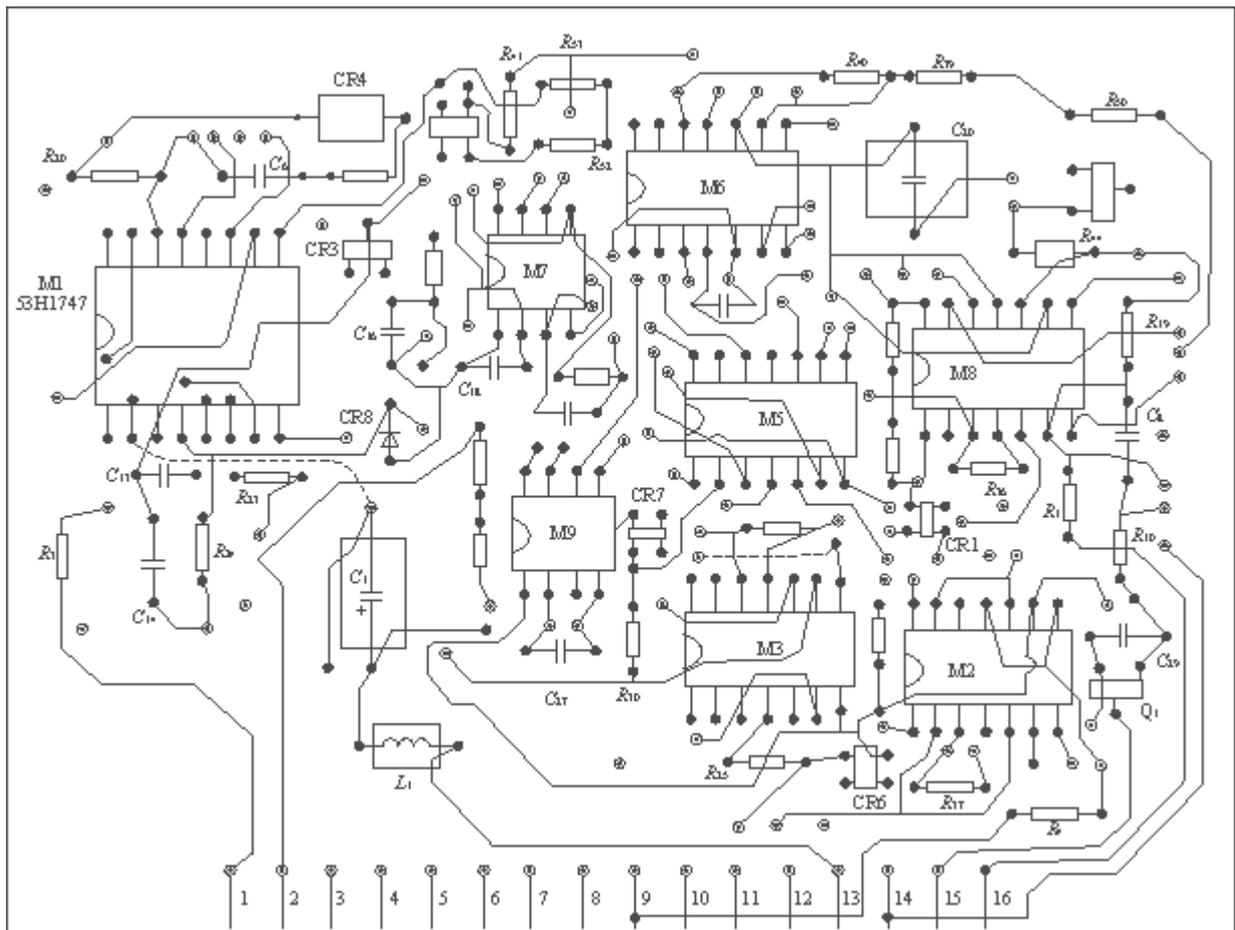


图7 放大加工后按铜箔走线和焊点绘制的8只IC与阻容等连线图

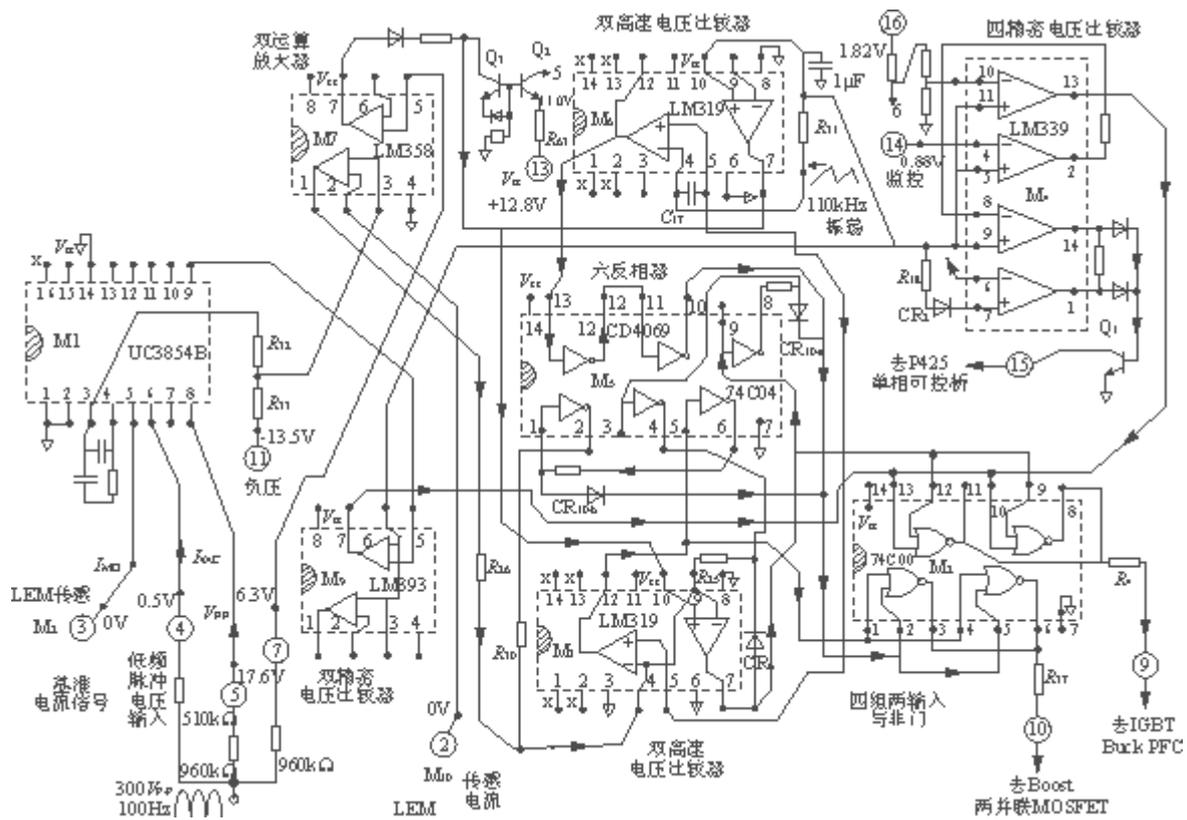


图8 PFC控制板上主芯片M1与7只辅助IC内部单元电路关系网图

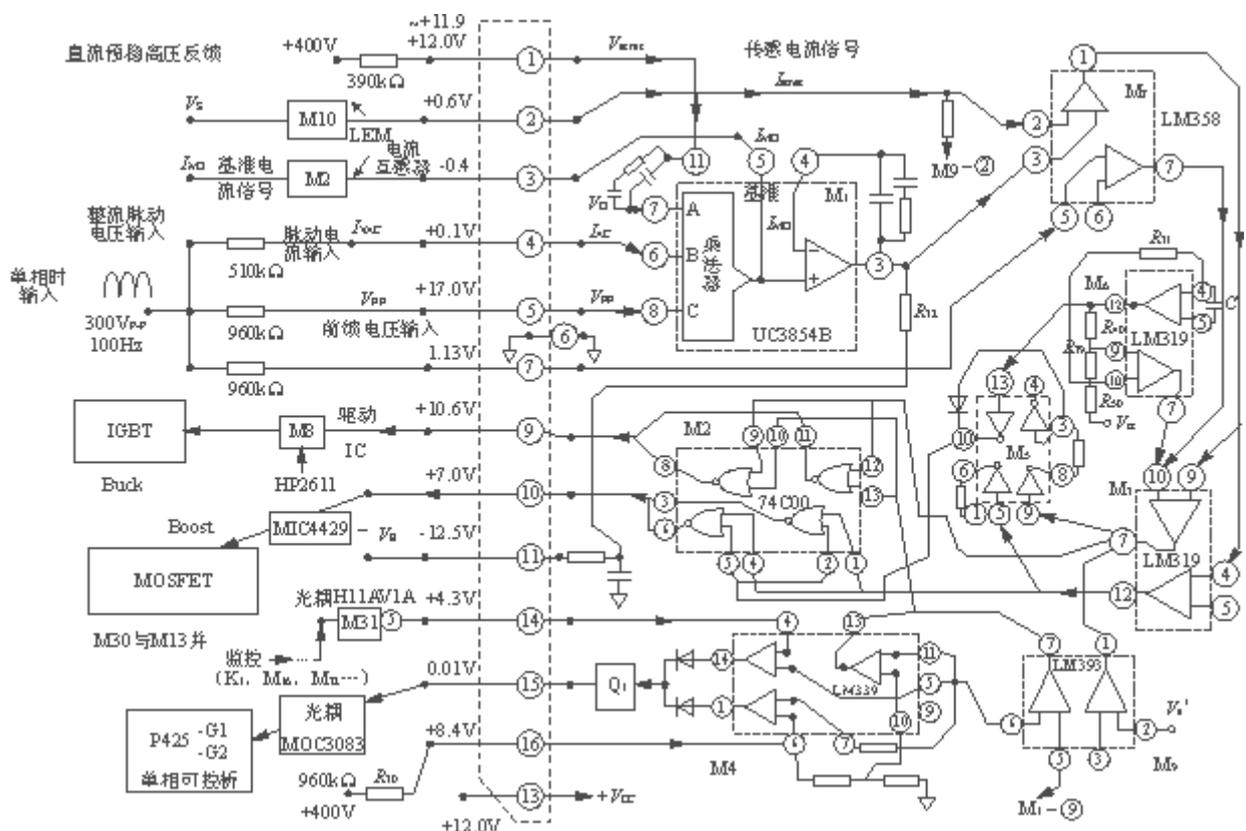


图9 PFC控制经插脚与电源整机主板上主要元器件连线简图

两种 3500W 电源主板上完全相同的 PFC 控制板电路，它的奇特之处在于：其主芯片 UC3854 只利用了内部电路的前半部分，即线性模拟乘法器和电流误差放大器等；而其他重要的单元电路，如高频振荡器、PWM 比较器、R-S 触发器、逻辑控制电路和开关脉冲预放大驱动器，却反常地留给了 PFC 控制板上其他 IC（LM319，LM339，LM358 和 LM393，74C00，74C04 等共 7 只）来分别完成，设计者开辟新路，是为了扩大主芯片控制范围。

PFC 控制板是电源整机实现高功率因数值的指挥中心。它分 3 路分别经 3 个插头焊脚送往 3 大功率器件，对 3500W 高档电源 3 个环节实现控制：

- 1) 电网输入整流器 P425 单相全波整流可控桥，二可控端为 G1、G2；
- 2) Buck-PFC IGBT 功率开关管 实行分段式控制，在三相或单相输入时工作状态不同；
- 3) Bcost-PFC MOSFET 功率开关管 控制脉冲经脚 10 输出，又经驱动 IC 放大。

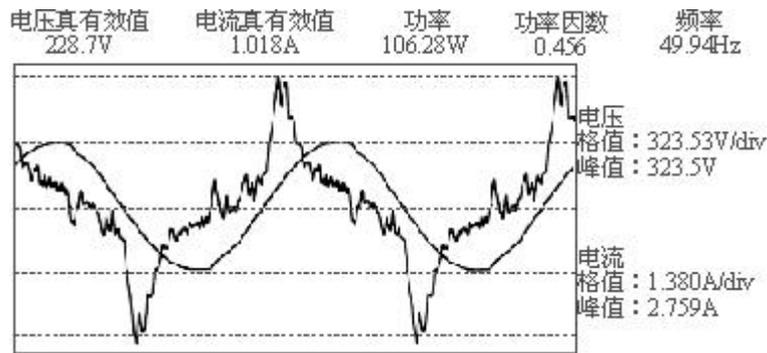
对两种 3500W 大功率电源整机通电加载，在较重负载时实测 $PF \geq 0.998$ ，充分证明了 PFC 功率因数校正器电路系统的性能高超、设计成熟、巧妙独特。它在电路整体结构上是一个 Buck-Boost 组合的 PFC 控制电路，对 IGBT 开关管采用分段式控制，即当市电输入电压为三相 380V 时，全波整流器输出的 100Hz 低频脉动电压峰值达 570V 左右，则 PFC 控制板自动送出 PWM 脉冲到 Buck 电路的 IGBT 栅极，以 PWM 方式对其输出开关脉冲先作降压处理，再送往 Boost 变换器储能电感和 MOSFET、二极管等。当市电输入电压为单相 220V 时，全波整流器的输出脉动低频电压峰值约 310V，于是控制电路自动关断 IGBT 栅极的方波电压，使 Buck 失效，IGBT 开关不再衰减脉动电压。

在家庭实验条件下只有单相 220V 电压。此时 IGBT 处于导通状态，在功率管 IGBT 栅极实测到的电压波形不是 PWM 矩形波，而是 310V、100Hz 脉动电压波形。因为栅极与射极处于直通状态。

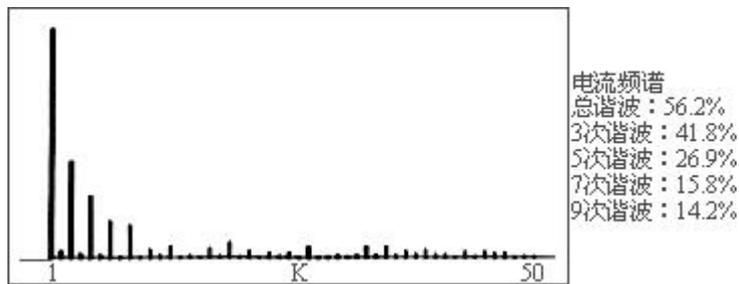
图 10 给出了在空载恶劣条件下，实际测量打印的 48V、70A 通信电源市电输入电流波形，和最敏感变坏的电流谐波与功率因数值：输入电流波形变为尖窄脉冲、且相位明显偏离输入电压的正弦波相位；总电流谐波高达 56.2%（3 次谐波为 41.9%，5 次为 26.9%，7 次 15.8%，9 次 14.2%等）；功率因数值剧降到 0.456，比 350V 特种电源空载时的 $PF=0.859$ 差了许多（它的电流总谐波仅 21.5%、3 次谐波 14.6%，5 次为 10.5%，7 次 5.2%，9 次 1.9%等）。

当 48V 电源加载到 440W 后，其市电输入电流波形明显转好，相位偏离也减小，敏感的电总谐波降至 15%，功率因数值大幅提高到 0.958，虽然它接近 350V 电源加载到 400W 后的 $PF=0.989$ ，但细看比较 48V 电流波形，显然台阶突起仍多尖，不如前者更接近正弦波形，且 350W 电源的加载后电流总谐波又显著减小到 6.3%。当 48V 电源再加载到 942.8W 时，其电流波形也进一步改善为小台阶，电流总谐波又降至 7.1%， $PF=0.987$ 。当 48V 电源加载到

1385W 时，输入电流波形才接近正弦波， $PF=0.995$ ，电流总谐波降到 4.0%。（见图 10，图 11，图 12 与表 2）。

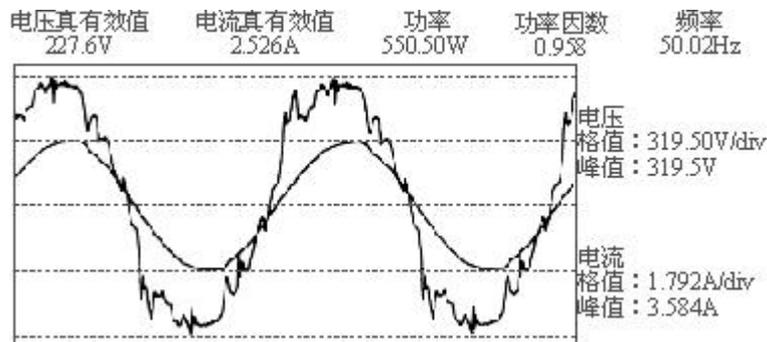


(a)市电输入电压电流波形

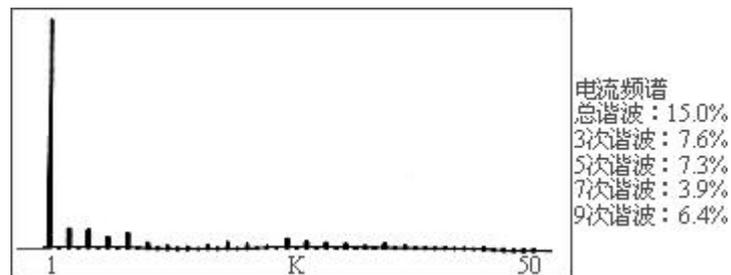


(b)电流频谱

图 10 空载恶劣条件下测量打印 48V/70A 电源市电输入波形、电流频谱

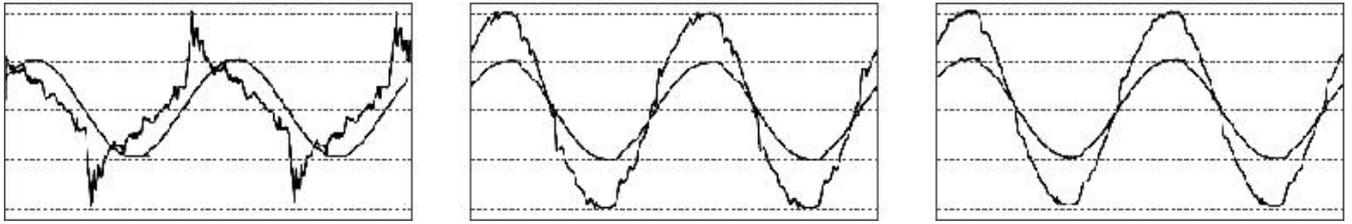


(a)市电输入电压电流波形

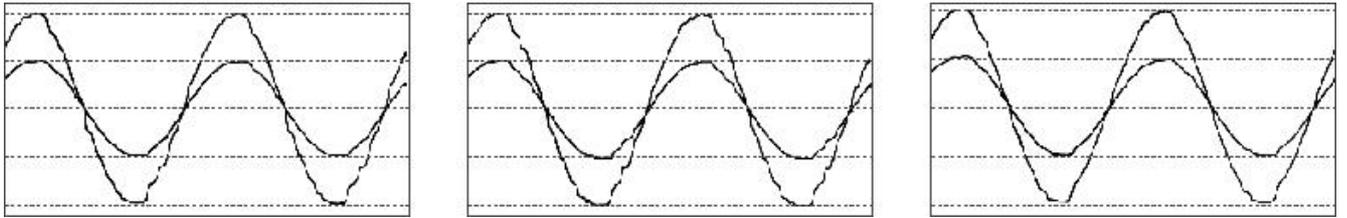


(b)电流频谱

图 11 加载 440W 后测量打印 48V 电源市电输入波形、电流频谱



(a)极轻载: 229.5V, 1.020A, 150.83W, $PF=0.645$
 (b)中载 I: 226.0V, 4.225A, 942.80W, $PF=0.987$
 (c)中载 II: 223.7V, 6.223A, 1385.04W, $PF=0.995$



(d)中载 III: 221.6V, 8.264A, 1826.50W, $PF=0.997$
 (e)重载 I: 219.3V, 10.362A, 2268.30W, $PF=0.998$
 (f)重载 II: 217.6V, 12.013A, 2610.56W, $PF=0.999$

图 12 测量打印 48V/70A 电源在另 6 种不同负载时的市电输入波形

表 2 48V/70A 电源在九种不同负载时的功耗、功率因数、电流总谐波、电压总谐波

	空载	极轻载	轻载 I	轻载 II	中载 I	中载 II	中载 III	重载 I	重载 II
功耗/W	106.3	150.8	550	731.7	9428	1385	1826	2268	2610
功率因数	0.456	0.645	0.958	0.978	0.987	0.995	0.997	0.998	0.999
电流总谐波/%	56.2	39.0	15.0	9.4%	7.1	4.0	3.4	3.3	2.5
电压总谐波/%	2.1	1.2	2.1	1.4%	2.3	2.1	2.2	2.5	2.2
3 次谐波电流/%	41.8	26.1	7.6	3.7%	3.1	1.3	0.9	0.8	0.9

满载时: 2904.6W, 13.08A, $PF=0.999$, 电流总谐波 2.8%, 电压总谐波 2.7%, 3 次谐波电流 1.0%

分别在空载、轻载、中载、重载、满载等多种不同条件下, 测量打印了多台 48V 电源和多台 350V 电源的许多波形、谐波数据、 PF 值后, 发现每种电源正常工作时的特性参数基本相似, 大同小异。350V 电源多台的主要性能指标, 都明显高于多台 48V 通信电源。

6 问题

下面为大功率开关电源技术研究者摆出了一些疑问和困惑。

实体解剖 48V/70A 电源主板电路元器件, 发现两个意外的反常设计: 一是直流输出端没有并联泄放电阻, 造成空载时副边整流回路电流剧减; 二是主功率变压器原边绕组没有串接附加谐振电感器, 导致全桥变换器滞后臂开关管轻载时不能实现零电压软开关, 使损耗大增。而相比较之下, 350V 电源不但原边绕组串接了铁硅铝磁环的附加谐振电感器, 而且副边整流

后还增加了先进的有源箝位电路。这究竟是 IBM 电源各个专题组的设计失误造成？还是 48V 中低压输出大电流电源实际存在的设计难题？或是舰上工作条件无空载？请国内专家帮助分析。

7 测量仪器介绍

杭州远方仪表厂 2001 年生产的 PF9811 智能电量测量仪，是测量各种电源多项电参数，并能够进行记录、数字处理、微机传输的专用设备。它对电网电压、电流、功耗、功率因数等测量精度达 1/1000；并提供专项测试软件给计算机。电源通电加载后它有 4 个红光显示屏同时给出 4 种电参量瞬态值。当需要测量并打印出电源的市电输入交流电压和电流波形、功率、PF 等时，只须按下“锁存”键，此时 4 个显示屏给出的数据，均转为特定负载条件下的稳态值，它们经 RS-232 接口送给计算机。按 PF9811 专用软件，每次连续打印出 2 页测试报告。第 1 页是图 3 中市电输入电流波形、电压波形、频谱特性；第 2 页是表 1 中 1~50 次电压谐波、电流谐波数据群。

特别是能精确打印出某个负载时电源市电输入电流波形，能最直观灵敏真实地反映 PFC 电路控制电源系统的功率因数校正结果。这为进一步深入解剖、参数试验、改进设计，提供了关键的判断依据和监测对象。这种“三合一”高档测量打印方法（PF9811+联想电脑+专用软件），是深入研究全桥变换器移相控制 ZVS 大功率开关电源的重要手段。

作者简介

刘胜利（1945—），男，高级工程师。曾编写彩色电视机 IC、显示器等三本专著，译著二本。编写了《现代高频稳压电源的实用设计》，详细介绍用新 IC、功率管和多种磁芯制作各类开关稳压电源，有大量的试验数据和实测波形及绕制多种主功率变压器、驱动变压器、滤波电感和谐振电感等工艺。