



作为发射极跟踪器。 $COMP$ 端电压相当于 $T4$ 基极电压和 $E-B$ 转换电压降的总和。 $COMP$ 端子上可达到的最大电压不断增加,直到基极电压不受二极管 $D11$ 的限制。

3.2.2 稳压器

电压调节器与逆变器的输出端电气耦合,其输出信号通过光耦合器传输至初级控制电路,从而实现电气隔离。如果稳压器与其他控制电路一起位于一次侧,就必须向一次侧传输与测量输出电压相对应的电隔离信号。在线性度、热稳定性等方面,对测量电压值传输的要求会更高,需要更复杂、更昂贵的电路。相反,普通光耦合器在传输稳压器输出时的轻微非线性和不稳定性,已被所使用的 PI 控制器充分补偿。

逆变器输出将被调节为 60 V 的恒定输出电压。著名的 TL431 型集成电路与电压基准一起用作运算放大器。

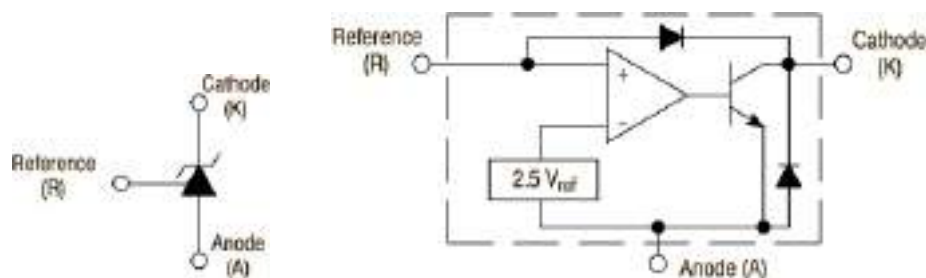


图 3-15 - TL431 电路功能图 [4]

图 3-15 显示了与 TL431 IO 内部结构相对应的电路。该电路用于作为齐纳二极管的可调电压基准。其优势在于电压基准的准确性和稳定性。不过,该电路通常用作稳压器。这可以通过将补偿元件连接到内部运算放大器来实现,类似于经典的 PI 稳压器电路。图 3-13 中的电阻器 $R10$ 、 $R19$ 和微调器 $R20$ 构成了一个分压器,其输入为转换器的输出电压。分压器的输出电压等于逆变器额定输出电压的 2.5 V。微调器 $R20$ 用于在恢复期间微调分压比。分压器的输出端与 $IC1$ 的控制端相连。连接在 $IC1$ 的 R 端和 K 端之间的电阻器 $R16$ 和电容器 $C15$ 与等效分压器电阻一起,决定了 PI 控制器的时间常数。

转换器的输出端还与前端电阻 $R7$ 相连,与齐纳二极管 $D12$ 和滤波电容 $C16$ 一起构成一个输出电压为 12 V 的稳压器。由于 $IC1$ 阴极和阳极之间的最大电压仅为 35 V,因此无法直接使用转换器 60 V 的输出电压为电路供电。同时,最好尽可能降低 $IC1$ 上的压降,



布尔诺理工大学电气工程与通信技术学院

使其不会受到热应力的影响。 $IC1$ 的阴极是稳压器的输出端，影响流经去耦光耦合器 $OK1$ 输入 LED 的电流。电阻器 $R9$ 为 $IC1$ 提供足够的电流。



如果逆变器输出电压超过额定值, $IC1$ 控制端电压会升至高于内部参考值 2.5 V , 内部运算放大器会增加内部输出晶体管的基极电流。控制器的输出电压将下降, 导致电阻器 $R15$ 的压差增大, 流过光耦合器二极管的电流增大。光耦合器的输出将导致 $IC3$ 的 $COMP$ 端电压降低, 从而限制转换器的峰值开关电流和输出电压。这就形成了必要的负反馈。

3.2.3 晶体管的激励

开关元件采用碳化硅晶体管。从控制角度来看, 它是一个标准的 MOSFET 场效应晶体管, 处于增益模式。开关是通过将其栅极充电至端子 G 和 S 之间的足够电压来实现的, 关键在于相应非线性栅极电容的充放电过程。为了在足够短的时间内烧毁晶体管, 必须提供相对较大的峰值电流。栅极电容充电开始时, 电压升高, 但晶体管保持关闭状态, 直到电压达到一定值。然后, 晶体管被接通。在此期间, 不仅栅极本身的电容会在充电过程中加到源极上, 漏极和栅极之间的寄生电容 (即所谓的米勒电容) 也会加到源极上。当开关期间晶体管上的电压开始下降时, 米勒电容的放电电流会导致栅极电容放电, 从而带走部分激励电流。如果在此期间激励电流不够大, 例如由于激励器布置不当的寄生电感或输出电阻过大, 栅极电压可能会再次下降并使晶体管 "旋转"。因此, 晶体管两端电压会再次上升, 米勒电容会导致栅极电压随充电电流上升。这样就会产生危险的振荡。

向栅极提供一些电荷后, 晶体管实际上已经打开, 进一步增加电压将降低晶体管在 R_{DS} (导通) 状态下的电阻。晶体管放电时也会发生类似的过程。

所用晶体管的特性与激励电压的关系如图 3-16 所示。

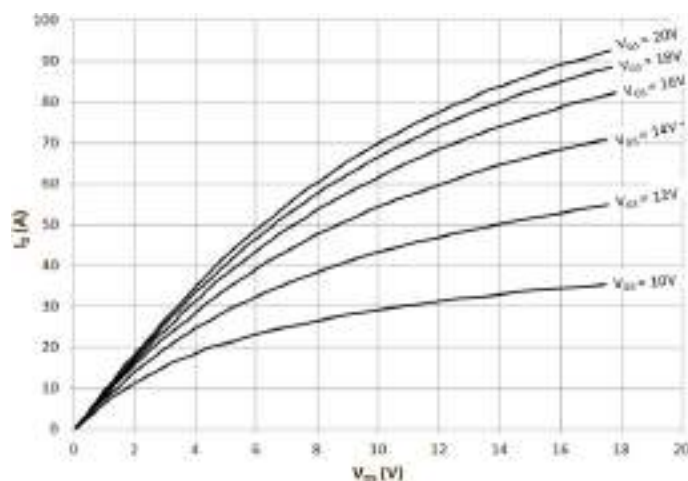




图 3-16 - $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 CMF20120D 晶体管的输出特性 [5].



建议用 20 V 电压切换晶体管。通过晶体管的峰值电流可达 20 A 左右。从输出特性中可以看出，当电源电路中出现欠压时，可以允许降低励磁电压，此时电阻仍不会显著增加至 15 V 左右。控制电路的欠压保护就是根据这一数值设计的。对于特定类型的晶体管，建议不仅要实现关断时栅极电压为零，还要实现-2 至-5 V 范围内的负电压。

所使用的控制电路可直接以高达 1 A 的峰值电流激励栅极。但是，它不能直接以负压激励晶体管。栅极充电通过限幅电阻 R_{23} 、二极管 D_{15} 以及由电容 C_{18} 和齐纳二极管 D_{16} 构成的连线进行。这使得激励电路的输出电压从 0 至 26 V 的范围转变为约 -4 V 至 20 V 的范围。在电源启动后的第一个脉冲期间，除了对栅极充电外，还通过二极管 D_{17} 对电容器 C_{23} 充电。这为电容器 C_{18} 充电提供了足够的电流脉冲。电容 C_{18} 的电压不断升高，直至超过齐纳二极管 D_{16} 的闭合电压。因此，电容器 C_{18} 上的电压会从控制电路的输出电压中减去，从而使栅极电压降低。当栅极放电时，这个带电电容器会使电平从 0 V 变为负值。

晶体管 T_5 可改善晶体管的开关性能。当 IO_3 的输出降至零时，电流开始流过晶体管 T_5 的基极，晶体管导通，并通过限幅电阻 R_{27} 对激励晶体管的栅极电容放电。

3.2.4 启动电路和稳压器

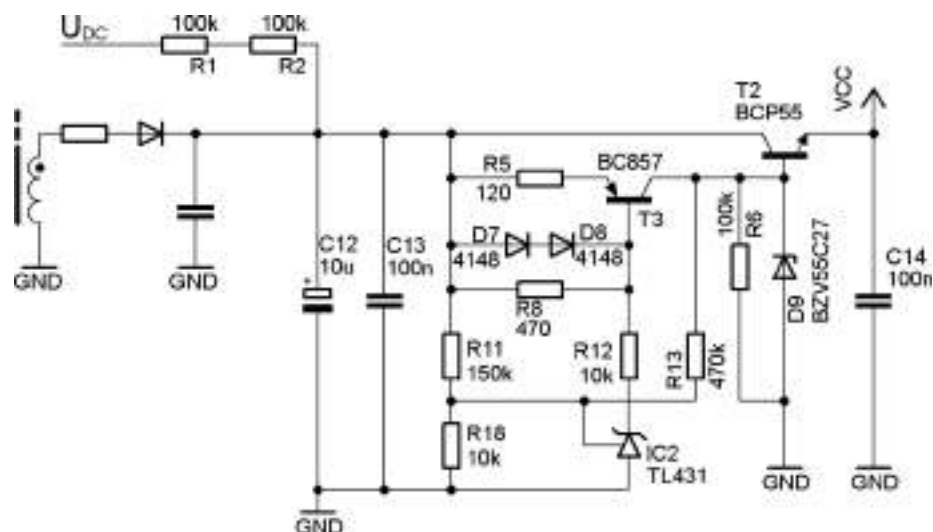


图 3-17 - 启动电路和稳定器示意图

为简单起见，控制电路由主变压器的辅助绕组供电，该绕组为电容器 C_{12} 充电。然而



布尔诺理工大学电气工程与通信技术学院

，当逆变器接通时，电容器放电，控制电路不工作。因此，有必要确保在启动时通过其他方式为电容器充电。这可以通过电阻 $R1$ 和 $R2$ 来实现，它们直接以较小的电流对电容器充电。



来自中间电路。两个电阻串联使用的原因在于其抗电压能力和功率损耗分配。电阻的阻值必须尽可能大，以避免在逆变器运行时造成不必要的功率损耗。同时，它们必须足够大，以便启动时的充电电流能覆盖启动电路和其他连接的非活动元件的一些漏电流。

启动时，电容器上的电压升高，同时控制电路通过晶体管 $T2$ 断开。当电阻 $R11$ 和 $R18$ 构成的分压器输出电压超过 TL431 内部基准确定的 2.5 V 值时， $IC2$ 将 A 端拉低至电路接地。电流开始流过电阻器 $R12$ ，并使被电阻器 $R8$ 保持在关断状态的晶体管 $T3$ 打开。晶体管 $T3$ 与 $R5$ 、 $D7$ 和 $D8$ 一起构成稳压器中齐纳二极管 $D9$ 的电流源。电流的大小取决于电阻 $R5$ 的大小。该电阻上的电压等于二极管 $D7$ 和 $D8$ 上的压降之和，其比例为晶体管 $T3$ 的 $E-B$ 结上的压降。由此产生的电流约为^{0.6} = 5 mA。 $\frac{120}{120}$

关闭电流源将激活稳压器。晶体管 $T2$ 在启动过程中被电阻器 $R6$ 保持在关断状态。当二极管 $D9$ 上的电压升高时， $T2$ 开始作为电压跟随器工作，并将稳定电压连接到控制电路。输出电压的大小取决于齐纳二极管 $D9$ 的电压和晶体管 $T2$ 的基极衰减。因此，输出电压将为： $27-0.6=26.4$ V。

在电源连接到控制电路和变流器启动之间的这段时间内，电容器 $C12$ 会被超过中间电路充电电流的电流放电，而当变流器启动时，电容器 $C12$ 一定会对位于稳定器后面的电容器充电。因此，电容器必须有足够的容量，而且稳定器开始运行时的电压水平必须大于逆变器运行时所需的电压，以使电容器能够在这段时间内桥接。因此，电阻 $R13$ 在开关电路中产生了滞后。电路在电压约为 40V 时接通，当电压降至约 32V 以下时断开。为辅助绕组供电时的工作电压范围必须在此范围内。



3.3 建议 DPS

整个转换器由一块双面覆铜板组成。电路板是在学校条件下制造的，因此无法使用层间接缝来实现更优化的设计。控制电路主要使用 SMD 元件，其中一些放置在电路板的底部，以减小尺寸。

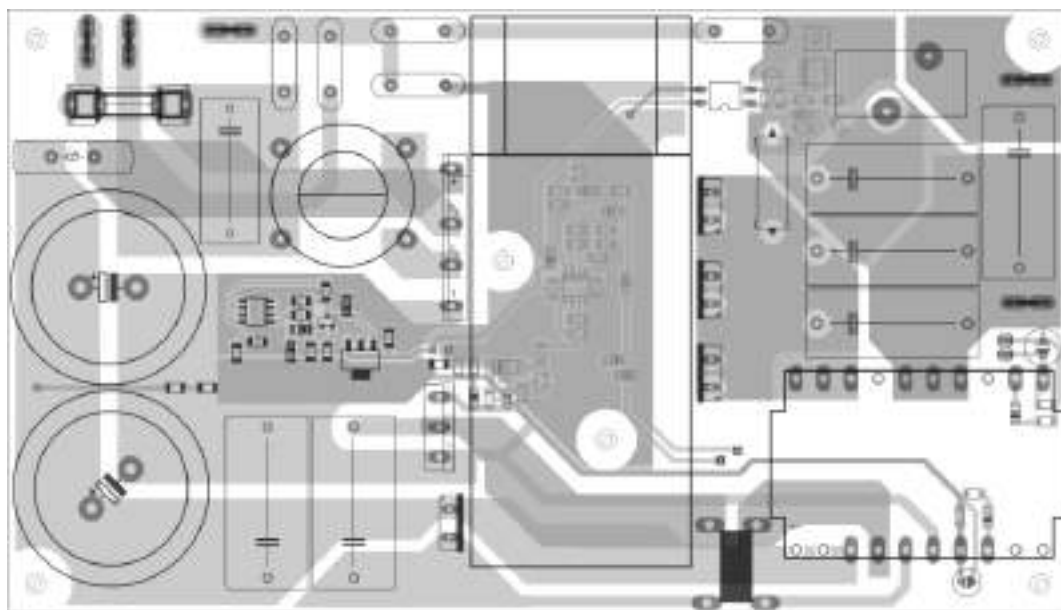


图3-18 - 电路板设计

在设计中，有必要充分考虑路径的电流尺寸，因此负载最大的连接处需要占用尽可能大的铜面积。此外，还必须确保在初级侧的无电感环路和次级整流电路等敏感部位的寄生电感尽可能小，将元件尽可能靠近，路径尽可能短。

控制电路元件周围的空隙由铜面填充，铜面与电路接地（即用于抑制干扰的中间电路负极）相连。同时，还必须注意确保这些表面不会形成不合适的回路，从而导致产生干扰电流，并尽可能分离信号的传导路径。

表面和路径之间留有适当的隔离距离，初级电路和次级电路之间以及安装孔周围的隔离屏障特别长。在铝制散热器和电路板之间插入了绝缘箔。散热器上的元件通过导热绝缘垫相互绝缘。



4 实施和 测量

设计的电路板已制作完成，并用保护漆进行了处理。随后，制作了设计的绕线元件，并组装了整个变频器。



图4-1 - 带两个初级通孔的电流互感器

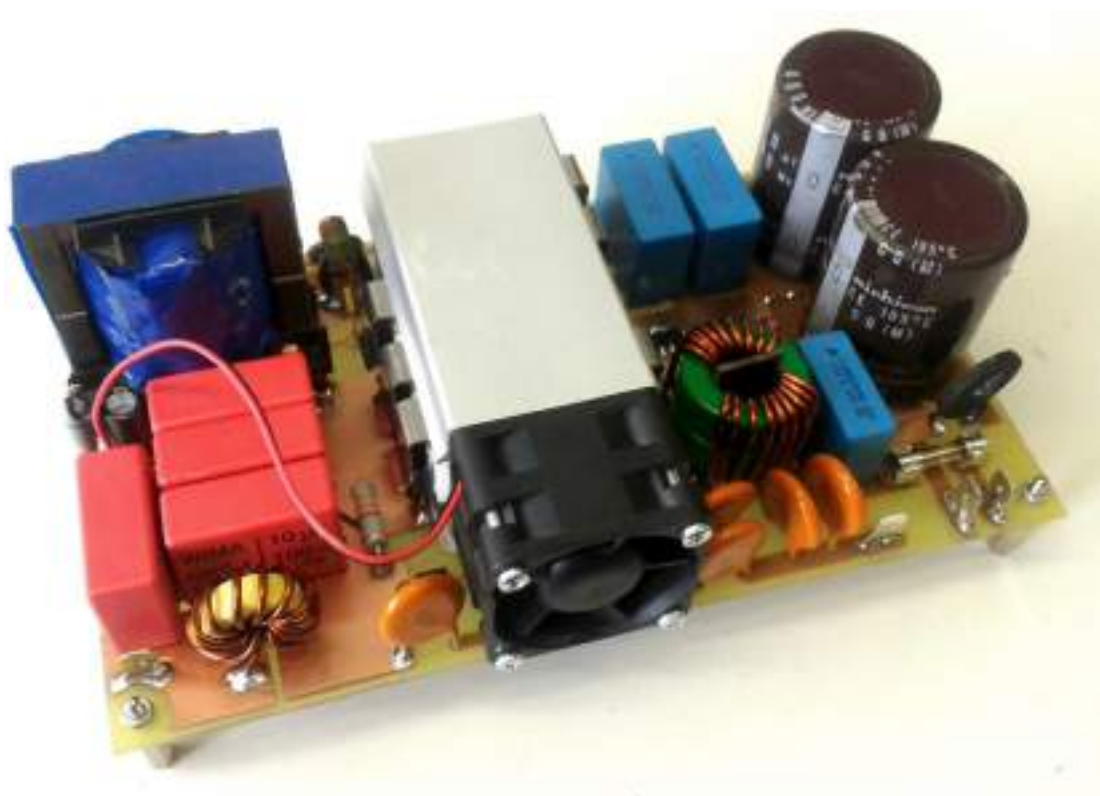


图4-2 - 制作的逆变器照片



4.1 逆变器的复兴

安装好控制元件后，我们验证了控制电路的功能和外部电源供电时的晶体管激励，在调整开关频率后，控制电路和晶体管激励正常工作。我们还测试了电压调节器和启动电路的功能。启动电路在电压达到 40V 时开启，在电压低于 32V 时关闭，这与设计值相符。

然后，我们通过一个稳压自耦变压器将电源电压连接到逆变器的输入端。首先，通过控制电路的外部电源和一个小型电阻负载，我们设定了一个较小的输入电压。连接负载是必要的，因为在稳压器发生故障的情况下，如果输出端没有负载，输出电压就会不受控制地升高，这与直通式电源不同，后者的电压幅度实际上受到电压脉冲量的限制。在这种情况下，我们检查了晶体管上的电压波形、励磁操作以及电流互感器分流器上是否存在脉冲。通过进一步提高输入电压，输出电压达到了 60 V 的设定值，并且可以验证转换器次级侧调节器的工作情况，该调节器限制了脉冲的大小，输出电压达到了预期值。

通过增加输出负载和输入电压，我们在逆变器上实现了更大的电流负载，并检查了逆变器部件是否过度发热。我们还检查了输出整流二极管的电压波形。

通过进一步增加负载，初级电流的峰值会达到设定的最大值，脉冲的幅度也会受到限制，从而使输出电压低于预期值。然而，输出电流的大小略微取决于输入电源电压的大小，因此不能将这种情况视为过载情况下输出电流的安全限制。

然后，我们连接了辅助电源绕组，为控制电路和风扇供电，并测试了逆变器在无外部电源的情况下的启动情况。在交流电源电压约为 160 V 时，启动电阻开始提供足够的电流，使变频器短暂启动。然而，辅助绕组提供的电压仍然过低，无法维持所需的电源电压。因此，逆变器会循环开启和关闭，从而产生特有的 "滴答" 声。当电源电压为 190 V 时，逆变器已能可靠运行。风扇电源的辅助绕组由一根线组成，电源电压约为 15 V。然而，风扇的供电电压仅为 12 V，因此有必要通过在风扇上串联一个限幅电阻来降低输出电压。

在空载运行时，稳压器会限制晶体管的开关，电源电压达不到所需的量级时，源极会再次 "滴嗒" 作响。

在复苏过程中，出现了脉冲大小限制模式下运行不稳定的问题。该问题是由于连接到逆变器输出端和中间电路负极的抑制电容器 $CY5$ 和 $CY3$ 安装不当造成的，这证明了这些



电容器的重要性，它们不仅能限制向网络发射的干扰，还能限制对电源本身控制电路的干扰。



4.2 测量 波形

从图4-3中可以看出，连续流动模式下的开关交替值约为所选的 $1/3$ 。晶体管上的电压过冲达到交织电压的两倍，然后下降到约 450 V，该值为交织电压与初级绕组上的变换电压之和。励磁电压为所需的 -3 V 和 22 V。

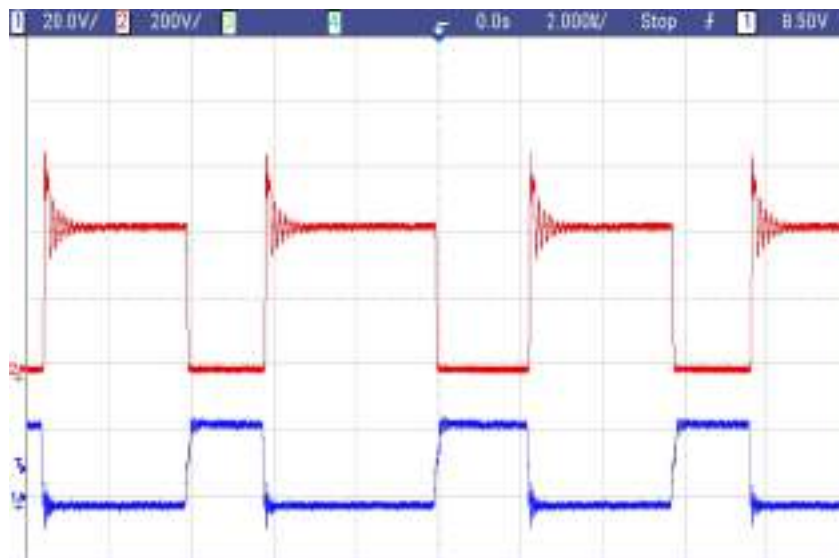


图4-3 - 额定输入电压和输出参数为 60 V 15 A 时，开关晶体管上 D-S 电压（红色）和 G-S 电压（蓝色）的电压波形图

图4-4中的晶体管开关过程正常。导通时间与指示值一致。晶体管栅极的电压波形有轻微的扭结，但在这种情况下不会造成危险。



图4-4 - 晶体管开关细节 - 额定输入电压和输出参数 60 V 15 A 时的 D-S（红色）



电力电子工程研究所

70

布尔诺理工大学电气工程与通信技术学院
电压和 $G-S$ (蓝色) 电压



在跳闸过程中可以清楚地看到限流电路的功能。跳闸后，电压的大小受到限制，然后随着电感的电流耗散而产生阻尼振荡。在栅极电压波形中，关断时会出现峰值达到晶体管阈值电压的振荡。这些振荡有可能导致错误的开关波形，应通过修改激励电路来避免。不过，在测试过程中没有发现明显的问题。

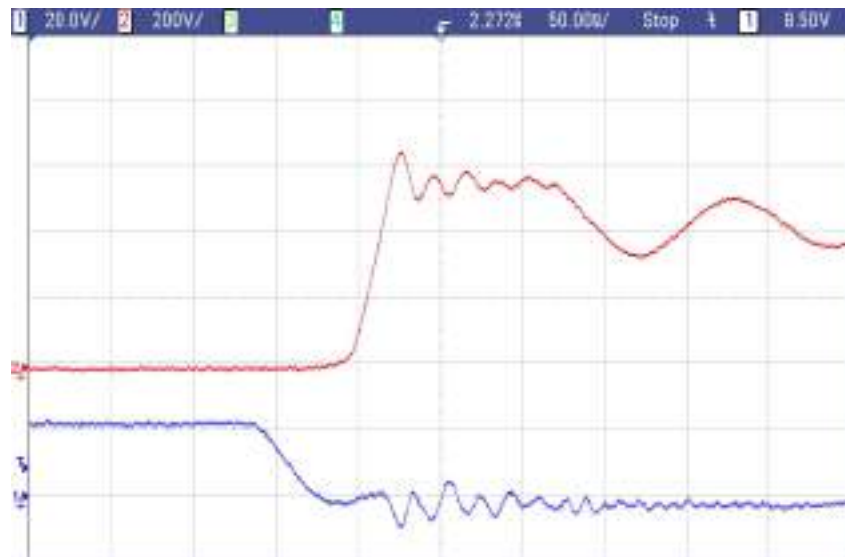


图 4-5 - 晶体管开关细节 - 额定输入电压和输出参数为 60 V 15 A 时的电压 D-S (红色) 和电压 G-S (蓝色)。

图 4-6 显示了转换器在低负载时以间歇流模式运行的情况。晶体管接通时，电流从零开始增加。关断后，晶体管电压波形显示出流经次级绕组的电流停止、转换至初级绕组的电压下降或产生振荡的时刻。

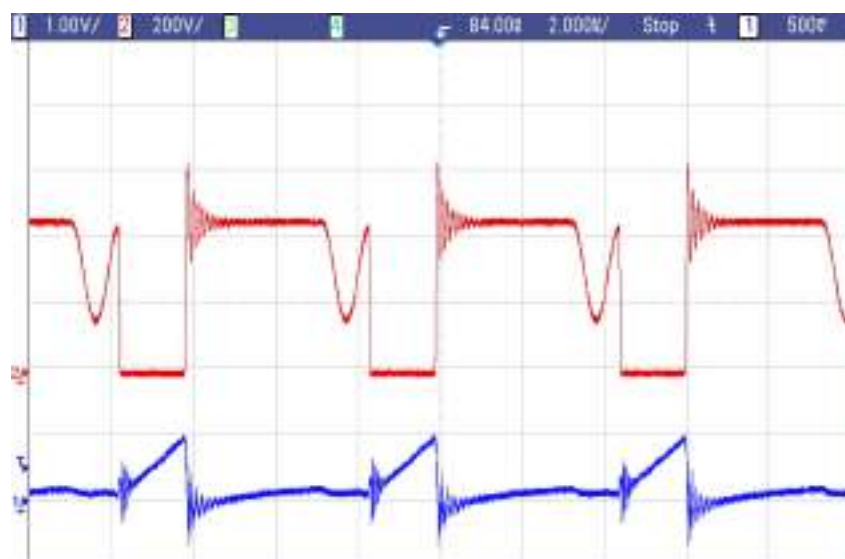


图 4-6 - 晶体管 (红色) 上的电压波形 D-S 和分流器上的电压
电流互感器 (蓝色) 在间歇流动模式下，额定输入电压和输出参数为 60 V 3 A



图4-7 显示了次级整流器二极管上的电压波形。当二极管过渡到闭合方向时，会出现一个很大的电压峰值。峰值电压约为 360 V，是工作关闭电压 180 V 的两倍。不过，这不会对二极管的抗电压能力造成影响，因为二极管的最大截止电压高达 600 V。

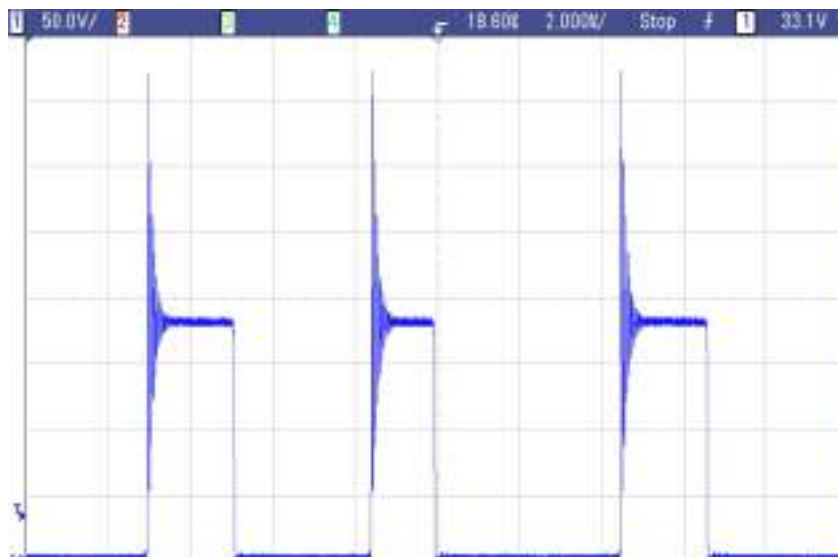


图4-7 - 在标称输入电压和输出参数为 60 V 20 A 时，次级整流二极管上的电压波形

然而，频率约为 20 MHz 的高频电压振荡会造成干扰和电磁兼容保护方面的问题。因此，最好限制这些振荡，例如使用 RC 链路。



图4-8 - 在标称输入电压和输出参数为 60 V 20 A 时，次级整流二极管的电压波形详图



额定输入电压下的电源上升时间约为 350 毫秒。在上升时间之后，波形中会出现复制中间电路电压纹波的纹波。

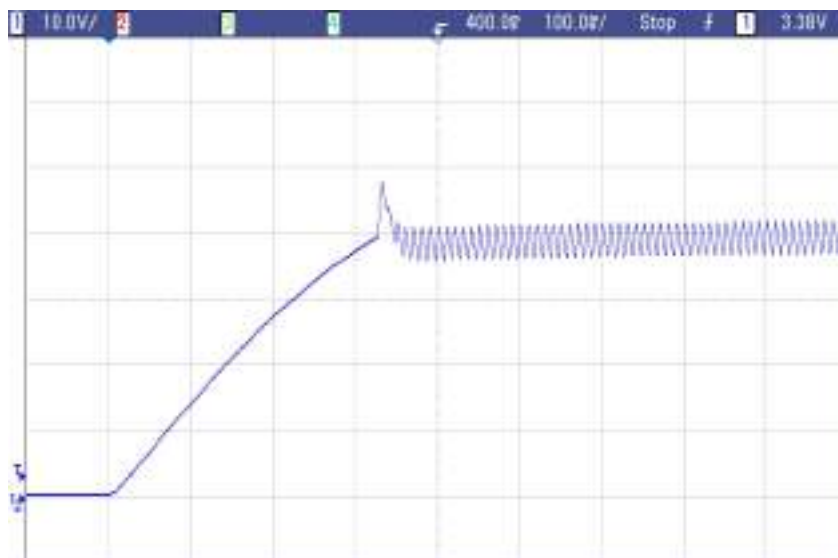


图 4-9 - 接通额定输入电压后逆变器启动时启动电路和稳定器输入端的电压波形

4.3 测量效率

效率测量是在直流电压直接供给中间电路时对逆变器进行的。因此，测量值不包括电源整流器和限制 NTC 热敏电阻的损耗。

在光源的额定负载下，测得的效率值为 93%。

效率降低的主要原因是次级整流器二极管上的损耗，因为所使用的二极管压降较大，以及开关晶体管上的损耗，其中功率损耗的很大一部分是开关损耗。



5 技术文档

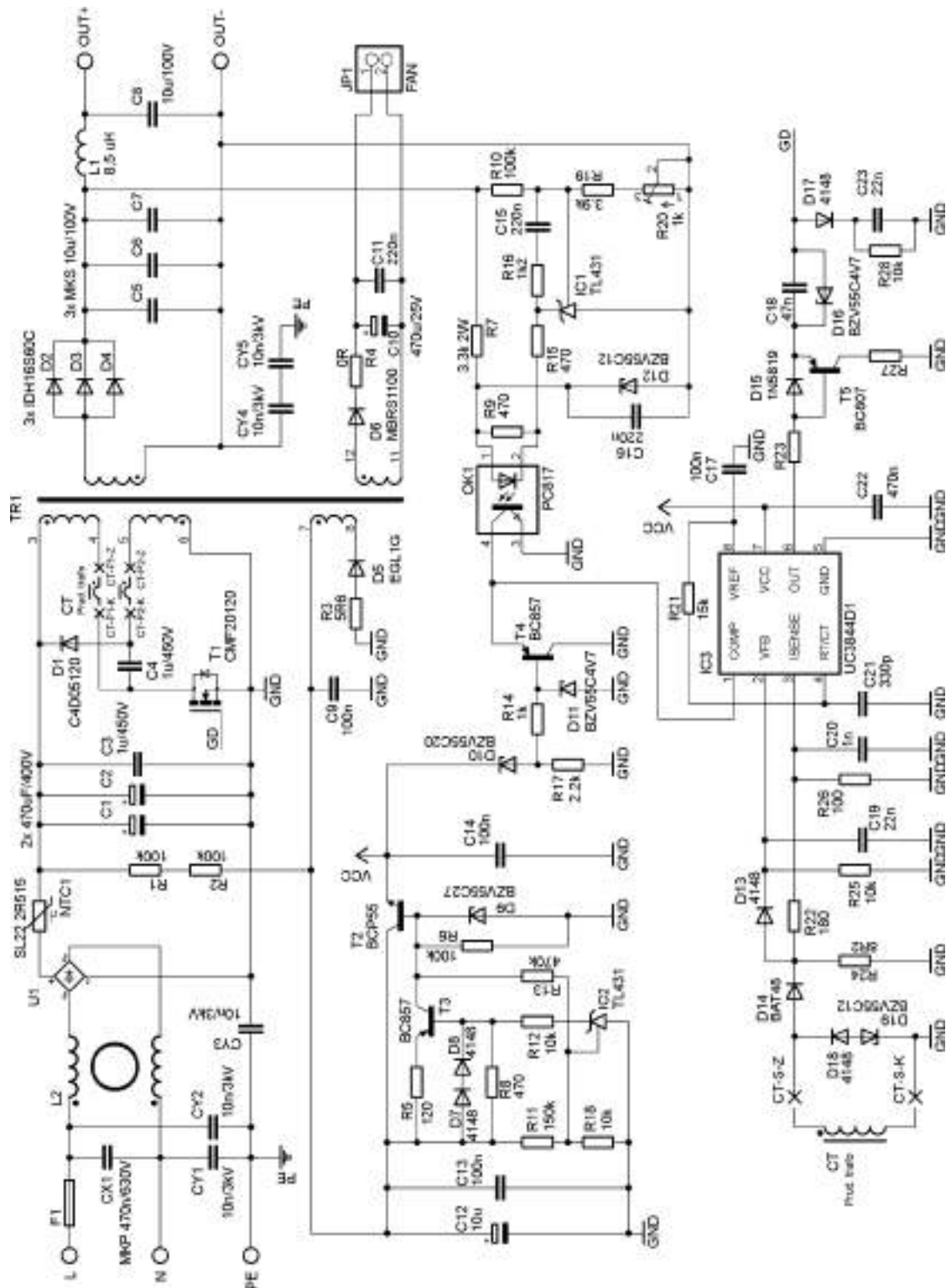


图5-1 - 变频器总体接线图

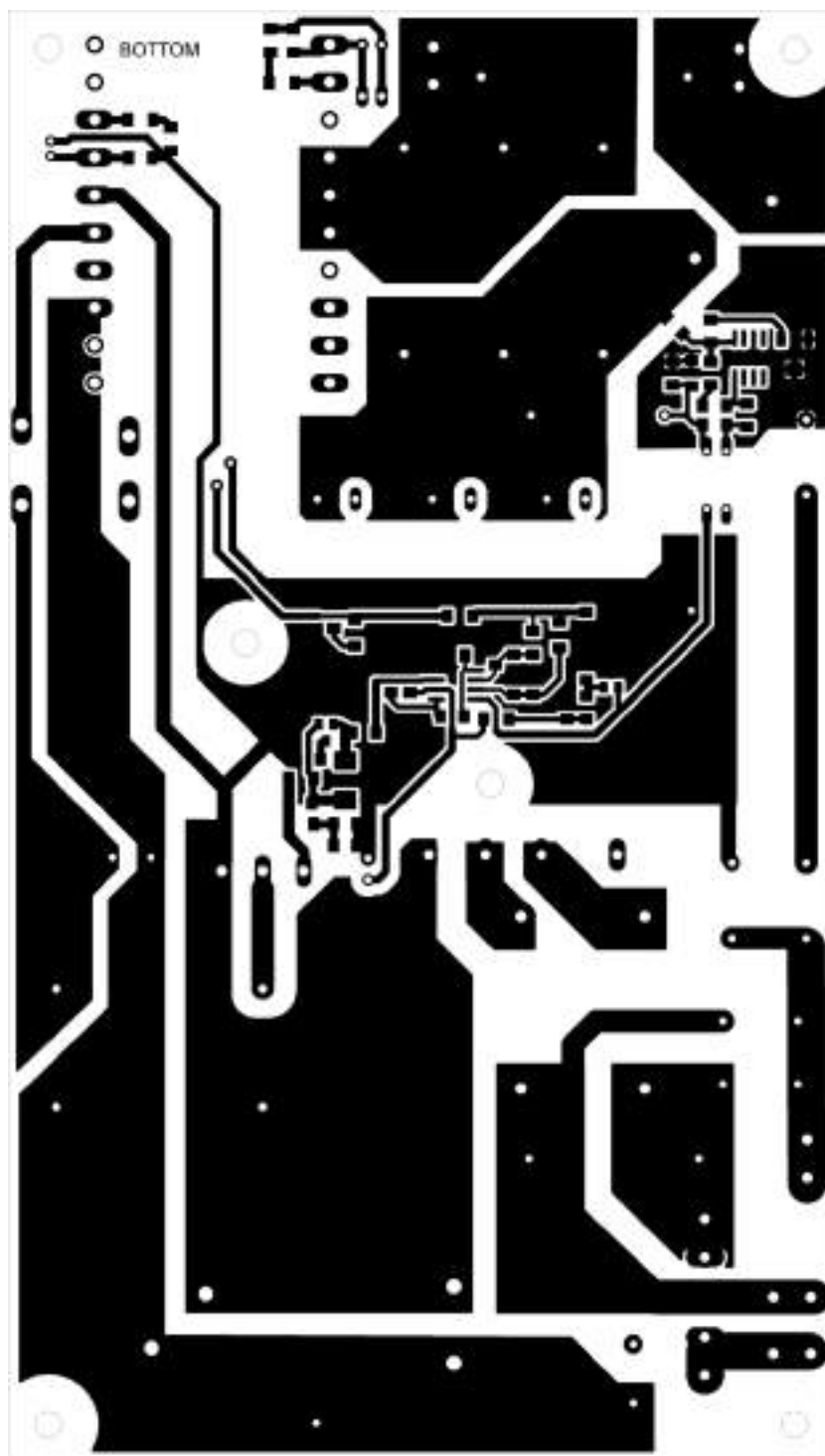


图 5-2 - 1:1 比例的印刷电路板底层图案

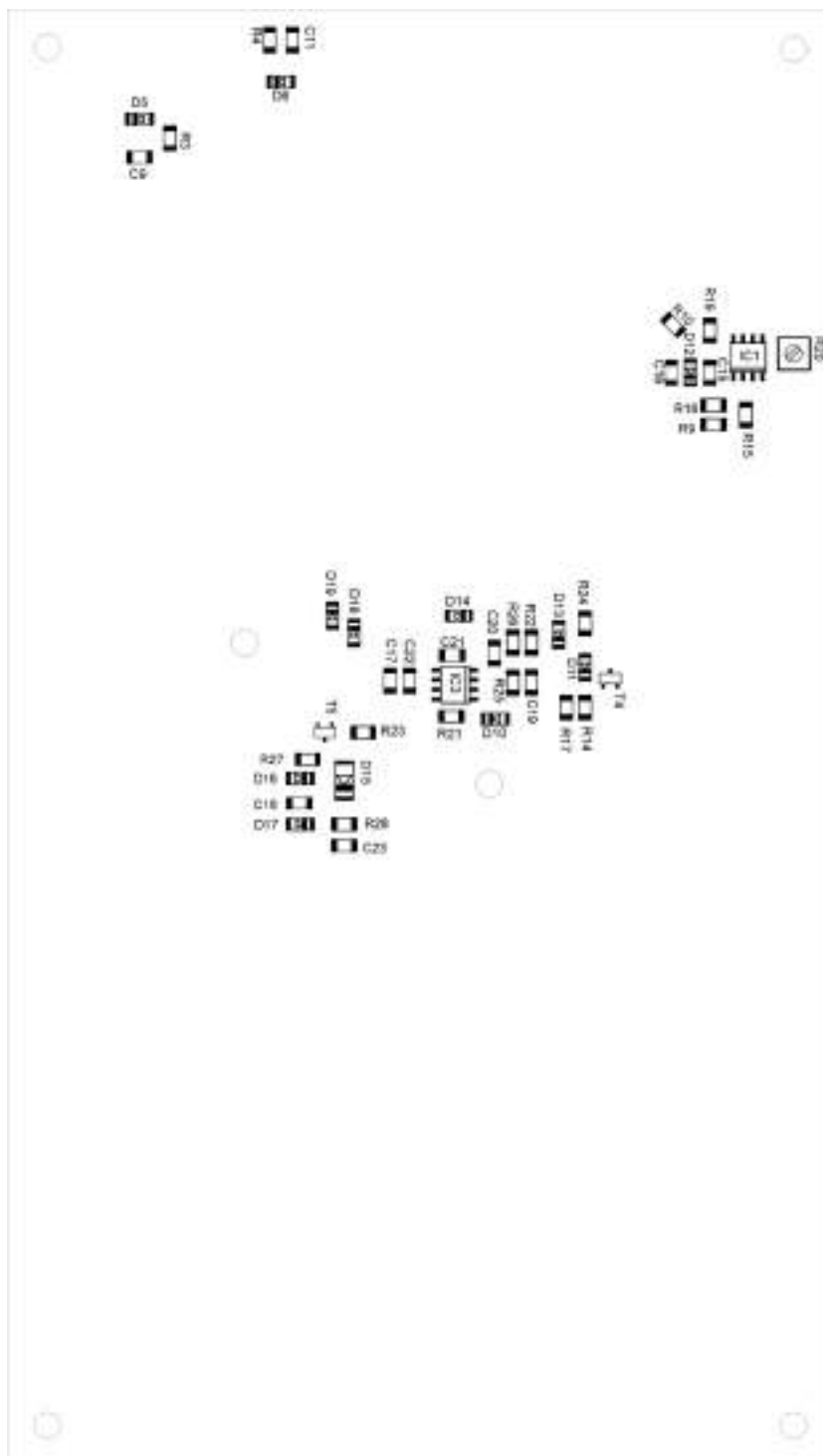


图5-3 - 电路板背面的元件布局

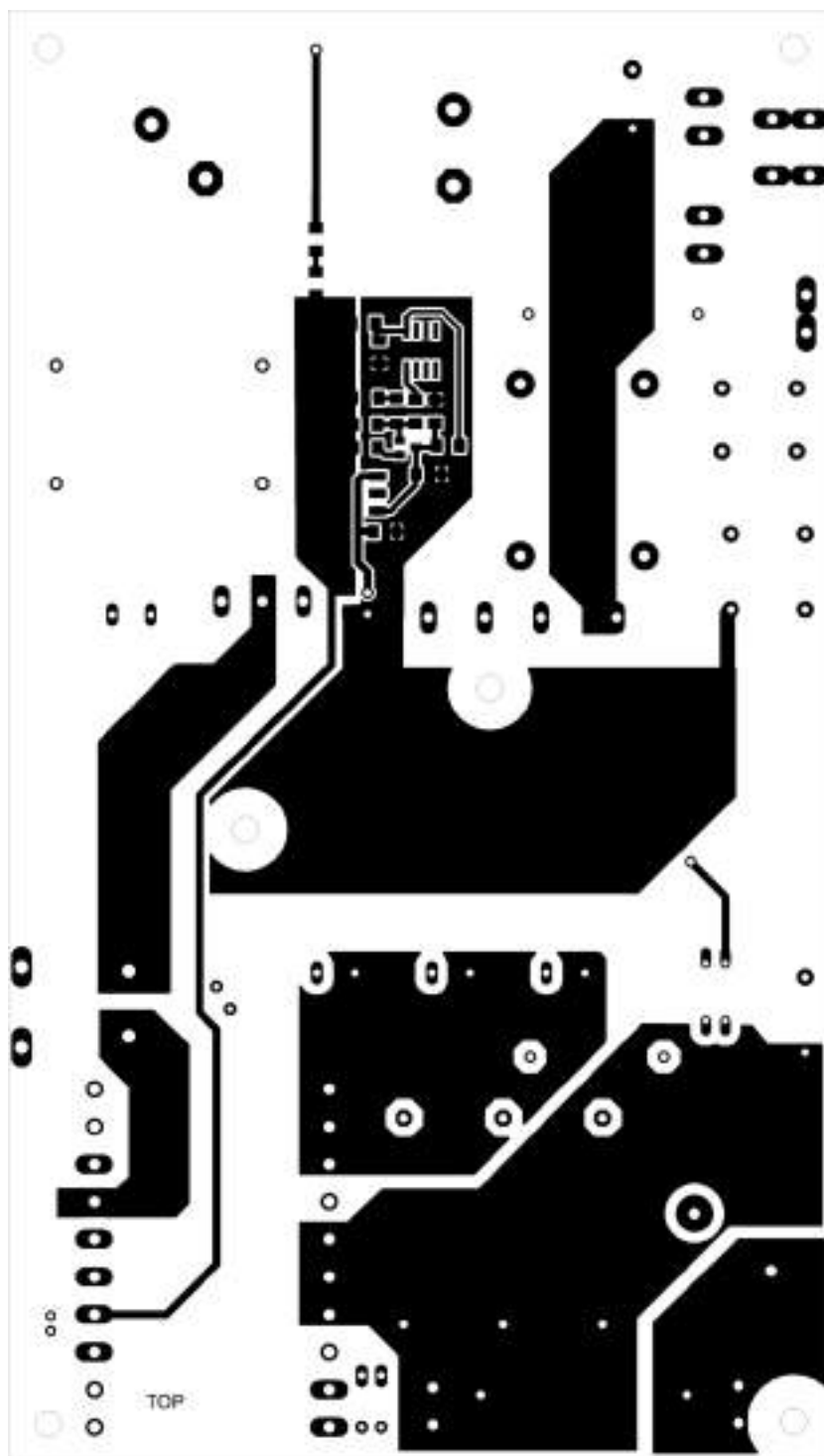


图 5-4 - 1:1 比例的印刷电路板顶层图案

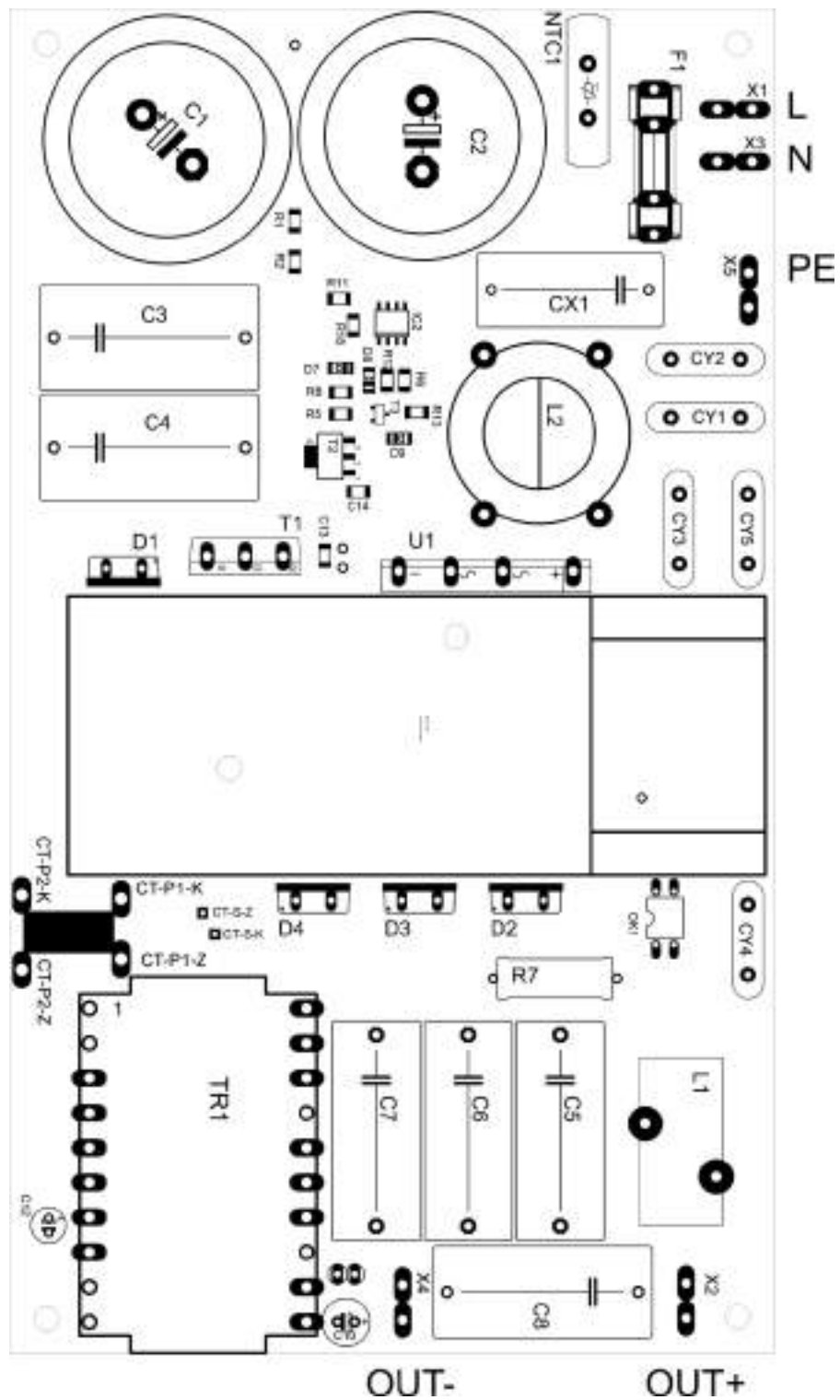


图5-5 - 电路板顶部的元件布局



表2 - 部件清单

名称	价值	案例	Ks
C1、C2	470uF/400V	SNAP-IN ϕ 35 RM10	2
C10	470u/25V	RM2.5	1
C11、C15、C16	220n	SMD C1206	3
C12	10u	SMD C1206	1
C18	47n	SMD C1206	1
C19, C23	22n	SMD C1206	2
C20	1n	SMD C1206	1
C21	330p	SMD C1206	1
C22	470n	SMD C1206	1
C3、C4	1uF 450V	RM27.5-154X316	2
C5、C6、C7、C8	WIMA MKS 4 10u/100V	RM27,5 31,5x13 毫米	3
C9、C13、C14、C17	100n	SMD 1206	4
CX1	MKP 470n/630V	RM22.5-108X268	1
CY1、CY2、CY3、CY4、CY5	10n/3kV Y5V	17 x 4.5 毫米	5
D1	C4D05120	TO-220	1
D10	BZV55C20	迷你 MELF	1
D11、D16	BZV55C4V7	迷你米勒夫	2
D12、D19	BZV55C12	迷你 MELF	2
D14	BAT48	迷你 MELF	1
D15	1N5819	MELF	1
D2、D3、D4	SCS220AG	TO-220	3
D5	EGL1G	迷你 MELF	1
D6	MBRS1100	迷你米勒夫	1
D7、D8、D13、D17、D18	1N4148	迷你米勒夫	5
D9	BZV55C27	迷你米勒夫	1
F1	5x20 保险丝盒	SHK20L	2
IC1, IC2	TL431	SMD SO8	2
IC3	UC3845	SMD SO8	1
L1	3,4 uH 20 A		1
L2	补偿扼流圈		1
NTC1	SL22 2R515	22x6mm	1
OK1	PC817	DIP4	1
R1、R2、R6、R10	100k	SMD R1206	4
R11	150k	SMD R1206	1
R12、R18、R25、R28	10k	SMD R1206	4
R13	470k	SMD R1206	1
R14	1k	SMD R1206	1
R16	1k2	SMD R1206	1
R17	2.2k	SMD R1206	1
R19	3.9k	SMD R1206	1
R20	1k	SMD 微调器	1
R21	15k	SMD R1206	1
R22	180	SMD R1206	1
R23、R27		SMD R1206	2
R24	18R 22R	SMD R1206	1
R26	100	SMD R1206	1
R3	5R6	SMD R1206	1
R4	0R	SMD R1206	1
R5	120	SMD R1206	1
R7	3.3k 2W	R0617 17 毫米	1
R8、R9、R15	470	SMD R1206	3
T1	CMF20120	TO-247	1
T2	BCP55	SOT223	1
T3、T4	BC857	SOT-23	2
T5	BC807	SOT-23	1
U1	GB10J	30 x 20 x 3.6 毫米	1
X1 - X5	L、N、PE、OUT+、OUT-	FASTON 6.3 毫米	5



6 来自 ÁVER

本文介绍了利用闭锁转换器拓扑结构传输更多功率的问题。所提出的实验解决方案允许使用高压碳化硅晶体管的单开关电路。从可能的控制方法中选择了恒频开关。

提出了电源和控制电路的布线以及绕组元件的设计。
工作的重要实践部分是设计印刷电路板、实际建造和设备的恢复。

信号源的工作没有出现任何重大问题。辅助恢复绕组电路中没有产生振荡。次级二极管上明显的电压过冲可视为一个缺陷。解决方法是减少寄生电感，使用有损电感或其他更复杂的无损解决方案。



LITERATURE

- [1] PATOČKA, Miroslav. *电力电子、测量技术和电力电气工程中的磁现象和电路*。布尔诺：VUTIUM, 2011, 564 p. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] 根据 Ing.扬-马蒂斯
- [3] 德州仪器。数据表 UC2844 [在线]。[2015-05-23 引用]。可查阅：
<http://www.ti.com/lit/gpn/uc2844>
- [4] 半导体。数据表 TL431 [在线]。[引用日期：2015-05-23]。可查阅：
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TL431-D.PDF>
- [5] CREE. *Datasheet CMF20120D* [online]. [cit. 2015-05-23].可查阅：
<http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/Data%20Sheets/CMF20120D.pdf>
- [6] *Fischer Elektronik: LAM 4 K, 微型冷却集料*[在线][引用日期：2015-05-23]。可查阅：
http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/heatsinks/D02/Miniature%20cooling%20aggregates/PR/LAM4K_/index.xhtml
- [7] SEMIC. *Material CF 297* [online]. [cited 2015-05-23].可查阅：
<http://www.semic.cz/!MATERIALS/CF297.pdf>
- [8] SEMIC. *ETD 4917-CF297* [在线]。[2015-05-23引用]。Available from：
http://www.semic.cz/_obchody/semic.obchodak.net/prilohy/3144/lj-etd4917-cf297-g-3.00-cf-420541.pdf



P 规则

光盘包含

- 在 Eagle 5.7 中进行原理图和 PCB 设计
- 目录页