

电子电力技术在电源设计中的应用: 变压器和整流器

邓隐北, 孙永德 编译

中科 863 生态技术开发集团有限公司

1 前言

电力电子 (Power Electronic, 简称 PE) 技术, 是信息产业和传统产业之间的重要接口, 是弱电与被控强电之间的桥梁。PE 技术包括功率半导体器件、集成电路 (IC) 技术、功率变换技术及其控制技术。

PE 器件又称开关器件。自世界上第一个功率半导体开关晶闸管发明以来, PE 器件已经经历了第一代半控型器件, 包括反向阻断式可控硅晶闸管 (SCR); 其派生器件有不对称晶闸管 (ASCR)、快速晶闸管 (FST)、逆导晶闸管 (RCT)、双向晶闸管 (TRIAC)、门极辅助关断晶闸管 (GATT)、光控晶闸管 (LTSCR) 等; 第二代 PE 器件为全控型器件, 也即, 有自关断能力的半导体器件, 包括可关断晶闸管 (GTO)、电力晶体管 (GTR 或 BJT)、金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)、静电感应式晶体管 (SIT)、静电感应晶闸管 (SITH); 第三代复合场控型器件, 如绝缘栅双极晶体管 (IGBT)、MOS 控制晶体管 (MCT)、集成栅极换流控制晶体管 (IGCT) 等; 直至 90 年代出现的第四代模块化 PE 器件, 以功率集成电路 (PIC) 为代表, 它不仅把主电路的器件, 而且把驱动电路及具有过电压、过电流保护甚至温度自控等作用的电路集成一起, 展现出更先进的性能优势。

本文共分五大部分: (1) 变压器和整流器; (2) 线性电压调节器; (3) 开关电源; (4) 开关电源控制器; (5)

蓄电池。这里首先介绍变压器和整流器部分。

2 变压器

2.1 交流到直流 (AC → DC) 的变换

基本线性 DC 电源的简化方框图示于图 1。因交流电源的输入电压较高 (典型为 115V 或 230V), 通常采用适当匝数比 (变比) 的降压变压器, 以便将引入的电压降低至一合适的电压值, 然后由变压器的二次绕组输出的交流经过整流, 产生未经平滑的直流, 再将此波动的直流进行稳压和滤波, 调整该输出电压并保持处于所需电压值, 然后再施加到电路上。无论负载电流和引入的电源电压如何变换, 调压器均应确保输出的电压保持在一合理的恒定值。

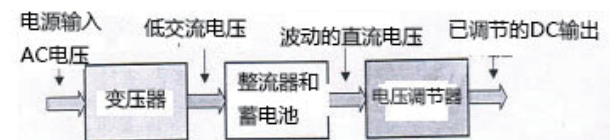


图 1 简单的线性直流电源方框图

图 2 所示为利用少数普通的电子元件、组成的这一简单线性直流电源。这里, 降压变压器馈电至整流器 (通常, 基于二极管的电桥接线) 配置, 以其输出送至大容量的蓄能电容器 (其高度超过整流器), 电容器拥有相当数量电荷的充电量。当整流器处于非导通状态时它能承受负载电流。

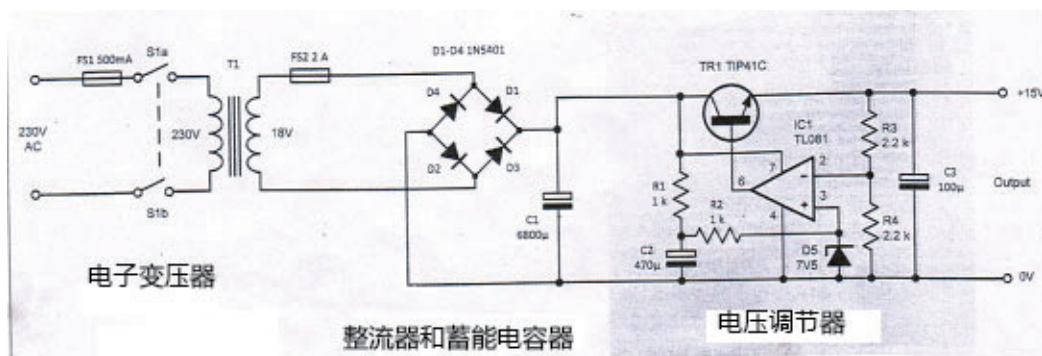


图 2 简单线性 DC 电源的基本组成方框图

调压器跟踪蓄能电容器,使保持输出电压恒定在所需的电压值,在交流输入电压和负载需要变化时自动进行补偿。线性电源的实体配置如图3所示。注意到变压器占据的空间紧凑、合理,有利于装置的成本降低和重量减轻。



图3 基于线性技术的典型电子式低压直流电源

2.2 变压器的定额及接线方式

在变压器的结构类型、绕组和电压/电流定额大范围变化的情况下,上述这一变压器均能适用。变压器的最简单形式只有一个(正常定额为110V或220V)的原绕组,和一个适当定额的副绕组,副绕组一般按负载电压(如12V或15V)和额定电流(如1A、2A...)具体设定。变压器总的功率定额通常引用伏特安培(VA)表示。当采用一个以上副绕组时,总的额定功率就是所有副绕组的总额定负载。

伏安(VA)定额考虑到,负载不可能是纯电阻的,但近似达到变压器VA定额为负载电压和额定负载电流之积是安全的。例如,定额为15V、12VA的部件,以0.8A供电到15V的电阻负载,从这一点认识到变压器空载的副边电压能比其负载电压高的多很重要,这尤其是在较小功率的变压器上。

定额范围从1.2VA到120.VA电源变压器的可选件示于图4。所设计的这些变压器均运行于50Hz或60Hz,利用薄的E型和I型截面的常规叠片组成的铁芯如图5所示。变压器使用的范围广,从若干广告征订的用户到众多的在线电源均需求此类变压器。此外,利用一套图6所示的零部件,则可自行绕制。图7所示为由配套元件组装成的变压器,其原绕组已在线圈架上绕制了两个115V的绕组,而副绕组是自行绕制的,匝数(Nsec)可利用下式计

算求得:

$$N_{sec} = TPV \times V_{sec.rated}$$

式中,TPV—引用的变压器定额中的“每伏匝数”。注意到允许变压器中有些损耗是切合实际的,约超出4%的匝数也是可取的,故

$$N_{sec} = 1.04 \times TPV \times V_{sec.rated}$$

例如,若副绕组具有额定电压(Vsec.rated)20.V的负载,变压器的TPV定额为2.5,则需要的匝数应为:

$$N_{sec} = 1.04 \times 2.5 \times 20 = 130 \text{ (匝)}$$

如果你想自己绕制变压器,重要的是你要确保漆包铜线具有的线规直径,其定额足以支持满载下的副边(二次)电流(参见表1)

表1 开关的组合

定额的二次电流	SWG	近似的线径(mm)
0.5	24	0.6
0.8	22	0.7
1.3	20	0.9
2.3	18	1.2
4	16	1.6
6.5	14	2.1

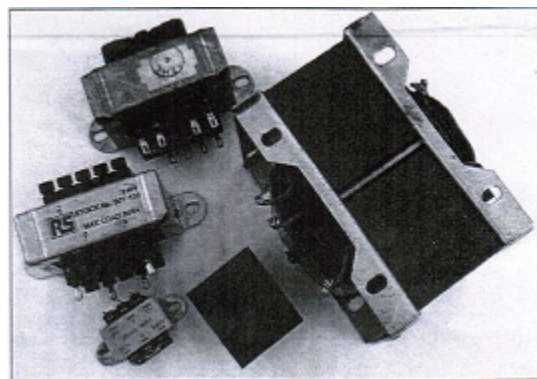


图4 从1.2VA到100VA定额范围的电源变压器

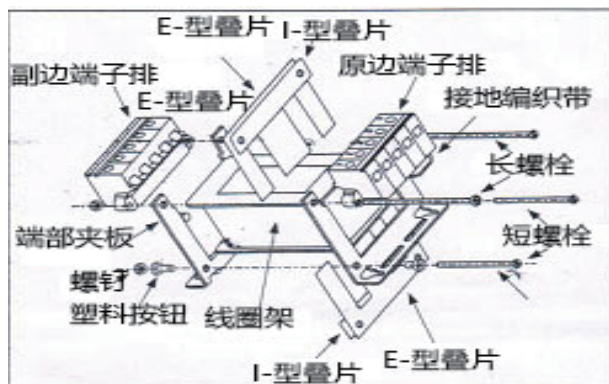


图5 常规铁芯的电源变压器部件分解图

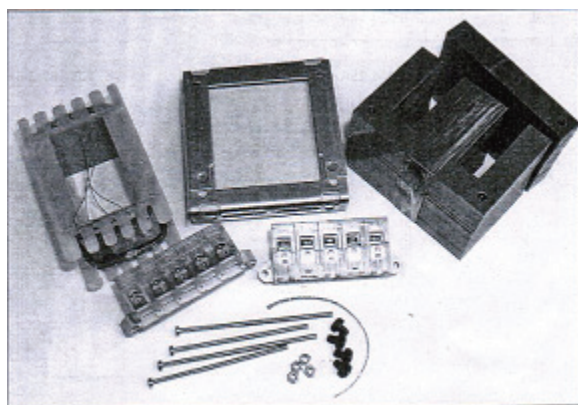


图 6 用于 50VA 变压器的成套零件

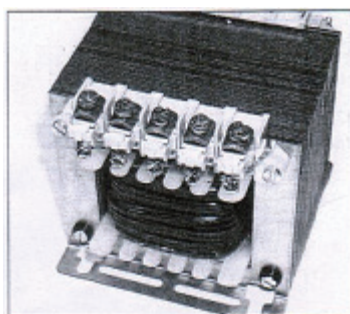


图 7 装配好的 50VA 变压器副绕组定额为 25V、2A，使用了标准线规 (SWG) 的铜漆包线

2.3 原绕组和副绕组的接线型式

很多变压器都带有两个相同的原绕组，每个原绕组均设计在 115V 运行。原绕组在 115V 运行时应为并联连接，而在 230V 下运行时则为串联连接。注意到在两种情况下，绕组的连接必须有正确的相位关系。类似的，两个副绕组也可为串联或并联连接。这里再强调一下，正确的相位关系很重要。图 8 所示为带有双原绕组和双副绕组的变压器及其绕组的各种不同接线方式(黑色圆点表示绕组的相位)。

2.4 圆环形 (Toroidal) 变压器

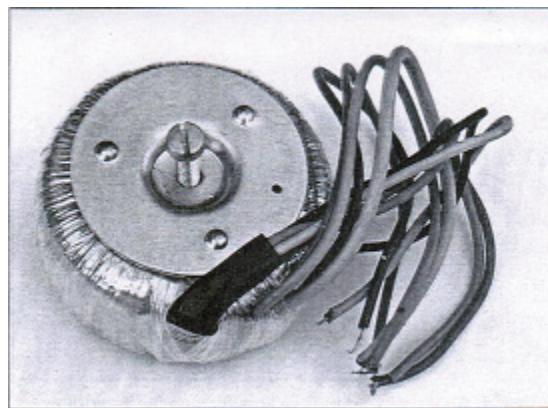


图 9 具有两个 115V 原绕组和两个 12V 副绕组的、结构紧凑圆环形铁芯的 30VA 变压器，每个副绕组的定额为 1.25A 负载

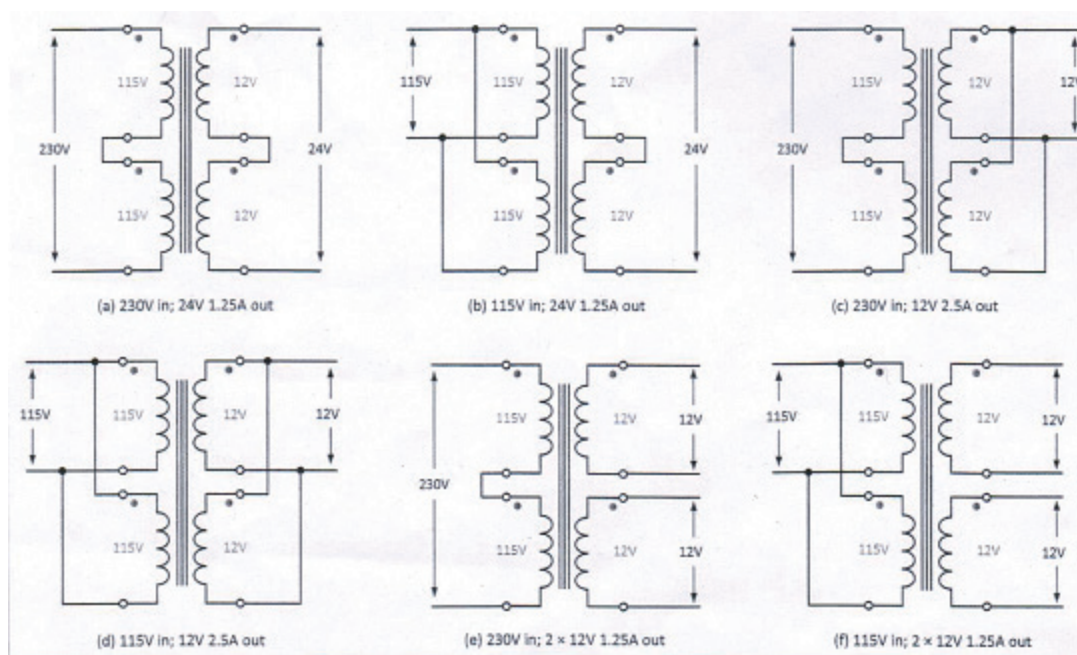


图 8 带双原绕组和双副绕组的变压器、其绕组的各种不同接线方式

虽然图 6 和图 7 所示的变压器型式最普遍,但不是所有的变压器都采用这种形式。你还可以开创一种图 9 所示的圆环形(类似于汽车轮胎)那样的变压器,它们的几何形状赋予其一些优点,尤其适用于低噪音电路,且经常应用于高质量的音响设计中。

3 整流器

3.1 半波整流器

由于半导体二极管的单向导电性质,利用其将交流(AC)变换成直流(DC)是理想的。在这一应用中,二极管被用作“整流器”,单个的二极管就是最简单的整流器形

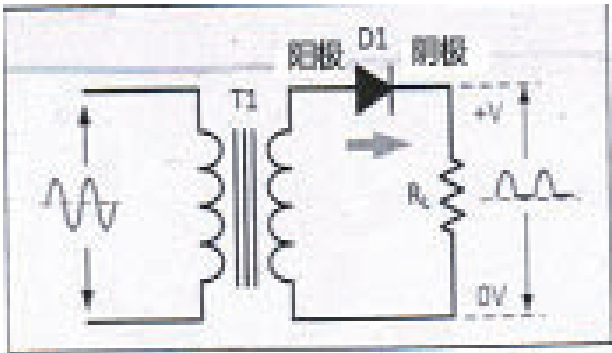


图 10 简化的半波整流器电路

在图 10 所示的半波整流器中,引入的电源(正常为 115V 或 230V),施加到降压变压器 T1 的原绕组,副绕组接到整流器的二极管 D1 上,D1 仅允许在图示方向一从 D1 的阳极到阴极方向电流流通。在副边(二次)电压的每一个正半周,D1 将为正向偏置(导通),这一有效的性能就像一闭合的开关。相反,在二次电压的负半周期间,D1 将反向偏置(不导通),其作用宛如一断开的开关,如图 11 所示。

D1 的开关作用导致在负载 R_L 上产生一脉冲的输出电压。如果电源频率为 50Hz,即使出现仅一半的交流周期,在负载 R_L 上发出的电压脉冲也是 50Hz。注意到在正半周期间,二极管一般要下降 0.6V~0.7V 的正向阈值电压,这与硅二极管有关。当功率整流器承载着大电流的情况下,这一正向压降可能达到 1.1V 左右,对于大电源总的发热和效率设计来说,这点必须满足。

在负半周期间,D1 上将出现峰值的 AC 电压。对于特殊应用中当选择二极管时,这可能是至关重要的考虑。假定,T1 的二次绕组提供 12VRMS,变压器二次绕组的峰值电压将由下式给出:

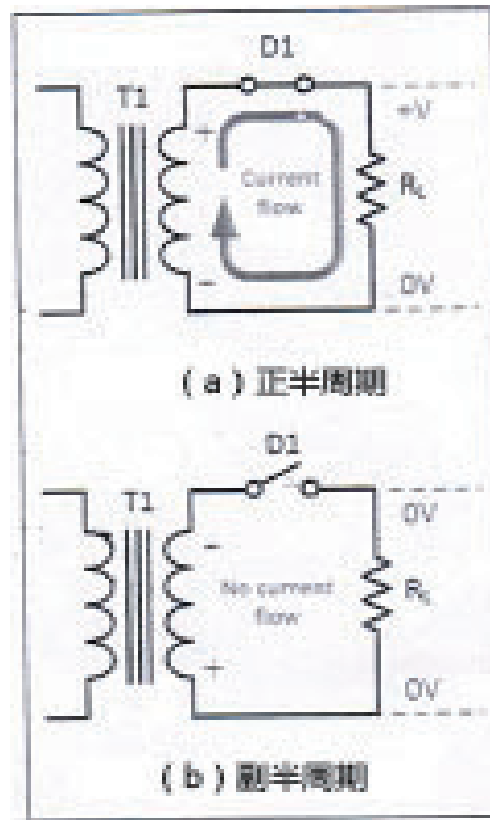


图 11 在半波整流器电路中的电流流向

$$V_{PK}=1.414 \times V_{RMS}=1.414 \times 12V=16.97V$$

如此施加到 D1 上的峰值电压将接近 17V,负半周期被阻断,因而在负载 R_L 上仅出现正半周。但注意到,加在 R_L 上实际的峰值电压,是变压器二次绕组的 17V 正峰值电压,减去由 D1 降低的正向阈值电压 0.7V。换句话说,在 R_L 负载上将出现峰值振幅 16.3V 正半周脉冲。需注意的是,当设计高压电源时,如何选择整流器的二极管,应使二极管能承受住高的反向峰值电压是关键。例如,当设计解决 240V 交流电源的整流器时,将要求承受至少 600V 定额的反向峰值电压(PIV)。后面当描述这一系列的开关电源时,我们还要考虑到这一点。

3.2 蓄能电容器

增加一个电容器(C1),将大幅度改善图 10 的电路。C1 的作用就像一个蓄能容器,既蓄存电荷,当二极管处于非导通状态下又能将电荷释放出来。这有助于确保输出电压保持接近于峰值电压,即使在二极管不导通时。

改进的电路示于图 12。再一次假定,由 T1 供电的二次电压为 12V。当原边(一次)电压施加到 T1 时,由副

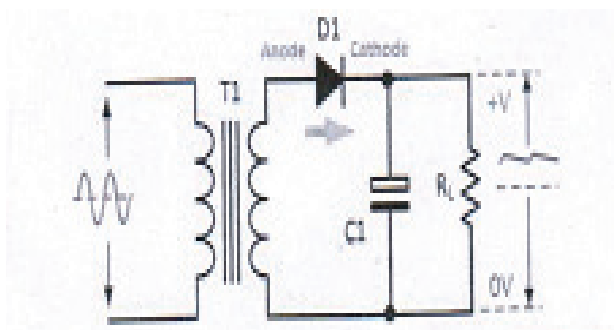


图 12 改进的半波整流器电路

边的第一个正半周输出，将对 C1 充电到负载 R_L 上出现峰值电压，如前所述，在正半周的峰值时，C1 充电达到 16.3V。因为 C1 与负载并联， R_L 上的电压将与 C1 上的电压相同。

C1 充电至最大（峰值）水平所需的时间，由充电电路的时间常数（串联电阻值乘上电容值）决定。在这一电路中，串联电阻值包括二次绕组的电阻值加上二极管的正向电阻值，以及（极小的）导线与连接的电阻值。故 C1 的充电很快，就像 D1 开始导通一样快。

相反，C1 放电所需的时间却很长，放电的时间常数由电容值和负载电阻 R_L 所决定。实际的电阻值，比二次电路的电阻值 R_L 要大很多，故 C1 采用了较长的放电时间，在此时间内，D1 将反向偏置，因而保持其处于非导通状态。结果，C1 的放电路径仅通过 R_L ，且图 12 的电路就能在 R_L 上保持一合理的恒定输出电压。虽然如此，在负半周期间 C1 仍从变压器副边有一小量的放电。

图 12 中，DC 输出电压的微小波动起因于“纹波”。这包含由电源频率叠加在输出上小的交流分量。因为纹波是不需要的，我们必须采取附加的防护措施以消减它。减小纹波振幅的一个简单而明显的方法就是增加放电时间常数。这可通过增加电容 C1 值或增加负载的电阻值 R_L 来实现。遗憾的是，电阻不是通常的可选项，我们不去改变 R_L ，因而只有采取增加 C1 电容值的方法，使用很大容量的电容器（一般为 1000 μ F 到 10000 μ F）。

3.3 全波整流器

因为仅在交变的半周导通，故半波整流器相对来说效率不是太高。更佳的整流器电路配置，应该在正半周和负半周均能利用。这样的“全波整流器”电路对比其半波整

流器，具有相当大的性能改进。它们不仅效率更高，而且蓄能部件和平波（Smoothing）部件的需求也大幅减少。全波整流器具有两种基本形式：“双相”（bi-phase）型和“桥式整流器”型。现在，我们仅限于对桥式整流器的说明，因其更普遍更有效。

在图 13 所示四个二极管的桥式整流器中，交变的半周期间，对置的两个二极管导通。如前所述，电源电压（115V 或 230V）施加到降压变压器（T1）的原绕组，再次假定，二次绕组将提供 12VRMS（峰值约 17V）。在正半周，D1 和 D2 导通，而在负半周，D3 和 D4 导通。

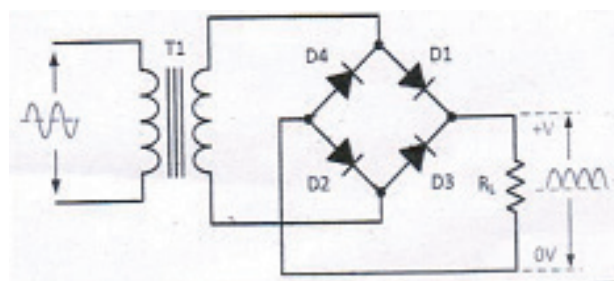


图 13 简化的全波整流器电路

图 14 说明了这一现象，图中的 4 个二极管相当于开关的作用。注意在连续的半周期间，全波电路中，负载上流过的是相同方向的电流。

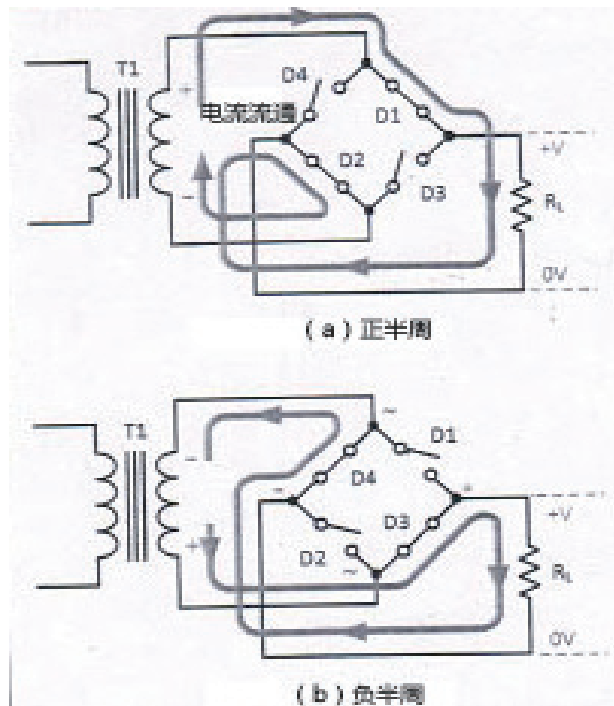


图 14 全波整流电路的电流流向

两个二极管的开关作用导致负载 R_L 上产生脉冲的输出电压。如果二次绕组产生 17V 的峰压, 输送至负载上的输出电压将近似为 15.6V (也即, 可归因于对置的一对二极管, 17V 减去两个正向电压降)。

如在半波整流器中那样, 两个二极管的开关作用导致了负载 R_L 上产生脉冲的输出电压。然而, 和半波电路不同, 负载上产生的电压脉冲, 其频率则为电源频率的双倍 (对 50Hz 电源为 100Hz, 或对 60Hz 电源即为 120Hz)。这一双倍的纹波频率, 就允许我们利用较小容量的蓄能 / 平滑电容器, 而获得相同的纹波降低效果 (电容器的电抗反比于流经电容器电流的频率)。

图 15 表示, 当对置的二极管非导通时, 蓄能电容器是如何辅助地保持输出电压的。这一部件的运行与双相 (bi-phase) 电路的运行完全相同。也就是说在正半周的峰值时, 它充电到近似 15.6V, 而当二极管处于非导通状态下保持电压处于这一水平。一旦充好电完全像图 12 所示改进了的半波整流器一样, 蓄能的电容器就对负载放电。

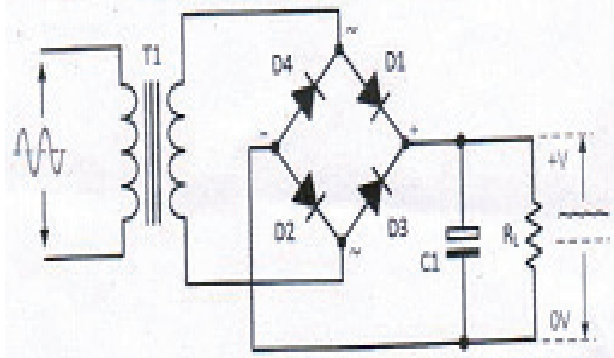


图 15 改进了的全波整流器电路

3.4 实用的设计: 18V、0.5A 原创的 DC 电源

原创的 18V、0.5A 直流电源电路示于图 16。该电源电路参照了早期已有的若干设计理念。例如, PCB (印刷电路板) 安装的变压器 (T1), 利用了双重的原绕组和副绕组 (并能实现 115V 和 230V 的运行, 如图 8 所示)。图 16 所示的电路及其设计布置 (图 17), 均为 230V 运行所构建, 但如果需要, 可容易改变为 115V 的运行。

一密封 (封装) 的桥式整流器 (BR1), 用于取代 4 个单独的整流二极管。这一部件 BR1 的定额为 200V、2.5A。蓄能电容器的电容值为 4700 μ F, 且必须有 35V

以上的工作电压。简单的二极管功率显示器 (D1 和 R1) 可证实是否有输出。如果需要, D1 可安装在电路板外边 (off-board), 像面板上的显示器一样。基本保护是由接至交流电源连线上的、带玻璃窗口快速烧断的 250mA、5 \times 20mm 的熔丝所提供。

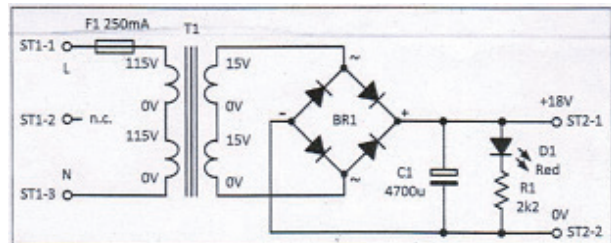


图 16 原创的 18V、0.5A 直流电源的电路

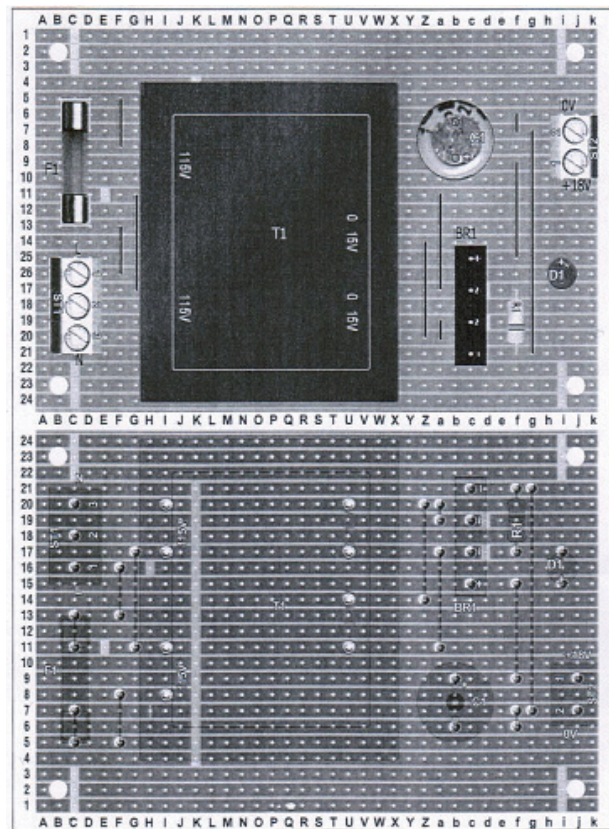


图 17 18V、0.5A 直流电源的印刷电路导线板 (stripboard) 布置 (上) 部件侧, (下) 印刷电路板的铜线视图

原文出处: Mike Tooley, Powering Electronics Part I: Transformers and rectifiers, «Everyday Practical Electronics», January 2019, P.30-43