



基本概念

电源：为用电设备工作提供所需电能的装置。也称**变换器（Converter）**。

线性电源（Linear power supply）：先将交流电经过工频变压器降低电压幅值，再经过整流滤波电路后，得到脉冲直流电，直流电源经过功率器件线性变换获得另外一种直流电压，最后经滤波得到带有微小波纹电压的直流电压，这种电源称之为线性电源。

开关电源（Switching mode power supply, 缩写 SMPS）：利用电子开关器件（如晶体管、场效应管、可控硅晶闸管等），通过控制电路使电源开关器件不停的“接通”和“关断”，实现电子开关器件对输入电压进行脉冲调制的控制，从而实现电压变换以及输出电压可调和自动稳压的电源。

开关电源与线性电源的区别

电源在各个领域中应用非常广泛，我们常说的稳压电源。根据电源工作方式不同可以分为线性电源（linear）和开关电源（switching），开关电源和线性电源的区别主要是工作方式不同。

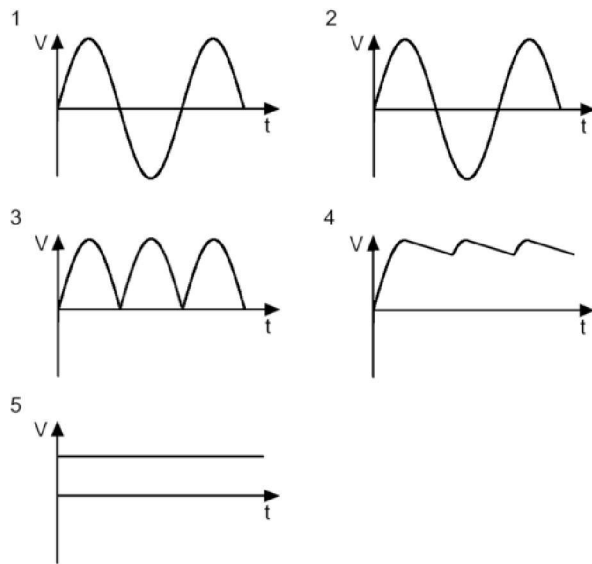
线性电源

线性电源主要包括工频变压器、输出整流滤波器、控制电路、保护电路等。其原理是先将交流电经过变压器变压，再经过整流电路整流滤波得到未稳定的直流电压，再经过电压反馈调整输出电压才能获得高精度的电压，这种电源技术很成熟，可以达到很高的稳定度。线性电源特征波形请见图 1。

线性电源的优点是调整率好，波纹也很小，没有高频的干扰和噪音，对外干扰小，EMI 特性好。适合用于模拟电路，各类放大器等，被广泛应用于科研院所、大专院校实验室、工矿企业等

单位。在电解、电镀、充电等领域得到广泛应用。

但是线性电源的工作方式特点，使他从高压变低压必须有降压装置，一般需要庞大而笨重的变压器，所需的滤波电容的体积和重量也相当大，且线性电源的功率器件和电压反馈电路均工作在线性状态，电源启动后其功率器件就一直在工作，调整管上有一定的电压降，在输出较大工作电流时，调整管的功耗太大，也降低了工作效率，所有的损耗都转化为热。所以线性电源最大的缺点是体积很大，笨重，效率低（一般 30~40%，好的 50~60%）、发热量也大，还要安装很大的散热片。因发热量大，影响电源的使用寿命。随着电子技术的发展，对电源的体积、可靠性要求越来越高，线性电源已经不能满足设备的需要，因此将逐步被开关电源所取代。益弘泰公司电源主要为高频开关电源。



1: 输入波形; 2: 变压器输出波形
3: 整流后波形 4: 滤波后波形
5: 线性调整后输出波形

图 1 线性电源波形

开关电源

顾名思义，开关电源的工作方式是“开关”状态的，通过电路控制开关管进行高速的导通与截止，将直流电转化为高频率的脉冲电提供给变

压器进行变压，从而产生所需要的一组或多组电压。开关电源主要包括输入电网滤波器、输入整流滤波器、变换器、输出整流滤波器、控制电路、保护电路等。图 2 是周期为 T ，幅度为 V_s 的驱动开关管的波形图，其中 t_{on} 为一个工作周期内开关管的导通时间， t_{off} 为关断时间；导通的占空比 $D=t_{on}/T$ 。

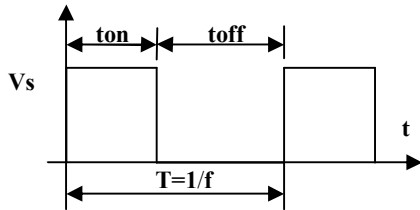


图 2 开关电源的开关驱动波形

与线性电源不同，开关电源功率器件工作在高频开关状态，其工作的状态是不断地重复“一开一关”，开关的频率从几十 kHz 到几百 kHz，甚至达到 MHz 级别，远远高于线性电源。因此开关电源的变压器体积大大的缩小，使开关电源可以获得比线性电源高的多得功率密度（单位体积输出的功率）。功率器件工作在开关状态，理想情况下开关管的损耗 $P=VI=0$ 。虽然实际开关并不是瞬间完成的，半导体器件的导通和关断的状态转换需要一个过程， VI 不再是 0，有一定的损耗，但相对线性电源来讲要小的多，电源的转换效率也就大大高于线性电源。目前开关电源效率一般可达到 70~90%，一些电路拓扑的电源做到 90% 以上，有些甚至在 95% 以上。因此开关电源的效率、体积小，被广泛应用于通信、铁路、矿山、航天等行业。

由于功率器件不断地高速关断和开通，半导体器件无法做到理想状态的切换，回路中也存在寄生参数，所以在开关瞬时产生高频的谐波分量。相对于线性电源，开关电源输出的电压波形并非真正的直线，而是叠加了与开关的频率相同的纹波或奇数倍开关频率的尖峰，如图 3 所示，

电压、电流调整率也略逊于线性电源。因此在应用开关电源时需关注输出滤波电路设计以及 EMI 干扰。

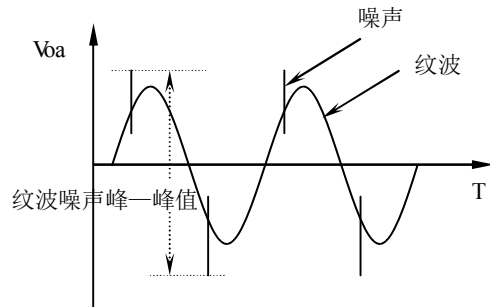


图 3 开关电源的输出纹波

开关电源概述

开关电源的分类

- 1) 按输入是否隔离可分为隔离、非隔离开关电源。
- 2) 按开关器件、储能电感与负载的连接方式可分为串联式开关电源和并联式开关电源。
- 3) 按工作开关类型可分为：硬开关（如 PWM 开关电源、PFM 开关电源）、软开关（如零电压开通 ZVS、零电流关断 ZCS）

常见拓扑

- 1) 非隔离开关电源的常见拓扑：BUCK(降压型)、BOOST（升压型）、BUCK-BOOST(降压-升压)。
- 2) 隔离开关电源的常见拓扑：单端正激、单端反激、半桥、全桥、推挽等。

本文以几个常用电路拓扑为基础，对开关电源的基本工作原理进行分析，试图展示开关电源的一些特性。以下所有分析均基于使用理想元器件条件，即半导体导通时压降、截止时漏电流均为 0，变压器为理想变压器，电感工作在线性区无饱和，电感电容寄生参数为 0，纹波电压忽略不计。

常用开关电源的拓扑原理

BUCK（降压）变换器

1 别称：降压变换器、串联开关稳压电源。

2 基本电路：

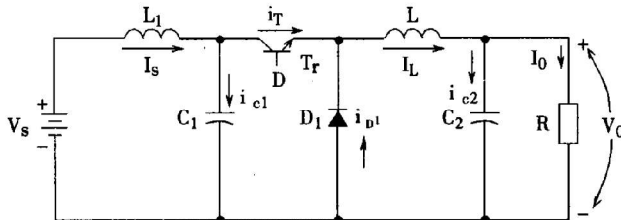


图 4 BUCK 电路及各支路电流定义

3 工作过程：

当 T_r 导通时， $I_s = I_L$ ，二极管 D_1 反向截止， L 进行储能，同时向电容 C_2 充电。

当 T_r 截止时， $I_s = 0$ ，二极管 D_1 续流导通， I_L 减小，当 $I_L < I_o$ 时， C_2 向 R 放电，维持 I_o 。

4 各点波形

根据电感电流 I_L 在周期开始时是否从零开始，可以将电感电流分为连续工作模式（图 5a）临界工作模式和不连续工作模式（图 5b）三种情况。临界工作模式就是每周期电感电流从 0 开始，是连续和不连续的过渡阶段，本文不做详细描述。

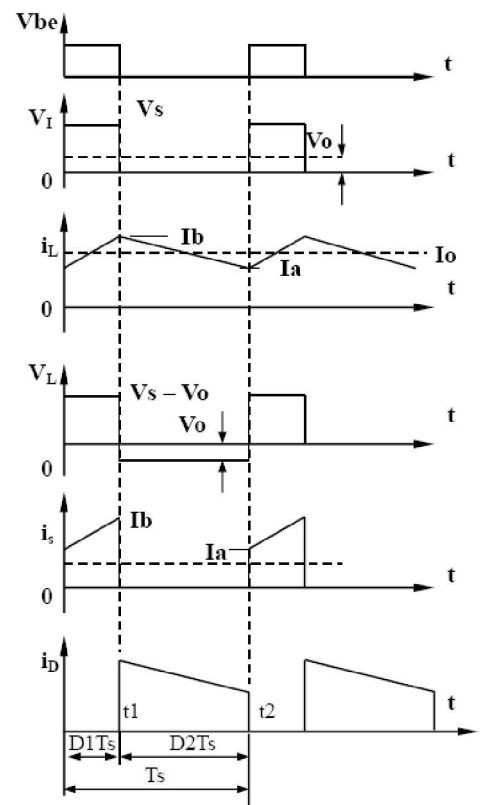


图 5 (a) 电感电流连续模式

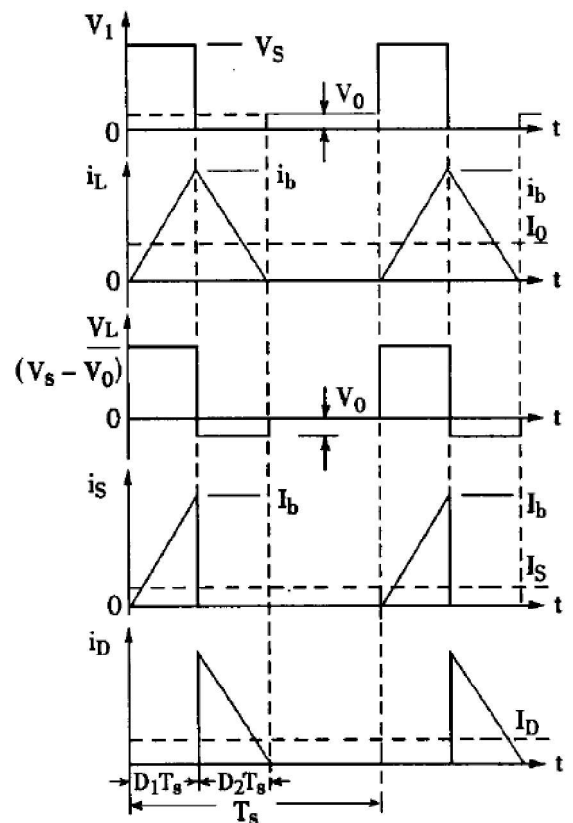


图 5 (b) 电感电流不连续模式

5 主要参数及关系式

1) 电感电流连续: 有较好的外特性。

$$M = \frac{V_o}{V_s} = D1$$

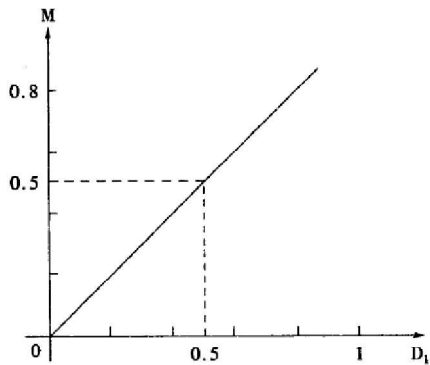


图6 BUCK $M=f(D1)$ 关系图中 M 是输出对输入的电压增益。

2) 电感电流不连续:

$$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D1}{D1 + D2} \quad D1 + D2 \neq 1$$

M : 电压增益, $M < 1$

T_s : 开关周期

t_1 : 开关接通时间

$D1$: 开关接通占空比, $D1 = t_1 / T_s$

$D2$: 二极管导通占空比, 当电感电流连续时为开关关断占空比, 且 $D1 + D2 = 1$ 。

6 电路特点

电路拓扑为非隔离, 电路简单, 无变压器的磁耦合, 可以实现较大的占空比 $D1$, 有较高的转换效率。主要应用于低压大电流领域, 可用导通电阻非常小的 MOS 管代替二极管, 可以降低损耗问题, 目前 Buck 电路应用同步整流技术, 用 MOS 管代替二极管, 被广泛应用于 POL 电源和分布式供电系统中。

BOOST (升压) 变换器

1 别称: 升压变换器、并联开关稳压电源。

2 基本电路

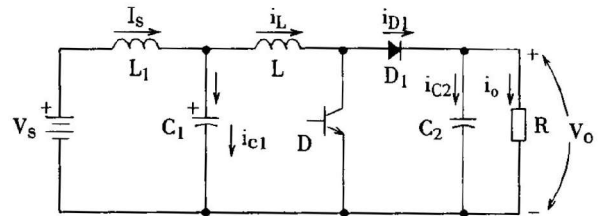


图7 BOOST 电路及各支路电流定义

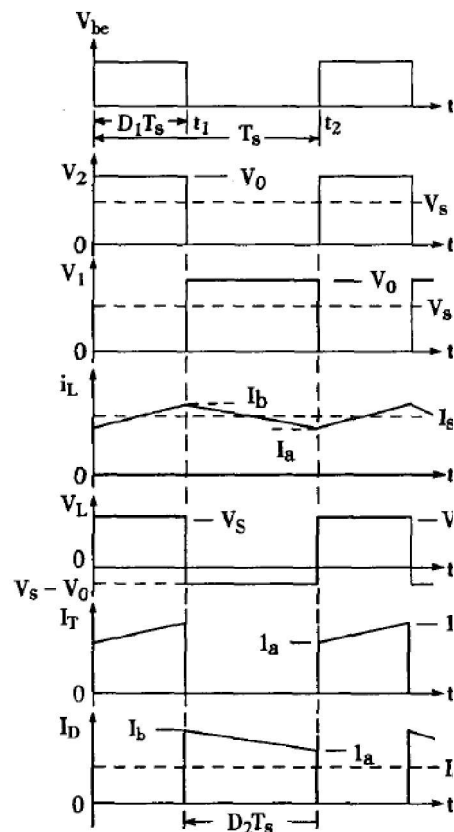
3 工作过程

当 D 导通时, L 进行储能, V_o 上“+”下“-”;

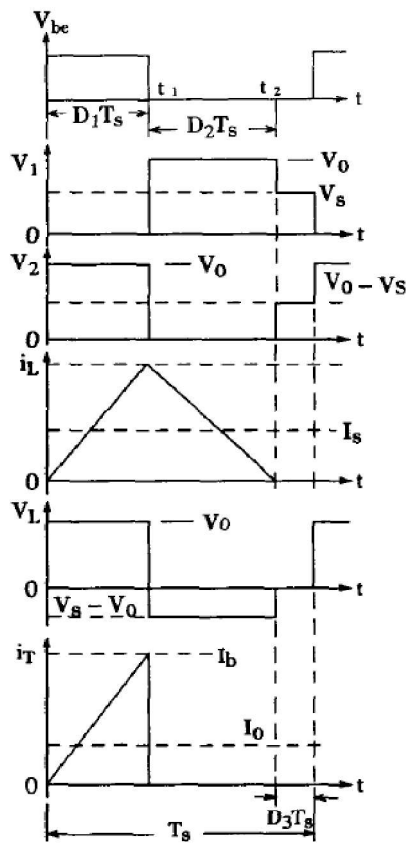
当 D 截止时, V_L 极性为左“-”右“+”, 与 V_s 串联, 电压为 $(V_L + V_s)$, 向输出供电。当 $(V_L + V_s) > V_o$ 时, 电容 $C2$ 充电, 并向 R 输出电压 V_o ; $(V_L + V_s) = V_o$ 时, 电容 $C2$ 充电电流为 0; 当 $(V_L + V_s) < V_o$ 时, $C2$ 向 R 放电, 维持 V_o 电压。

4 各点波形

根据电感电流 i_L 在周期开始时是否从零开始可以分为电感电流连续工作模式 (图 8a) 和电感电流不连续工作模式 (图 8b) 两种情况。



(a) 电感电流连续模式



(b) 电感电流不连续模式

图8 BOOST 变换器电感电流示意图

5 主要参数及关系式

$$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D_1 + D_2}{D_2}$$

1) 电感电流连续:

$$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D_1 + D_2}{D_2} = \frac{1}{1 - D_1} = D$$

$$D_1 + D_2 = 1$$

2) 电感电流不连续:

$$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D_1 + D_2}{D_2} = 1 + \frac{D_1}{D_2} = D_2$$

$$D_1 + D_2 \neq 1$$

M: 电压增益, $M > 1$

Ts: 开关周期

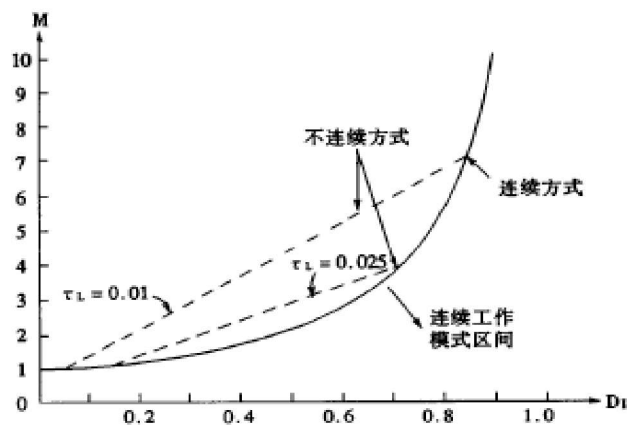
t1: 开关接通时间

D1: 开关接通占空比, $D_1 = t_1 / T_s$

D2: 二极管导通占空比, 当电感电流连续时为开关关断占空比, 且 $D_1 + D_2 = 1$ 。

6 特点

图9为理想条件下 $M = f(D_1)$ 曲线, 但实际中因电感电容寄生参数的影响, M 与 D_1 并不是单调升的关系, 故在实际应用时 D_1 有限的范围才能保证输出电压的恒定, 一般保证 $D_1 < 0.88$, 且尽量选择寄生参数小的电感和电容, 以便获得更高的转换效率。

图9 BOOST $M = f(D_1)$ 关系图

本电路属非隔离电路, 因 $M > 1$, 故可获得高于输入电压的输出电压, 被广泛应用于各种需求升压的场合, 如激光电源、光伏发电系统、LED 电源等。

单端反激变换器 (Single-ended Flyback Converter)

1. 概述

源于 BUCK-BOOST 电路, 加入隔离变压器, 电路简单, 较易实现宽输入电压范围内的电压转换, 但因变压器需存储能量, 所以必须有一定的气隙, 以免饱和。电路图如图 10。

2. 基本电路

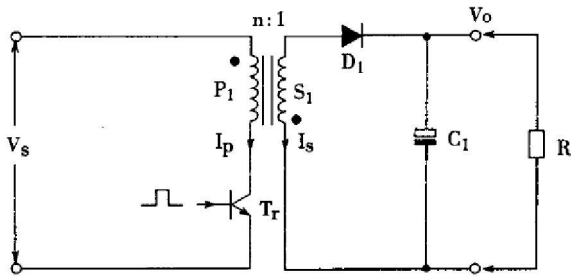
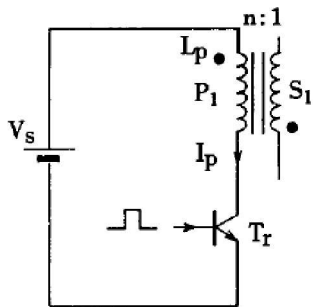


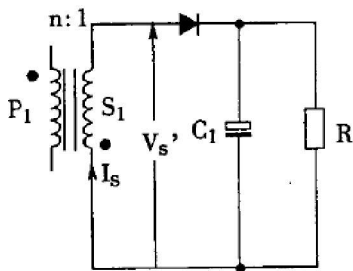
图 10 反激变换器基本电路图

3. 工作过程

等效电路见图 11。



(a) 原边电路能量储存阶段



(b) 副边电路能量传送阶段

图 11 反激变换器能量传递过程

1) 能量储存阶段：当 T_r 导通时，电路原边导通， D_1 反向截止，变压器原边绕组进行储能，其作用等效于储能电感。原边绕组中电流 I_p 的变化率 $dI_p/dt = V_s/L_p$ ，磁芯中磁感应强度由 B_r 增加至峰值 B_w 。

2) 能量传送阶段：当 T_r 关断时， $I_p = 0$ ，副边反激电压使整流管 D_1 导通，向 R 输出电压 V_o ，并同时给电容 C_1 充电。副边中绕组电流逐渐减少，变化率为 $dI_s/dt = V_s'/L_s$ (V_s' 为绕组副边电压， L_s 为变压器原边折算到副边的电感量)。 I_s 下降

为 0 时，磁芯磁通密度由 B_w 下降至剩余磁通密度 B_r 。当变压器输出不能维持 V_o 时，电容 C_1 向 R 放电，以保证输出电压的恒定。此时副边绕组兼起输出滤波电感的职能。

3) 变压器能量传送过程中遵循原副边能量守恒原则，及保证原副边有相同的安匝值，保证伏秒平衡。

4) 变压器绕组的电感量的大小，决定了在整个周期内能量传送的过程，可分为两种情况：能量完全传送方式（原边绕组存储的能量完全传递到副边）、不完全能量传送方式（原边绕组存储能量没有完全传递到副边）。实际中可调整变压器气隙的大小选择能量传递的方式。

4. 两种能量传送方式特点

1) 完全能量传送：原边绕组的能量在周期内可以完全传递到副边，从磁路来讲，不会产生偏磁饱和的问题，但由于电感量较小，传送同样的能量峰值电流很高，回路中器件的损耗和发热也是很高的，变压器本身的功耗最大，故效率较低，只适用于小功率产品中。

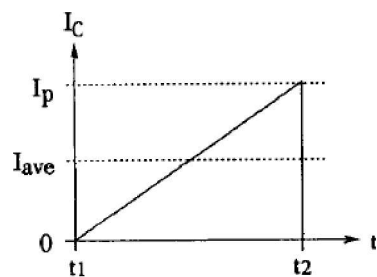
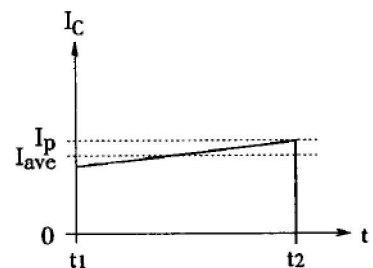
(a) 完全能量传递方式 (L_p 小, I_p 不连续)(b) 不完全能量传递方式 (L_p 较大, I_p 连续)

图 12 两种能量传递方式电流特点示意图

2) 不完全能量传递方式: 变压器原边绕组电感量较大, 原边的电流斜率较小, 工作时电路损耗较小, 易获得更高的效率和更小的纹波噪声。但由于磁化电流直流成分和磁滞较高, 变压器磁芯易产生饱和。

3) 实际应用中可在 1)、2) 间进行折中, 取一个中间的电感量, 可获得比较合适的气隙, 在完全能量传递方式下, 降低变压器饱和的可能性, 也获得合理的效率和纹波, 和更大一点的功率, 如图 13。

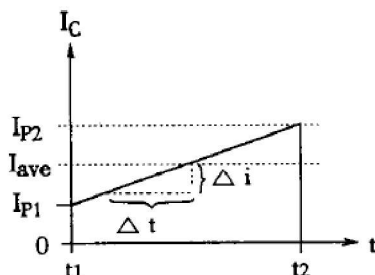


图 13 优化的不完全能量传递方式 (L_p 适中)

5. 主要参数和公式:

如果导通阶段的占空比设为 D , 则输出电压

和输入电压的关系是:
$$V_o = V_{in} \cdot \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{D}{1-D}$$

6. 主要波形

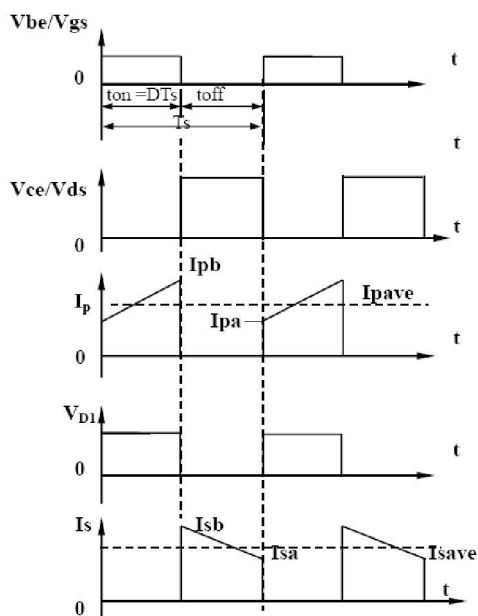


图 14 单端反激变换器的主要波形

7. 特点

1) 结构简单, 不需使用输出滤波电感, 成本较低, 且因输入电压变化对占空比影响相对较小, 更容易实现宽输入电压范围时的电压变换, 被广泛应用于宽输入、小功率的场合。

2) 因变压器只工作在一象限, 且储存能量, 需开气隙, 不完全能量传递需考虑磁复位和饱和问题, 占空比设计不宜太大, 故该拓扑一般使用于 150W 以下功率等级的产品中。

3) 为保证电源的可靠工作, 设计变压器时尽量选择软磁芯, 其磁滞回线尽可能的扁一些, 另外占空比设计一般不超过 0.5, 如需求较大占空比设计时, 可考虑增加磁复位电路。

开关电源应用特点

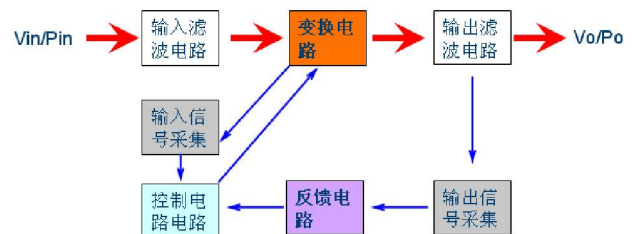


图 15 典型的开关电源原理方块图

通过前文所述, 可以看出开关电源是一个带有保护、反馈和控制功能的功率变换电路, 具有如下特点:

a) 输出直流成分中含有高频噪声。噪声是开关电源固有特性, 可以尽量减少, 但是无法消除。目前开关电源的输出纹波噪声峰峰值在 20MHz 带宽下, 一般要求是输出电压的 1% 左右。因此当开关电源应用于高频信号处理场合, 一定要做好滤波措施, 以免得出错误结果, 例如误码等。

b) 由于开关电源的高速开关动作, 使得电源工作时不但输出含有高频噪声成分, 输入也会有高频噪声电流和电压成分, 对电网环境有干扰, 当然随着技术的发展, 电源行业也在持续的降低 EMI。

c) 对 EMI 要求严格的场合，电源的输入输出必须添加适当的 EMI 滤波器。然而遗憾的是 EMI 滤波器一般使用磁性器件和电容，相对于模块电源来讲体积过大，无法加入模块电源内部。因此模块电源一般都无法自己通过 EMI 的相关标准，必须用户通过外加滤波器来达到目的。

d) 通过前文的分析，可以发现开关电源的输入阻抗是负阻特性，输入电压越低，输入电流越大，所以开关电源对输入阻抗也有较严格的要求，当输入线过长，或输入滤波器感性过大时，应在开关电源输入引脚附近并联适当的滤波电容。具体信息可以参考益弘泰公司相关产品的技术指标书。

e) 由于开关电源的高频工作特性，在某些场合下，例如输出负载由小到大或由大到小快速变化时，会由于磁滞收缩等现象导致磁芯或陶瓷电容发出响声。这种现象不同于装配缺陷，是开关电源的固有特性，可以改善但无法根除，即使人耳无法听见，其实还是存在，只不过是声音的频率不在人耳接收的范围内而已。因此开关电源应用于高品质音响电源时不但要注意输出纹波噪声对声音信号的影响，也要注意电源发出的可闻声音对音响效果的影响。