

基于填谷电路的恒流式LED 高压驱动电源的设计

沙占友 马洪涛

(河北科技大学信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050054)

摘要:设计一种基于填谷电路的无源功率因数校正器, 详细分析了填谷电路的基本原理, 阐述了LED高压驱动电源主电路及过电压/欠电压保护电路的设计原理。该恒流式LED高压驱动电源可将功率因数从0.55提高到0.92~0.965, 所对应的总谐波失真(THD)从151%降至42.5%~27.2%, 适用于节能环保型LED照明灯具。

关键词:无源功率因数校正; 填谷电路; 总谐波失真; LED高压驱动电源

A Design of Constant-current High-voltage Power Supply for LED Based on Valley Fill Circuits

SHA Zhanyou, MA Hongtao

(College of Information Science and Engineering, Hebei University of Science & Technology,
Shijiazhuang 050054, China)

Abstract: A type of passive power factor corrector based on valley fill circuit is designed in this paper. We analyze the basic principles of the valley fill circuit, and then expatiates the design method for the main circuit and over-voltage/under-voltage protection circuit in the LED high-voltage power supply. The constant-current LED high voltage power supply can improve the power factor from 0.55 to 0.92-0.965, while the corresponding total harmonic distortion decreases form 151% to 42.5%-27.2%. This power supply can be applied in energy-saving and environmental-protecting LED lighting lamp.

Keywords: Passive Power Factor Correction; Valley Fill Circuit; Total Harmonic Distortion; LED High-voltage Power Supply

中图分类号: TN86

文献标识码: B

文章编号: 0219-2713(2009)08-0027-05

0 引言

近年来, LED灯具(含LED和驱动电源)作为一种节能环保型照明灯具正在迅速推广, 被广泛用于阅读灯、手电筒、汽车方向灯、小型聚光灯, 标牌、建筑轮廓及穹顶照明、便携式闪光灯、医疗照明及装饰照明灯等领域。如何降低LED驱动

电源的总谐波失真, 提高其功率因数, 具有重要的现实意义。

1 功率因数与谐波失真

对无失真的交流电而言, 其输入电压与输入电流的表达式分别为

$$u = \sqrt{2}U \cos \omega t \quad (1)$$

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

式中的 u 、 i 均代表瞬时值， U 、 I 为有效值， φ 表示相角。交流输入的视在功率 $S=UI$ ，而有功功率 $P=UI\cos\varphi$ 。仅当 $\cos\varphi$ 达到1时， $P=UI=S$ 。

功率因数的英文缩写为PF(Power Factor)，其国标符号为 λ 。功率因数定义为有功功率与视在功率的比值：

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI\cos\varphi}{UI} = \cos\varphi \quad (3)$$

交流供电设备的功率因数是在电流波形无失真的情况下定义的。造成功率因数降低的原因有两个：一是交流输入电流波形的相位漂移，二是交流输入电流波形存在失真。相位漂移通常是由电源的负载性质(感性或容性)而引起的，在这种情况下对功率因数的分析相对简单，一般可用公式 $\cos\varphi = P/(UI)$ 来计算。但是当交流输入电流波形存在失真时，式(3)不再适用。

目前，采用AC/DC变换器的开关电源均通过整流电路与电网相连接。其输入整流滤波器一般由桥式整流器和滤波电容器构成，二者均属于非线性元器件。由于大容量滤波电容器的存在，使得整流二极管的导通角变得很窄，仅在交流输入电压的峰值附近才能导通，致使交流输入电流产生严重失真，变成尖峰脉冲。这种电流波形中包含了大量的谐波分量，不仅对电网造成污染，还导致滤波后输出的有功功率显著降低，使功率因数大幅度降低。普通AC/DC变换器的功率因数较低，只能达到0.6左右。因此，提高开关电源的功率因数不仅能降低线路损耗、还能减少电网的谐波污染，提高电网的供电质量。

总谐波失真是指用信号源输入时，输出信号(谐波及其倍频成分)比输入信号多出的谐波成分，一般用百分数表示。功率因数(λ)与总谐波失真(THD)存在下述关系：

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{1+(THD)^2}} \cos\varphi \times 100\% \quad (4)$$

当交流输入电流与电压保持同相位，即 $\cos\varphi = 1$ 时，式(4)可简化为

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{1+(THD)^2}} \times 100\% \quad (5)$$

利用功率因数校正器PFC(Power Factor

Corrector)，可使交流输入电流与交流输入电压保持同相位并滤除电流谐波，将设备的功率因数提高到接近于1的某一预定值。功率因数校正分无源功率因数校正(PPFC)、有源功率因数校正(APFC)两种类型。无源功率因数校正的特点是电路简单，成本低廉。

2 基于无源填谷电路的9W可调光LED高压驱动电源

如上所述，开关电源的输入整流滤波电路所采用的整流二极管和滤波电容均属于非线性元器件，在交流输入正弦波电压为 u 时，交流输入电流 i 的波形会发生严重失真，变成了尖峰脉冲，如图1所示。其特点是整流二极管的导通角显著变小，尽管电流有效值大，但电流平均值明显变小。例如，普通硅整流桥的响应时间大约为3ms，而50Hz交流电的半周期只有10ms，仅此一项即可使桥臂上整流二极管的导通时间减小到7ms，所对应的导通角就从理想情况下的 180° 减至 126° 。

为此，可在AC/DC变换器的输入级增加功率因数校正电路。“填谷电路”(Valley Fill Circuit)就属于一种新型无源功率因数校正电路，其特点是利用整流桥后面的填谷电路来大幅度增加整流管的导通角，通过填平谷点，使输入电流从尖峰脉冲变为接近于正弦波的波形，将功率因数提高到0.9左右。与传统的电感式无源功率因数校正电路相比，其优点是电路简单，功率因数补偿效果显著，并且在输入电路中不需要使用体积笨重的大电感器。

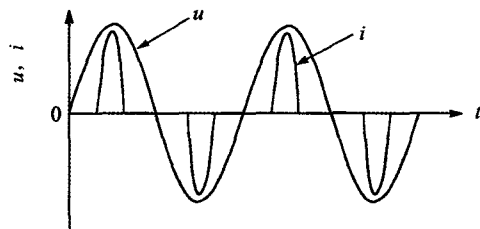


图1 交流输入电压与交流输入电流的波形比较

由LinkSwitch-TN系列产品LNK306P构成

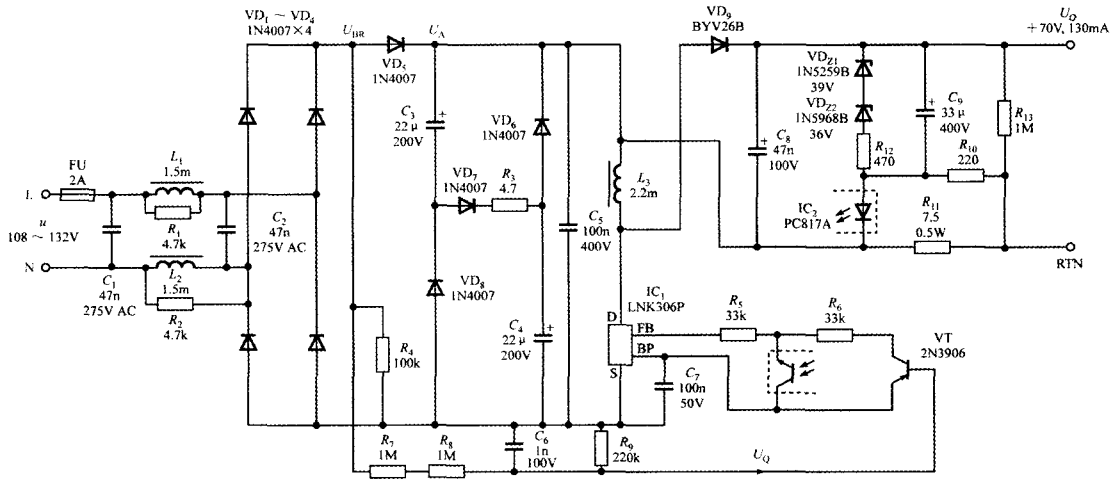


图2 基于无源填谷电路的9W恒流式LED高压驱动电源

的基于无源填谷电路的9W恒流式LED高压驱动电源如图2所示。该电路主要有以下特点：

(1) 电路简单，成本低廉。将无源填谷整流滤波电路与LNK306P相匹配，实现功率因数校正。当交流输入电压范围为108~132V时，可将功率因数提高到0.92以上，最高可达0.965(所对应的交流输入电压为90V)。满载条件下的电源效率超过85%。

(2) 在交流输入端使用了复式EMI滤波器(C₁、L₁、L₂和C₂)，R₁、R₂为泄放电阻。

(3) 利用晶体管(VT, 2N3906)电路实现欠电压保护。

(4) 在整流桥与填谷电路之间增加了隔离二极管VD₅。

全部由无源元器件构成的无源填谷电路如图3所示。总共仅需使用3只二极管(VD₆~VD₈)、两只电解电容器(C₃、C₄)和一只电阻器(R₃)。VD₆~VD₈采用1N4007型硅整流管。C₃与C₄的容量必须相等，均采用22μF/200V的电解电容器。R₃选用4.7Ω、2W的电阻器，开机时可限制C₃、C₄上的冲击电流。填谷电路的特点是C₃和C₄以串联方式充电，而以并联方式进行放电。VD₅为隔离二极管，可将整流桥与填谷电路隔离开。

设交流输入电压的有效值为 u ，峰值电压为 U_P ，整流桥输出的脉动直流电压为 U_{BR} ，VD₅右端电压为 U_A (此即C₃和C₄上的总电压)。

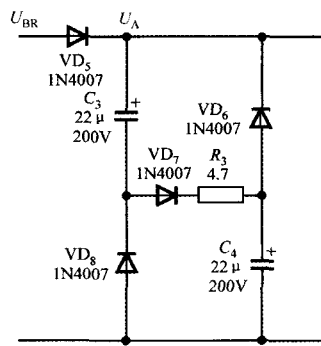


图3 无源填谷电路

阶段一：在交流电正半周的上升阶段，由于 $U_{BR} > U_A$ 时，VD₂、VD₃、VD₅和VD₇均导通， U_{BR} 就沿着C₃→VD₇→R₃→C₄的串联电路给C₃和C₄充电，同时向负载提供电流。其充电时间常数很小，充电速度很快。

阶段二：当 U_A 达到 U_P 时，C₃、C₄上的总电压 $U_A = U_P$ ；因C₃、C₄的容量相等，故二者的压降均为 $U_P/2$ 。此时VD₇导通，而VD₆和VD₈被反向偏置而截止。

阶段三：当 U_A 从 U_P 开始下降时，VD₇截止，立即停止对C₃和C₄充电。

阶段四：当 U_A 降至 $U_P/2$ 时，VD₅、VD₇均截止，VD₆、VD₈被正向偏置而变成导通状态，C₃、C₄上的电荷分别通过VD₆、VD₈构成的并联电路进行放电，维持负载上的电流不变。

不难看出,从阶段一一直到阶段三,都是由电网供电,除了向负载提供电流,还在阶段一至阶段二给 C_3 和 C_4 充电;仅在阶段四由 C_3 、 C_4 上储存的电荷给负载供电。

进入负半周后,在 VD_5 导通之前, C_3 、 C_4 仍可对负载进行并联放电,使负载电流基本保持恒定。对于 VD_1 、 VD_4 和 VD_5 导通后的情况,读者可参照上文自行分析。

综上所述,利用图3所示无源填谷电路,能大幅度增加整流管的导通角,使之在正半周时的导通角扩展到 $30^\circ \sim 150^\circ$ (30° 恰好对应于 $U_A = U_p \sin 30^\circ = U_p/2$, 150° 对应于 $U_A = U_p \sin 150^\circ = U_p/2$)。同理,负半周时的导通角扩展为 $210^\circ \sim 330^\circ$ 。这样,波形就从窄脉冲变为比较接近于正弦波。这相当于把尖峰脉冲电流波形中的谷点区域“填平”了很大一部分,故称之为填谷电路。实测该LED驱动电源的功率因数 $\lambda \geq 0.92$,完全符合能源之星国际节能标准,并且达到EN55015B国际标准对EMI的限定指标。交流输入电压 u 、交流输入电流 i 及 U_A 点的时序波形对照如图4所示。

开关电源输入交流电流的谐波分量很大,总谐波失真可高达 $100\% \sim 150\%$ 。不用填谷电路时的功率因数假定为 $\lambda = 0.55$ 代入式(5)中计算出输入交流电流的总谐波失真 $THD = 151\%$ 。增加填谷电路后,该LED驱动电源的功率因数提高到 $\lambda = 0.92 \sim 0.965$,所对应的 $THD = 42.5\% \sim 27.2\%$,证明总谐波失确实得到显著改善。

图2中, L_3 为降压/升压式变换器中的储能电感。输出整流管 VD_9 采用 $1A/400V$ 的超快恢复二极管BYV26B,它在LNK306P中的MOSFET关断期间导通,并将 L_3 储存的能量传输到输出滤波电容 C_8 和负载上。

3 保护电路的设计

输出过电压保护电路由稳压管 VD_{Z1} 和 VD_{Z2} 构成,二者的稳压值分别为 $39V$ 、 $36V$ (均为典型值)。一旦负载开路,可将输出电压钳位在 $75V$ 左右,起到保护作用。当负载开路时 C_8 上的电荷可

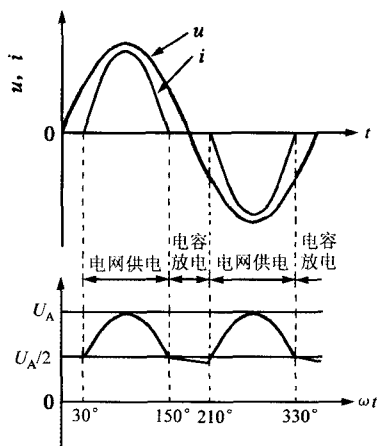


图4 交流输入电压 u 、交流输入电流 i 及 U_A 点的时序波形

通过 R_{13} 泄放掉。 C_9 为降噪电容,用于降低输出噪声。

R_{11} 为电流检测电阻,所设定的额定输出电流为 $130mA$ 电流。 R_{11} 上的电压被加到光耦合器PC817A中的LED的两端。该反馈信号可通过PC817A中的光敏晶体管、 R_5 接至LNK306P的反馈端FB。 R_{12} 为反馈环路直流增益的设定电阻。

欠电压保护电路由NPN型晶体管 R_4 、 $R_7 \sim R_9$ 、 C_6 和VT构成。通过对 U_{BR} 进行取样,能间接地判定电网电压是否正常。 U_{BR} 通过 $R_7 \sim R_9$ 分压后在 R_9 上得到脉动电压,再经过 C_6 滤掉纹波后获得直流取样电压 U_Q ,加到VT的基极上。当交流输入电压过低时 U_{BR} 也显著降低。一旦 U_{BR} 达到欠电压阈值 $U_{BR(UV)}$, U_Q 就降到 $5.1V$ 以下,令VT导通,使集电极电流流入FB端,将MOSFET关断,从而起到欠电压保护作用。欠电压阈值由下式确定:

$$\frac{R_9}{R_7 + R_8 + R_9} U_{BR(UV)} = 5.1V \quad (10-8)$$

从中可解出

$$\begin{aligned} U_{BR(UV)} &= 5.1V \times \frac{R_7 + R_8 + R_9}{R_9} \\ &= 5.1V \frac{1M\Omega + 1M\Omega + 220k\Omega}{220k\Omega} = 51.5V \end{aligned}$$

当MOSFET导通时, VD_9 处于反向偏置而截止,电流途经输出滤波电容 C_4 、负载及储能电感 L_2 ,在向负载提供恒定电流的同时,还有一部分

