

采用 TRIAC 调光的原边控制 LED 驱动电源设计

Design of LED Drive Power Supply with TRIAC Primary Controlled Adjust Light

宗兴洁 供稿

摘要：文章论述一种原边控制的采用 TRIAC 调光的单级反激变换器，这是可与 LED 驱动器兼容的驱动方案。采用原边控制，可使输出电流信号和 TRIAC 调光信号在原边获得，简化电路功能。输出电流通过 TRIAC 导通角的变化，得到近乎线性的调光曲线，有效解决了灯光的闪烁问题，且其结构简单、效率高、成本低。

关键词：原边控制，调光，驱动电源，TRIAC（三端双向可控硅开关元件），设计

中图分类号：TN86 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2016)01-3-127

1 引言

作为第四代照明光源的 LED，由于其节能、高亮度和长寿命而被广泛使用于各种照明领域，其技术和产品则不断获得进步和发展。其中，节能型 LED 调光技术是目前应用与研究的热点课题，如今，LED 照明的主要调光方式有：模拟调光、脉冲宽度调制 (PWM) 调光、TRIAC（三端双向可控硅开关元件）调光等。而可控硅 (TRIAC) 调光由于不需要改变原有电路，所以是目前普遍采用的调光方式。

适宜用于 TRIAC 调光的非隔离 LED 驱动器是在电路中加入电容器网络来增加维持电流，以保证 TRIAC 工作在线性周期，从而避免照明产生闪烁问题。但是，这种方式仅适用于半桥电路结构，并需要外加电路来检测 TRIAC 的调光角。针对带隔离输出的 TRIAC 调光之 LED 驱动，提出了适宜于反激 PFC 转换器的前馈控制方案，其输出电流通过输入功率控制，但其输出电流精度受到限制。由于 TRIAC 与 LED 兼容，大部分行业的解决方案的效率都低（触发角检测和 TRIAC 维持电流需要虚拟负载），复杂的隔离反馈结构或者两级转换的高成本，使得简单的高性能的且适用于 TRIAC 调光的 LED 驱动器仍有必要。

本文讨论所设计的原边控制的单级反激变换器，适用于 TRIAC 调光，且与 LED 驱动器兼容的驱动方案。其输出电流由原边检测的信号精确地计算控制，在 DCM 模式

下操作变换器，输入电流将跟随输入电压得到高功率因数，使 LED 驱动器与 TRIAC 调光器很好地兼容。此外，使用原边控制，使得输出电流信号和 TRIAC 调光信号在原边获得，简化了电路功能。输出电流通过 TRIAC 导通角的变化而改变，得到近乎线性的调光曲线。

2 工作原理简介

由于 TRIAC 调光器的成本较低，并且能与 LED 驱动电源兼容，所以其使用很普遍。在实际使用中，虽然由于其输入电流高度扭曲使得功率因数无关紧要，但在带 PFC 控制的调光方式中，使输入电流跟随输入电压变化仍具有重要意义。本设计的控制方案使输入电流跟随输入电压变化而得到较高的功率因数。TRIAC 调光功能可以很容易实现，其关键是如何检测调光角和改变基于调光角的输出电流。

2.1 TRIAC 调光器

图 1 所示为 TRIAC 调光器输入电压经整流后的波形图。在图中可以看出，TRIAC 在调光角时触发导通，在电压过零 (0) 时关断。此时，触发相位角的输出电压 V_{out} 由以下式 (1) 计算：

$$V_{out} = V_F + V_{in} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (1)$$

式中， V_{out} 和 V_{in} 分别是调光器输出电压和线电压的有效值。

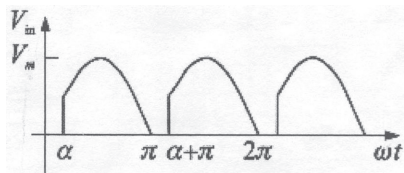


图1 TRIAC调光器整流后波形

V_F 是 LED 的阈值电压。此时，功率因数可以由以下式 (2) 表达：

$$PF = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (2)$$

在调光情况下，输出电压波形明显发生了畸变，且产生谐波。从式 (2) 可知，当调光角由 α 逐渐接近 π 时，功率因数也随着减小。因此，需要增加设计功率因数校正电路以提高功率因数。

2.2 单级反激PFC变换

为了得到较高的功率因数，反激变换器通常用于 DCM 或 CRM 工作模式。原边控制的反激变换控制原理如图 2 所示。其每个开关周期的输出电流都由 I_o 。计算模块计算得出，然后将累积输出电流 I_{o-est} 与输出参考电流 I_{o-ref} 比较，误差信号 V_{ea} 反馈给乘法器。误差放大器的频带宽度远低于传统 PFC 控制器的线性频率。乘法器的其它输入是电流波形的参考信号 $V_{ac}(t)$ ，与整流器总线电压 V_d 有相同的波形。乘法器的 I_{ref} 输出用来控制流经原边开关的峰值电流。

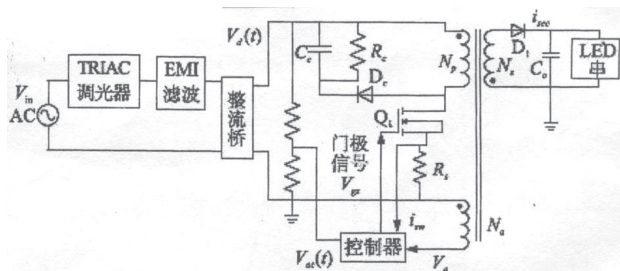


图2 原边控制的反激PFC电路

当原边开关 Q_1 导通，变压器的磁化电流 (i_{sw}) 呈线性增加。当 i_{sw} 达到参考电流 I_{ref} ，开关 Q_1 关断，磁化电流传输到副边，则副边二极管 D_1 导通，磁化电流线性增加。一旦电流达到 0，开关管 Q_1 重新导通。

$$i_{sw}(t) = I_{ref}(t) = I_p \cdot |\sin(\omega_{line} \cdot t)| \quad (3)$$

$$v_d(t) = V_{in} \cdot |\sin(\omega_{line} \cdot t)| \quad (4)$$

在 DCM 工作模式下的稳态波形如图 3 所示。

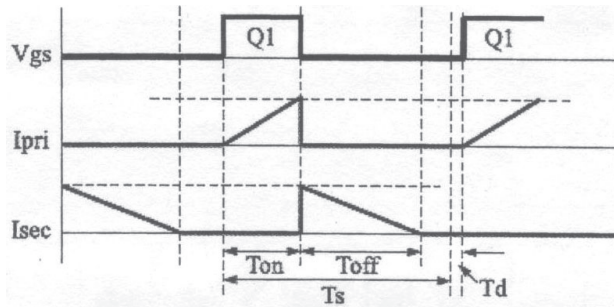


图3 DCM模式下原边信号的稳态波形

3 电路的设计制作

针对 TRIAC 调光中出现的尖峰电流及 LED 灯闪烁问题，在电路中设计一个无源泄放电路和一个有源阻尼电路，主功率拓扑采用单级反激变换电路，工作于电流断续模式，其电路如图 4 所示。其中，输入电压范围为 90Vac~265Vac，输出功率为 8W，输出直流电压是 22V，输出电流 350mA，调光范围为 1%~100%，调光过程稳定无闪烁。

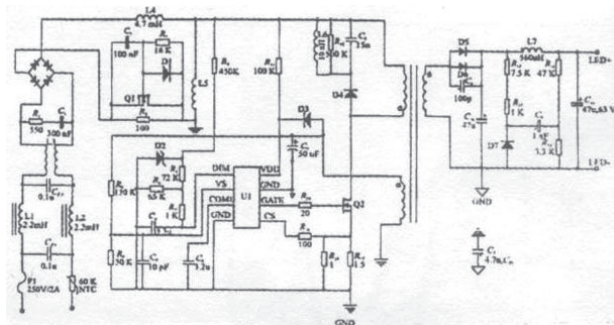


图4 基于FL7730的TRIAC调光驱动器电原理图

该电路主要包括：无源泄放电路、有源阻尼电路、控制电路、单级反激变换电路。其中控制电路选用飞兆半导体公司的控制芯片 FL7730。FL7730 是一款适合于单级反激拓扑的有源功率因数校正控制器，其采用模拟检测方式，可以兼容传统的 TRIAC 调光，实现调光控制。本设计采用原边控制简化电路，降低了成本，同时其效率达到 0.8 以上。其调光过程平稳且 LED 灯无闪烁，较好地实现了线性频率控制，其实物照片如图 5 所示。

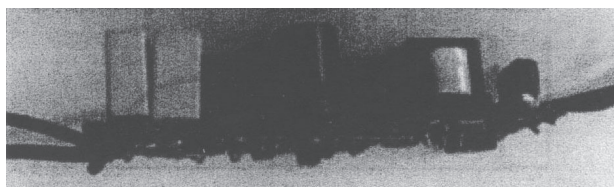


图5 调光控制器实物照片

在图4所示的电路中，MOS管电流的有效值和耐压值分别由下列式(5)、式(6)计算：

$$I_{\text{RMSP}} = I_{\text{PKP}} \cdot \sqrt{\frac{F_2(K_p)}{3}} \quad (5)$$

$$V_{\text{MOS}} = V_{\text{PKmax}} + V_F + \Delta V \quad (6)$$

式中， I_{PKP} 是初级电流峰值， V_{PKmax} 是最大输入交流电压峰值， V_F 是反射电压， ΔV 是漏感电压。

副边输出电流 I_{LED} 由以下式(7)计算：

$$I_{\text{LED}} = \frac{T_{\text{DIS}}}{2T} \cdot V_{\text{CS}} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot \frac{1}{R_{\text{CS}}} \quad (7)$$

式中， T_{DIS} 是开关的关断时间， T 是开关周期， V_{CS} 是原边电流检测电压。

3.1 无源泄放电路设计

无源泄放电路为 TRIAC 提供维持电流和擎住电流，以避免 LED 的闪烁和误触发。在图4中由电阻 R_1 和电容 C_1 组成。电感 L_4 为输入滤波电感。其中， C_1 值的大小决定 TRIAC 导通的泄放电流的大小。在调光中，泄放电流越大，调光稳定性越高。电阻 R_1 在电路中起阻尼作用，抑制调光器触发时电容 C_1 快速充电引起的尖峰电流。

3.2 有源阻尼电路设计

图4中左上部分为有源阻尼电路，电阻 R_2 、 R_3 、电容 C_3 、二极管和 MOS 管 Q_1 组成，用来抑制尖峰电压。其电路的工作波形如图6所示。在调光器触发时，容易引起较大的电流尖峰，通过电源线路为电容 C_m 快速充电。如果没有阻性阻尼，该电流尖峰将引起电源电流振荡，大电流则将引起调光器误触发，破坏 TRIAC 调光器。采用阻尼电阻可以抑制尖峰电流，但同时阻尼电阻的功耗也较大。

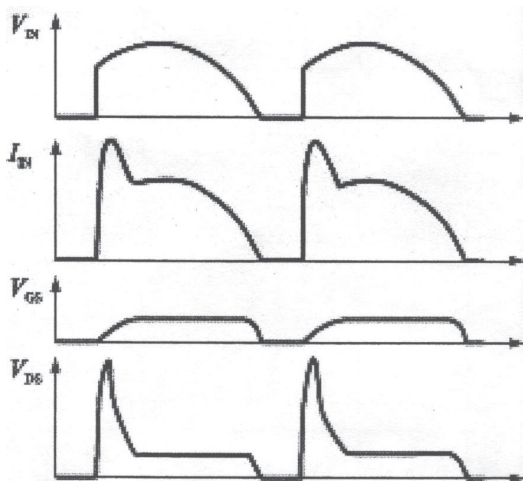


图6 阻尼电路工作波形

4 仿真结果与检测数据分析

图7所示为在不同导通角时的整流桥输出电压的波形图。由于调光器内部 RC 电路的延时作用，使得最大最小调光角受到限制。由图中可以看出，随着控制角的增大，则可调电压的范围逐渐变小。同时，由于电路中加入了有源阻尼，有效地抑制了尖峰电压。

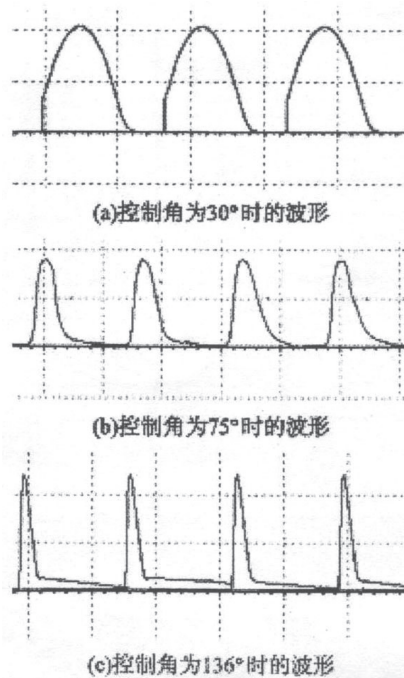


图7 不同控制角时输入电压的波形图

图8所示为调光曲线图（调光角相对于 LED 电流的关系），表1则给出了实验数据。在图8上可以看出，随着调光比的减小，LED 中的输出电流平滑下降，实现平滑调光。这是由于调光角越小，可调电压范围越小，输入电压的有效值也减小，因此输出电流也减小。从表1中可知，电路的功率因数达到 0.9，效率在 0.8 以上。

下转134页

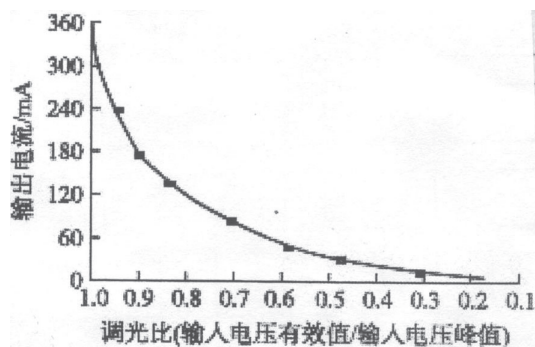


图8 调光曲线图（调光角相对LED电流的关系）