

无源 PFC 电路在 LED 驱动电路中的应用研究

郑艳丽, 秦会斌*

(杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对小功率 LED 驱动电路领域中, 由于受体积和成本限制而无法使用有源功率因数校正(PFC)电路从而导致电源功率因数较差的问题, 首先分析了需要进行功率因数校正的原因, 然后对应用于 20 W LED 驱动电路中的无源功率因数电源进行设计, 以及电容选型等方面进行研究。对 4 种不同的无源功率因数校正电路进行了比较, 实验结果表明在 LED 驱动电路中一种填谷式无源功率因数校正电路是低成本、高功率因素的功率因数校正电路, 符合能源之星的标准, 不存在波峰因数等问题。

关键词:填谷式; 无源功率因数校正; LED; 功率因数; 驱动器

中图分类号: TM923.34

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)06-0753-04

Research of passive PFC circuits in LED driver circuit

ZHENG Yan-li, QIN Hui-bin

(School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at LED driver circuit for low-power field, due to size and cost constraints, the driver circuit can not use the active power factor correction(PFC) circuit, leading to the problem of poor factor. It was first analyzed why the factor needs to be corrected. Then, the research was done in passive power factor correction circuit designing and the model of capacity with 20 W LED driver circuit. Based on the research, there were four circuits which were compared with others, so that one valley-fill passive power factor correction circuit was found. Research results indicate that it is with low cost and high power factor and the circuit can meet Energy Star standards and there is no crest factor and other issues.

Key words: valley-fill; passive power factor correction(PFC); LED; power factor; driver

0 引言

采用市电供电的 LED 驱动电路的应用较为广泛, 现在涉及的主要领域有显示器背光、指示灯、照明应用等。对于照明应用的 LED 驱动电路仅仅把 LED 点亮是不够的。一般 LED 照明驱动电路需要满足谐波、效率、功率因数、EMI 抑制以及安全标准等^[1-2]要求。

提高其线路功率因数, 限制输入工频谐波电流是制作 LED 驱动电路必须考虑的问题。欲解决这种问题, 则必须采用功率因数校正电路。PFC 电路一般可分为两种: 一种是有源功率因数校正(APFC); 另一种是无源功率因数校正。APFC 由有源和无源的分立元件以及专用 IC 共同调整电流的波形, 对电流电压间的相位差进行补偿。APFC 可以达到较高的功率因数—通常可达 98% 以上, 但成本也相对较高。无源 PFC 电路虽然应用

效果不及 APFC, 但其电路非常简单, 成本很低。无源 PFC 电路有多种, 其中填谷式电路比较适合应用于 LED 照明电源中^[3]。

本研究针对应用 20 W LED 驱动电路中的无源功率因数电源进行设计及电容选型。

1 功率因数概念及功率因数校正原因

1.1 功率因数概念

交流电流过负载时, 加在该负载上的交流电压与通过该负载的交流电流产生相位差, 人们便从中引出功率因数这一概念。

根据功率因数的定义:

$$PF = \frac{\text{有功功率}}{\text{视在功率}} = \frac{UI \cos \alpha}{UI} = \frac{I_1 \cos \alpha}{I} \quad (1)$$

其中:

收稿日期: 2010-11-29

作者简介: 郑艳丽 (1987-), 女, 山西五台人, 主要从事开关电源和 LED 驱动方面的研究. E-mail: zyl43206@sina.com

通信联系人: 秦会斌, 男, 教授, 硕士生导师. E-mail: qhb@hdu.edu.cn

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 + \dots} \quad (2)$$

式中: $I_1, I_2, \dots, I_n$ —电流基波分量, 二次谐波, $\dots, n$ 次谐波电流的有效值; I_1/I —畸变因数, 表示基波电流相对值; $\cos \alpha$ —位移因数, 即功率因数为畸变因数和位移因数的乘积。

位移因数越低, 则设备的无功功率越大; 畸变因数越低, 表示电流谐波分量越大, 将造成电流畸变, 使功率因数降低, 所以电容输入型电路的 PF 值较低, 一般为 0.155 ~ 0.165。

1.2 功率因数校正的原因

市供电的电源电路一般前端需要加入一个 AC/DC 变换电路将交流电转换成直流电, 为后端电路供电。AC/DC 转换电路一般采用全波桥式整流滤波电路, 如图 1(a) 所示。在 AC 电压峰值附近, AC 电压才会高于滤波电容上的电压使整流二极管正向偏置而导通, 二极管导通角仅为 60° 左右, 如图 1(b) 所示, 因此导致输入电流发生严重失真。交流输入电流严重失真, 呈现出高幅度窄尖峰脉冲。

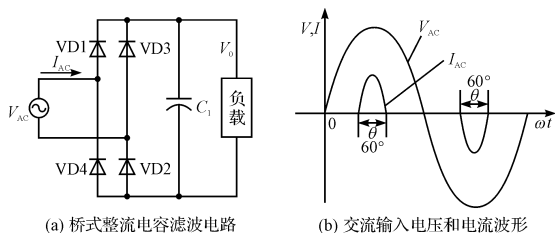


图 1 桥式整流滤波电路及其输入电压与电流波形

由图 1 可分析出, 这种畸变的电流含有丰富的谐波成分, 严重影响电器设备的功率因数。由理论推导也可以证明, 功率因数与电流总谐波含量的近似关系为:

$$PF = 1 / \sqrt{1 + (THD)^2} \quad (3)$$

因此, 降低电器设备的输入电流谐波含量是提高功率因数的根本措施。

功率因数偏低的影响:

(1) 供电设备的带负载能力被打折扣, 即降低了带负载能力。

(2) 输电线路由于无功电流存在, 增加了输电线路损耗。

功率因数校正正式提出是在 20 世纪 80 年代, 简称 PFC。功率因数校正是针对开关电源交流输入电流波形发生畸变的情况而采取的技术措施, 目的就是校正发生畸变的电流波形, 使之尽可能恢复成正弦波, 并且与交流电压趋于同相位, 从系统的输入端看, 整个系统的等效电阻尽可能呈现纯电阻性, 从而使输入功率因数提高。

填谷式无源 PFC 电路曾经应用于电子节能灯电

路中, 虽然其线路功率因数可达 0.9 以上 (典型值为 0.95), 但其灯电流波峰因数高达 2 ~ 2.1, 不符合标准规定的小于等于 1.7 的要求。

由于 LED 驱动电路为恒电流输出, 与电子镇流器输出为高频 (40 kHz 左右) 不同, LED 电源采用无源 PFC, 不存在波峰因数等问题^[4-5]。

2 填谷式无源 PFC 在 20 W LED 照明电路中的应用及改进

基于 SMD802 驱动芯片采用填谷式无源 PFC 电路的 LED 照明电源电路图如图 2 所示。本研究利用该电路的主要结构对填谷式无源 PFC 部分进行两个方面的研究分析, 提出有效的提高功率因数的方案, 即通过对填谷式无源 PFC 电路进行改进, 提高电路的功率因数。其 AC 输入为 85 V ~ 265 V, DC 输出为 56/350 mA, 可以驱动含 16 个 $V_F = 3.5$ V、 $I_F = 350$ mA 的白光 LED 串, 线路功率因数大于 0.9, 总谐波失真 THD < 35%。

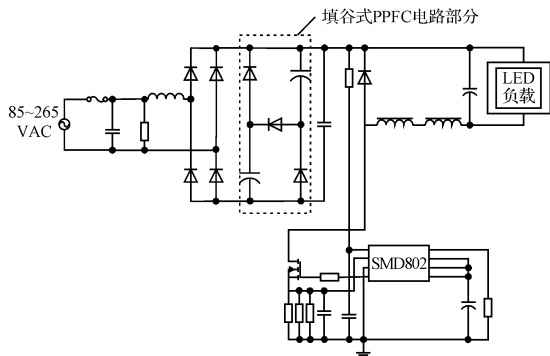


图 2 基于 SMD802 采用填谷式无源 PFC 电路的 LED 照明电源电路

2.1 填谷式无源 PFC 电路及改进电路工作原理

2.1.1 填谷式无源 PFC 电路工作原理

由 3 个二极管 (VD5、VD6、VD7) 和 2 个电容组成的填谷式无源 PFC 电路如图 3 所示。

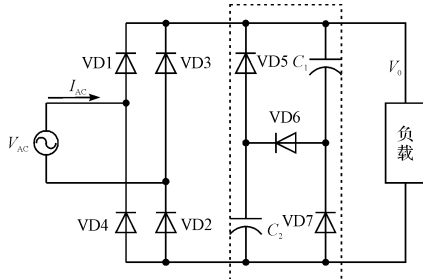


图 3 填谷式无源 PFC 电路图

其工作原理基于降低输出直流电压, 在每一个半周期内, 将交流输入电压高于直流输出电压的时间拉长, 整流二极管的导通角就可以增大 (增加至大约 120° 左右), 电源电压过零的死区时间则缩短, 其电流波形趋于

连续,包络线趋于正弦波,这样交流输入电流追逐电源电压瞬时变化轨迹,可将电路的功率因数提高到 0.9 以上,电源总谐波失真度 THD 降低到 35% 以下^[6-8]。

2.1.2 改进 I 型电路工作原理

改进 I 型填谷式电路如图 4 所示,是一种缓充快放型填谷式电路。通过在 VD6 上串联一个电阻 R_1 ,对 C_1 和 C_2 进行缓慢充电;而放电回路并没有经过电阻 R_1 ,放电速度快。其结果是延长了 C_1 和 C_2 的工作时间,使 VD1、VD2、VD3 和 VD4 工作连续性更好,其电流波形更接近电压波形。一般此电路能够使功率因数提高 1~2 个百分点。

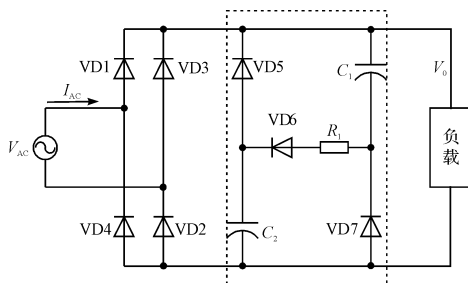


图4 改进 I 型填谷式电路

2.1.3 改进 II 型电路

改进 II 型填谷式电路如图 5 所示,是一种缓充缓放型填谷式电路,分别在 C_1 和 C_2 各串接一个电阻 R_1 和 R_2 ,对 C_1 和 C_2 达到缓充缓放的效果。此电路可以使功率因数提高 1.5~2.5 个百分点。

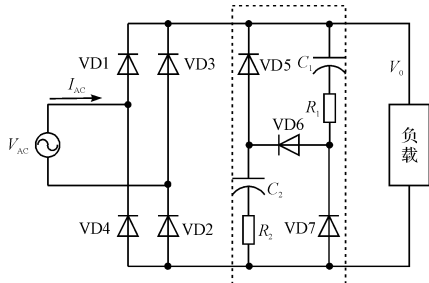


图5 改进 II 型电路

2.1.4 三级填谷式电路

三级填谷式电路如图 6 所示,它其实是在将两个填谷式电路嵌套起来。其原理与填谷式无源 PFC 电路基本相同。分别对 C_1 、 C_2 和 C_3 进行充电,放电路径分 3 条: C_1 通过 VD6 和负载, C_2 通过 VD7、VD8 和负载, C_3 通过 VD5 和负载进行放电。此电路对填谷式电路基本上没有提高功率因数,反而下降^[9-10]。

2.2 参数设计

基于 SMD802 驱动芯片的 LED 照明电源电路,外部电路参数,电路输入电压为 85 V~265 V 交流电,电路输出为 LED 灯串,通过 SMD802 外部的采样电阻的

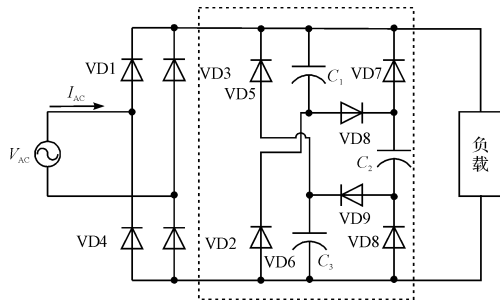


图6 三级填谷式电路

调节可以改变输入电路的功率。输入端的 LC 电路为 EMI 滤波电路。后端为 SMD802 控制电路,中间部分为无源 PFC 电路。

2.2.1 工作频率设定

振荡器的工作频率能被用一个外部电阻 R_{osc} 在 25 kHz~300 kHz 之间设定,即:

$$F_{osc} = \frac{2500}{R_{osc} + 22} \text{ kHz}$$

设定频率为 60 kHz 附近,选择 $R_{osc} = 390 \text{ k}\Omega$, $F_{osc} = 60.68 \text{ kHz}$ 。

根据图 3 的基本电路进行电路参数设计。

2.2.2 二极管选择

由于电路输出电流为毫安级,且经过整流之后的输出电流最大电流在 1 A 以下,可以选择普通的二极管,如 1N4007。

2.2.3 电容的选择

由于填谷式电路中电容的充放电是有方向的,且需要的存储能量较大,选择电解电容作为填谷式电路中的电容。电路中 $C_1 = C_2$,电容的耐压值应该相加大于 300 V 多一些,本研究选择 160 V~250 V 左右。

填谷式电路中电容储存的能量最大为:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{C_1}{2} V_p^2 = \frac{1}{2} (2C_1) \left(\frac{V_p}{2} \right)^2 \quad (5)$$

由于填谷式电路工作在 50 Hz 交流电整流过后的输出,其频率为 100 Hz,对于电容值,可以通过简单的计算如下。

电流大小与电压的关系:

$$i = C \frac{dU}{dt}; i = C \frac{\Delta U}{\Delta t};$$

$$C = i \frac{\Delta t}{\Delta U}; i = 100 \text{ mA} \sim 1 \text{ A};$$

$$\Delta U = 310 \text{ V}; \Delta t = 1/100 \text{ s} = 0.01 \text{ s};$$

$$C = i \frac{\Delta t}{\Delta U} = (100 \text{ mA} \sim 1 \text{ A}) \times \frac{0.01 \text{ s}}{310 \text{ V}} = 3.2 \text{ }\mu\text{F} \sim 32 \text{ }\mu\text{F}。$$

根据电路的实际测试与调节,在此电路中选择 22 μF 的电解电容,可以是功率因数达到最佳效果。

图 4、图 5 中电容设计参数与图 3 中参数基本相同,实际测试过程中适合选择 22 μF 。

2.2.4 电路中电阻的选择

对于电路 4 中电阻 R_1 的选择,因 R_1 有损耗,因此一般 R_1 选取较小。且由于电路中经过电阻的电流较大,需要功率较大的电阻,因此选择大小 10 Ω 左右,功率为 2 W 的电阻。经过反复测试,得出 $R_1 = 10 \Omega$ 。

对于电路 5 中电阻 R_1 和 R_2 的选择,与电路 4 中相似,经过实验测试,得出 $R_1 = R_2 = 5 \Omega$ 。

电路 6 中电容器的选择方式与电路 3 中相同,经过 6.8 μF 、10 μF 、22 μF 、33 μF 等电容器的测试得出,最佳选择为 $C_1 = C_2 = C_3 = 10 \mu\text{F}$ 。

2.3 4 种无源 PFC 和仅含电容滤波的电路性能比较

笔者根据研究的 4 种功率因数校正电路以及未接功率因数校正电路的 20 W LED 驱动电路输入性能进行了功率因数以及谐波参数的测量,对比参数如表 1、表 2 所示。

表 1 20 W LED 驱动中无源 PFC 电路的功率因数部分性能参数 1

电路类型	输入功率/W	功率因数	总谐波/(%)	3 次谐波/(%)	5 次谐波/(%)
基本电容(22 μF)	20	0.593	133.8	90.4	75.8
基本填谷式(22 μF)	20	0.918	33.98	15.30	7.73
改进 I 型(22 μF)	20	0.928	30.98	13.58	5.85
改进 II 型(22 μF)	20	0.938	30.23	14.93	6.38
三级填谷式(10 μF)	20	0.905	39.38	22.58	9.15

表 2 20 W LED 驱动中无源 PFC 电路的功率因数部分性能参数 2

电路类型	输入功率/W	7 次谐波/(%)	9 次谐波/(%)	11 次谐波/(%)	13 次谐波/(%)
基本电容(22 μF)	20	51.9	32.8	16.3	6.9
基本填谷式(22 μF)	20	24.08	7.95	5.63	8.18
改进 I 型(22 μF)	20	19.95	7.88	9.75	5.85
改进 II 型(22 μF)	20	20.78	5.33	6.45	5.18
三级填谷式(10 μF)	20	3.38	18.23	13.58	2.03

从上面 4 种不同无源 PFC 电路的电性能比较可以看出,改进 II 型电路在电路的功率因数校正方面效果最为理想。从包含无源 PFC 电路与无 PFC 电路的电性能比较中可以看出,填谷式电路能显著改善驱动电路的功率因数,抑制电流谐波,特别是对 5 次谐波的抑制。其中两级填谷式电路在 3 次和 7 次谐波抑制方面不够理想;三级填谷式在 3 次和 9 次谐波抑制方面不够理想,但对 7 次谐波抑制效果较好。

2.4 其他电路参数影响

应用填谷式无源 PFC 电路(电容选取为 22 μF)输入功率与功率因数之间的关系如图 7 所示。本研究采

用电路 3 中的填谷式无源 PFC 电路的基本电路,调节 SMD802 外围的采样电阻的阻值调节电路的功率,可以看出,对应于同样的 LED 驱动电路,其功率大小的调整,对功率因数是有影响的,但必然存在一个值使其功率因数达到最大。

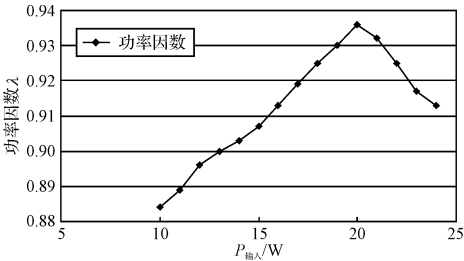


图 7 输入功率与功率因数关系

3 结束语

对市供电的 20 W LED 驱动电路系统采用功率因数校正电路,以满足 IEC1000-3-2 等标准对 25 W 以下照明设备的电流谐波限制要求,并且满足能源之星标准功率因数大于 0.9。经过电路的反复调试与电路分析,可以得出,改进 II 型无源 PFC 电路在功率因数校正方面较其他方案效果好,并且可以较大幅度地提高功率因数。此外通过实验还得出填谷式电路对于功率因数的改善和驱动器的功率大小有关,选用特定的电容制成的电路在特定的功率下能达到最佳效果。

参考文献(References):

[1] 毛兴武,祝大卫. 新型电子镇流器原理与制作[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.

[2] 郝胜玉,王松,徐化龙. 电子镇流器无源功率因数校正的仿真研究[J]. 山东理工大学学报:自然科学版,2008,22(2):96-99.

[3] 蒋孝平,梁慧. 填谷式无源 PFC 在离线 LED 照明电源中的应用研究[J]. 灯与照明,2009,33(3):36-38.

[4] 黄秋,方方,丁卫撑,等. 一种实用小功率开关电源的研制[J]. 电子设计应用,2009(5):98-100.

[5] 国家标准化工作委员会. GB 4343. 2 1999 中国标准书[S]. 北京:中国标准出版社,1999.

[6] 黄赞武. 高频开关电源的设计[D]. 北京:中国农业大学信息与电气工程学院,2000.

[7] 倪志红. 开关电源功率因数校正技术的研究[D]. 南京:南京理工大学电子与信息工程学院,2003.

[8] MORAIS S, FARIAS A, FREITAS V J, et al. A high power factor ballast using a single switch with both power stages integrated[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006(3):524-531.

[9] MUTHU S GANIES J. Red, Green and Blue LED-based White Light Source: Implementation Challenges and Control Design[C]//Industry Application Conference IAS Record. Philadelphia: [s. n.], 2003:515-522.

[10] ALONSO J M, CALLEJA A J, RIBAS J, et al. Analysis and design of a novel single-stage high-power-factor electronic ballast based on integrated buck half-bridge resonant inverter[J]. Power Electron, 2004(3):550-559.