

一种减小储能电容容值的 LED 驱动器

张 洁,张方华,倪建军

(南京航空航天大学 江苏省新能源发电与电能变换重点实验室,江苏 南京 210001)

摘要:高亮度发光二极管(简称 LED)具有发光能效高、光学性能好、寿命长、环境友好等优点,是极具发展前景的新一代绿色照明光源。但是传统 AC 供电的 LED 驱动器中短寿命的电解电容,限制了 LED 照明光源的长时间使用。提出了一种有偏置的正弦波电流驱动 LED,通过理论分析得到,在同样的中间母线电压脉动下,储能电容的容量能够减小到原来的 55.8%,从而可以用薄膜电容取代电解电容。

关键词:LED 驱动器;长寿命;无电解电容

中图分类号:TM461

文献标志码:A

文章编号:2095-2805(2013)02-0036-05

引言

目前 LED 的光效可以达到 150 lm/W,与传统照明光源相比 LED 照明光源可节省 25%~60%的电能消耗^[1-2],大幅度减少碳排放量。LED 的另一突出优点是长寿命,其寿命超过 5 万 h,为其他现有技术的 3 倍以上。因此 LED 目前在室内、室外照明、背光灯等场合已有较广泛的应用,是极具发展潜力的新一代照明光源。

LED 照明光源由 LED 芯片 (Chip)、灯具(Fixture)、驱动器(Driver)三部分构成。在 AC 供电的 LED 驱动器中,用来平衡输入的交流功率与输出的直流功率的母线电解电容寿命通常只有几千小时,与长寿命的 LED 灯不匹配。因此研究减小中间母线所需电容的容量,使得能够在相近体积和成本条件下,使用长寿命的薄膜电容,成为目前提高 LED 照明光源整体寿命的发展方向之一。

本文提出了一种有偏置的正弦波电流驱动 LED,理论分析得到:在同样的中间母线电压脉动下,储能电容的容量能够减小到原来的 55.8%,从而

可以用薄膜电容取代电解电容。仿真结果验证了理论分析的正确性。

1 新型无电解电容的 LED 驱动器方案

1.1 恒流驱动下能量脉动的关系

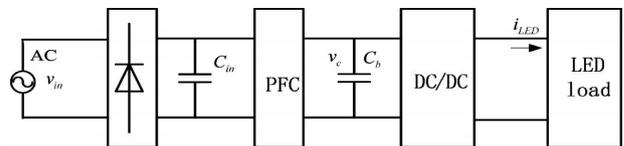


图 1 AC 供电的 LED 驱动器框图

如图 1 所示,市电通过整流电路,功率因数校正电路,再经过控制输出电流恒定的 DC/DC 变换器,最终得到 LED 的驱动电流。假设功率因数为 1,则瞬时的输入功率 $P_{in}(\omega t)$ 为:

$$p_{in}(\omega t) = v_{in}(\omega t) \cdot i_{in}(\omega t) = \frac{1}{2} V_m \cdot I_m - \frac{1}{2} V_m \cdot I_m \cdot \cos(2\omega t) = P_o - P_o \cdot \cos(2\omega t) \quad (1)$$

式中: V_m, I_m 是输入交流电压和电流的幅值; $\omega = 2\pi/T_{line}$; T_{line} 是输入交流电压周期; P_o 是 LED 消耗的平均功率。

如果输出电流为恒定直流,则输出功率等于输入功率的直流分量,即式(1)中的第一项。储能电容 C_b 承担了输出功率与输入功率的差值,即式(1)中的第二项,它是以 2 倍于电网频率变化的功率。此

收稿日期:2011-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51007039);江苏省自然科学基金(BK2010509)和南京航空航天大学基本科研业务费专项科研资助项目(NS2010085)。

作者简介:张洁(1989-),女,研究生,硕士,研究方向为照明电源, Tel:15950508048, E-mail:didoardell@163.com。张方华,男,教授,硕士生导师, Tel:13951877121; E-mail:zhangfh@nuaa.edu.cn。

时 C_b 的容量为^[3]:

$$C_b = \frac{\Delta E}{2 \cdot \Delta V_{c_ripple} \cdot V_{c_avg}} = \frac{P_o}{2 \cdot \omega \cdot \Delta V_{c_ripple} \cdot V_{c_avg}} \quad (2)$$

式中: $\Delta E = P_o / \omega$ 是电容要储存的最大能量; $\Delta V_{c_ripple} = V_{c_max} - V_{c_avg}$ 是电容电压纹波的峰均值; V_{c_avg} 是电容电压的平均值。

市电输入情况下,采用 Boost 型 PFC 的输出端电压 V_{c_avg} 在 380 V 以上。该电压等级的电容,铝电解电容的能量密度为薄膜电容的 20~30 倍。所以在维持相近的体积和成本的前提下,如果要选用薄膜电容取代电解电容,则必须降低电路中所需要的电容容量。

1.2 新型 LED 驱动器方案的理论分析

由于 LED 的端电压具有稳压特性,当 LED 中通过的电流变化不大时,其端电压基本恒定。因此 LED 消耗的功率近似正比于 LED 中流过的电流。本文采用的带有直流偏置的正弦波脉动输出电流,在减少储能电容容量的同时,降低了输出脉动电流的比例,解决了文献[7]方案中输出电流峰均比过大的问题。为进行定量对比,后文所提出的方案的分析均在选用 0.066 $\mu\text{F/W}$ 薄膜电容的基础上进行。对 LED 平均电流进行标么化,令 $I_{LED}^* = 1$,且令 PFC 的输出端电压 $V_{c_avg} = 400$ V。

为了降低输出电流的峰均比,可以将输出电流 $i_{LED,2}(\omega t)$ 正比于 $1 + k_2 \cos 2\omega t$, $-1 < k_2 < 0$ 。此时储能电容处理的功率为:

$$p_{c_2}(\omega t) = p_m(\omega t) - p_{o_2}(\omega t) = P_o (1 + k_2) \cos(2\omega t + \pi) \quad (3)$$

结合公式(1)和(2),可以得到此时储能电容的容量是恒定直流驱动下的 $(1 + k_2)$ 倍。由于 $-1 < k_2 < 0$,所以选择合适的 k_2 ,即合适的峰均比,可以减少储能电容的容量。

如果将输出电流 $i_{LED,4}(\omega t)$ 正比于 $1 + k_{02} \cos(\omega t) + k_{04} \cos(4\omega t)$, k_{02}, k_{04} 为绝对值小于 1 的常数,通过理论分析发现,当 $i_{LED,2}(\omega t)$ 和 $i_{LED,4}(\omega t)$ 峰均比相同时, $i_{LED,4}(\omega t)$ 能够注入更多的 2 次谐波,从而可以达到进一步降低储能电容容量的目的。

以 $i_{LED,2A}(\omega t) = 1 + k_2 \cos(2\omega t) + k_4 \cos(4\omega t)$ 的有直流偏置的正弦波电流为例,进行详细的分析。由于 LED

导通时,瞬时电压基本保持不变,这里取恒定值 V_{LED} 。则 LED 的瞬时功率为:

$$p_{o_2A}(\omega t) = V_{LED} \cdot i_{LED,2A}(\omega t) = P_o \cdot [1 + k_2 \cos(2\omega t) + k_4 \cos(4\omega t)] \quad (4)$$

此时储能电容处理的功率为:

$$p_{c_2A}(\omega t) = p_m(\omega t) - p_{o_2A}(\omega t) = P_o [(1 + k_2) \cos(2\omega t + \pi) + k_4 \cos(4\omega t + \pi)] \quad (5)$$

在一个周期内对 $p_{c_2A}(\omega t)$ 进行积分,则可得储能电容承受的电压为:

$$v_c(\omega t) = V_{c_avg} + \Delta v_{c_ripple_2A}(\omega t) = V_{c_avg} + \frac{-P_o}{\omega \cdot V_{c_avg} \cdot C_b} \left[\frac{k_2 + 1}{2} \sin(2\omega t) + \frac{k_4}{4} \sin(4\omega t) \right] \quad (6)$$

当 $p_{c_2A}(\omega t) > 0$ 时, C_b 充电,储存在 C_b 中的最大能量 ΔE 等于:

$$\Delta E = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{p_{c_2A}(\omega t)}{\omega} d(\omega t) = \frac{A \cdot P_o}{\omega} \quad (7)$$

其中 α_1 和 α_2 是一个周期中储能电容最小电压和最大电压所对应的相位。其中 $A = (1 + k_2)[\sin(2\alpha_1) - \sin(2\alpha_2)]/2 + k_4[\sin(4\alpha_1) - \sin(4\alpha_2)]/4$ 。

ΔE 同样可以表示为:

$$\Delta E = \frac{1}{2} C_b (V_{c_max}^2 - V_{c_min}^2) \quad (8)$$

结合式(7)和式(8),储能电容 C_b 的容量为:

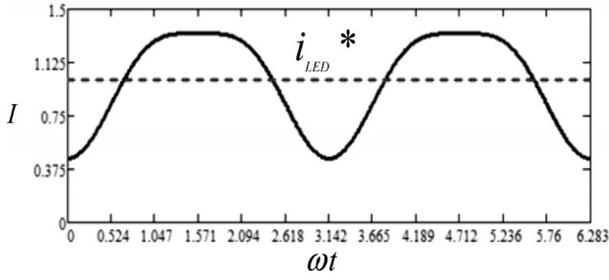
$$C_b = \frac{A \cdot P_o}{2 \cdot \omega \cdot \Delta V_{c_ripple_2A} \cdot V_{c_avg}} \quad (9)$$

由 LED 生产厂家给出的器件手册^[4-6],其中给出的直流电流最大值与额定值之比的最小值为 1.42。考虑到低频电流本身还可能带有高频纹波(考虑 $\pm 5\%$),本文选择了峰均比为 1.33 的驱动电流进行进一步的分析 and 仿真验证。此时对式(6)进行最小值求导,可以得到 $k_2 = 4k_4, k_2 = -0.44$ 。进一步有 $A = 0.558$ 。

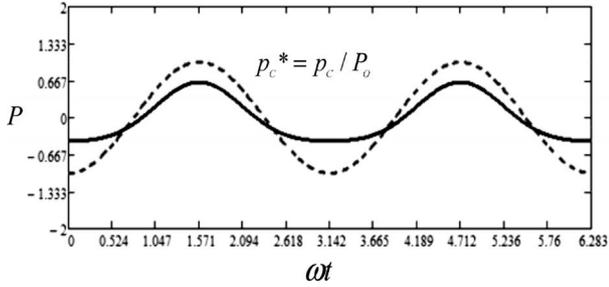
可得带有直流偏置的正弦波脉动输出电流的峰均比为 1.33 时,储能电容 C_b 的容量为:

$$C_b = \frac{0.558 \cdot P_o}{2 \cdot \omega \cdot \Delta V_{c_ripple_2A} \cdot V_{c_avg}} \quad (10)$$

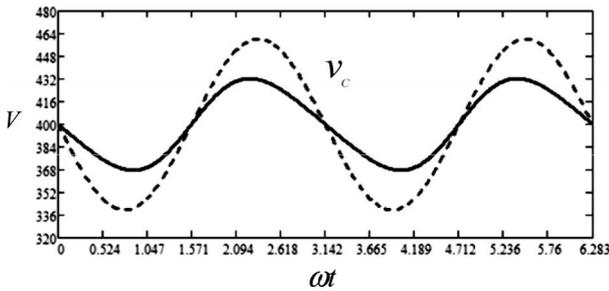
与公式(2)比较可以看出,如果平均输出功率相等,在同样的储能电容电压纹波下,此时储能电容



(a) 驱动电流波形



(b) 储能电容处理的功率波形



(c) 储能电容两端的电压波形

图 2 有偏置的正弦波驱动(实线)和恒定直流驱动(虚线)LED 下的波形

的容量可以减小到输出电流为恒定直流时的55.8%。

2 实现电路

新方案的中心思想是在输入功率的峰值处使 LED 多消耗能量,在输入功率的谷值处使 LED 少消耗能量或不消耗能量,那么用来驱动 LED 的正弦波电流必须与输入端的电压电流同相位。通过对输入端整流后的电压进行相关的处理,就能得到需要的正弦波基准,并且最终能够用符合要求的电流来驱动 LED。以 $i_{LED,24}(\omega t)=1+k_2\cos(2\omega t)+k_4\cos(4\omega t)$ 进行分析。通过分解可以看出,只要对电路中 $\sin\omega t$ 进行运算就能得到 $i_{LED,24}(\omega t)$,如式(11)所示。

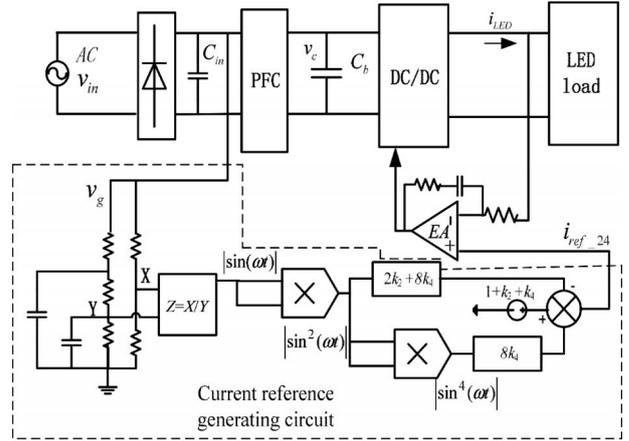


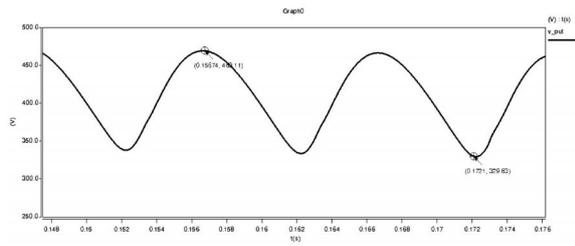
图 3 注入 2、4 次谐波电流的控制框图

$$i_{LED,24}(\omega t) = 1 + k_2 \cos(2\omega t) + k_4 \cos(4\omega t) = 1 + k_2(1 - 2\sin^2 \omega t) + k_4(1 - 8\sin^2 \omega t + 8\sin^4 \omega t) = (11) 1 + k_{02} + k_{04} - (2k_{02} + 8k_{04})\sin^2 \omega t + 8k_{02}\sin^4 \omega t$$

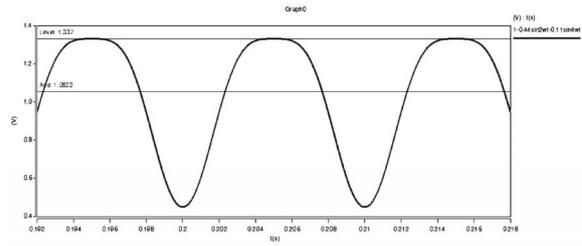
如图 3 所示,通过对整流后的电压进行电阻分压和电容电阻滤波,可以得到一个不随输入电压变化的馒头波 $|\sin\omega t|$,保证了最终基准电流的稳定性。通过对 $|\sin\omega t|$ 的乘法运算和与直流量的加法运算,最终可以得到 $i_{LED,24}(\omega t)$ 的基准。最后只要与输出采样电流进行 PI 调节,即可保证输出电流的稳定。电路中的除法运算和乘法运算可以用芯片 MC1495、MC1595 等实现。

3 仿真实验

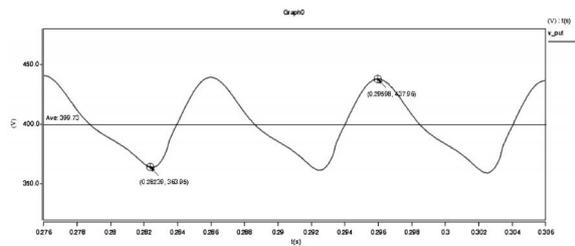
为了验证理论分析的正确性,运用 Saber 仿真平台进行了验证。前级 Boost PFC 采用了平均仿真模型,大大减少了两级变换器的仿真时间。具体仿真参数如下:输入电压为 220 V_{ac}/50 Hz,母线电容电压的平均值控制在 400 V,额定状态下输出驱动电流为 $1-0.44\cos(2\omega t)-0.11\cos(4\omega t)$,平均值 1 A,峰均比为 1.33,母线电容按照 0.066 μF/W 选取。仿真波形如图 4 所示。图 4(a)是驱动器输出电流为恒定 1 A 时储能电容两端的电压,为 400±69 V。图 4(b)是经过图 3 基准电路产生的有偏置的基准正弦波电流 $1-0.44\cos(2\omega t)-0.11\cos(4\omega t)$ 。图 4(c)是驱动器输出电流为图 4(b)的基准电流时储能电容两端的电压,约为 400±38 V。通过图 4(a)和图 4(c)的电压波形可以看出,当储能电容容量相同时,采用本文提



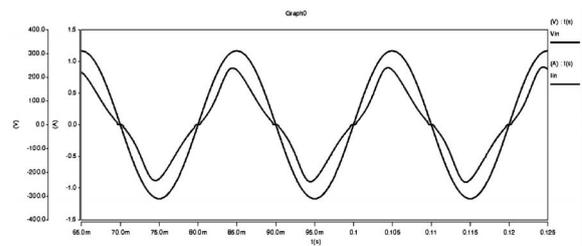
(a) 恒定直流驱动下储能电容电压波形



(b) 有偏置的正弦波基准电流波形



(c) 有偏置的正弦波电流驱动下储能电容电压波形



(d) 有偏置的正弦波电流驱动下输入电压电流波形

图 4 仿真验证波形

出的方案,能够将脉动的电压降低到原来的 55%,验证了理论分析的正确性。同时通过图 4(d)的输入电压和输入电流波形可以看出,本文提出的方案能够取得很高的 PF 值。

4 结论

本文提出了一种有偏置的正弦波电流驱动 LED,进行了详细的理论分析,介绍了电路实现方案。在同样的中间母线电压脉动下,本文提出的有偏置的正弦波电流方案,能够使母线储能电容的容量减小到原来的 55.8%,从而可以用薄膜电容取代电解电容。仿真结果验证了理论分析的正确性。

参考文献:

[1] Ann Arbor's LED street light program_ICLEI climate innovation invitation[R]. Available at: http://www.a2gov.org/government/publicservices/systems_planning/energy/Docu-

ments/LED_Summary.pdf.

- [2] 廖志凌,阮新波. 半导体照明工程的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 106-111.
- [3] Linlin Gu, Xinbo Ruan, Ming Xu, Kai Yao. Means of Eliminating Electrolytic Capacitor in AC/DC Power Supplies for LED Lightings [J]. IEEE Trans. Power Electron. 2009, 24(5): 1399-1408.
- [4] Cree Corporation. Datasheets of Cree's LED Chips [EB OL]. Available at: http://www.cree.com/products/led_docs.asp. 2010.3.5
- [5] Osram Corporation. Datasheets of Osram's LED semiconductors [EB OL]. Available at http://www.osram.com/osram_com/Professionals/Op_to_Semiconductors_%26_LED/Everything_about_LED85_033/index.html. 2010.3.5.
- [6] Y Aoyama, T Yachi. An LED Module Array System Designed for Streetlight Use [C]. ENERGY 2030 conference [A]. Nov. 2008 :1-5.
- [7] G Spiazzi, S Buso, G Meneghesso. Analysis of a High-Power-Factor Electronic Ballast for High Brightness Light Emitting Diodes. in Proc. IEEE PESC, 2005: 1494-1499.

(下转第 45 页)