

一种基于电容均流的LED驱动电路

在大功率照明应用场合, LED串通常采用并联结构, LED的特性决定了其必须采用均流措施来达到各LED串的电流均衡。通过分析现有的LED均流方案及其各自的优缺点, 提出了一种新型的基于电容均流的LED驱动电路拓扑, 该电路是利用均流电容在一个周期内的能量守恒来实现各LED串的均流。在对电路的均流原理进行详细理论分析的基础上, 利用Dspic单片机搭建了一台LLC实验样机, 实验结果表明所提方案具有良好的均流效果, 且电路结构简单, 效率高, 易于拓展。

林威伟 林国庆 洪春辉/福州大学电气工程与自动化学院



林威伟/硕士研究生

在倡导低碳节能的今天, LED以其高效、寿命长和节能环保等优点在照明领域已成为极具发展前景的新一代绿色照明光源。LED的发光强度取决于其流过电流的大小, 在大功率照明应用场合, 为了达到所需要的输出功率等级, LED通常采用串并联结构。但是由于LED导通压降的离散性和负温度系数的特性, 串并联结构的LED串必须采用合适的均流措施才能保证各路LED串的电流达到均衡。

目前, 针对该电流均衡问题, 现有的均流方案分为有源均流和无源均流两类。有源均流主要是由有源器件和相应的控制电路组成一个电流调节器, 用以调节每路LED串的电流。有源均流主要有线性模式和开关模式。线性电流调节器由于要承受母线输出直流电压和LED导通压降之间的压差, 因此效率很低^[1]。开关模式的电流调节器使用DC-DC变流器, 与线性模式相比, 其效率有了很大

的提高, 但是随之而来的问题是成本上升和元器件数目大大增加^[2]。

无源均流方案主要是使用耦合电感或电容等无源元件, 并结合合理的拓扑结构使每路LED的电流达到均衡。目前, 无源均流方案主要有两种类型: 基于耦合电感的均流方案和基于电容的均流方案^[3-6]。文献[3]和文献[4]中分别介绍了一种基于耦合电感的均流方案, 两种方案均是利用耦合电感的耦合效应来实现均流的, 只是耦合电感的放置位置及电路的结构形式有所不同。以上两种方案在电感耦合效果较好时的均流效果均较好, 但所需耦合电感的数目会随着输出LED路数的增多而增多, 这将大大增加变流器的体积和成本。文献[5]利用了与反并联LED串相串联的电容的交流阻抗远远大于LED串的等效交流阻抗的特点, 来实现每路等效交流阻抗基本相等, 从而达到各路电流的均衡。该方案串联电容的容值必须非常小, 且均流效果受电容容差影响较大, 均流效果不理想。文献[6]将传统全桥结构拆分为两路LED输出结构并同时和一个均流电容串联。这种方法是利用均流电容在一个周期内的能量守恒来实现的。这种方法的均流效果较好, 但当输出拓展到多路时, 一般需要采用一次侧变压器串联的方式, 不仅结构复杂, 而且大大增大了体积和重量。

本文提出了一种基于半桥谐振网络的LED均流驱动方案。该方案利用电容在一周期内的能量守恒特性来实现各LED串的电流均衡, 电路结构简单,

关键词/Keywords

LED ·
驱动电路 ·
电容均流 ·
LLC ·
Dspic单片机 ·

福建省科技计划资助项目 (2015H0017)。

易拓展,且均流效果不受各支路输出端电压的影响。文中对电路的均流原理进行了详细的理论分析,并利用样机进行了实验验证。

电路结构与特性分析

1. 电路组成

四路输出均流方案电路结构如图1所示。电路主要由三部分组成:半桥LLC谐振环节、电容均流的四路输出电路以及基于Dspic单片机的控制电路。该电路仅靠三个电容即可实现四路输出的自动均流。

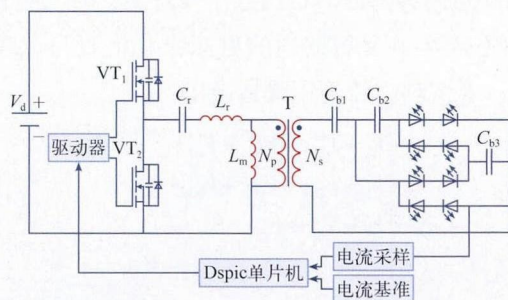


图1 四路输出均流方案电路结构

2. 特性分析

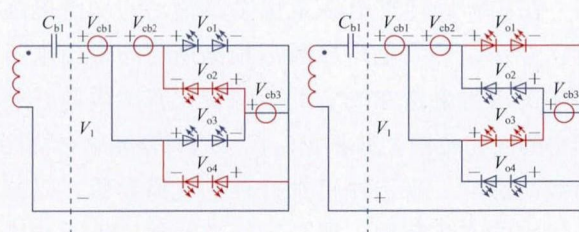
对于恒流宽范围输出的LED驱动器,其输出电流恒定而输出电压变化范围较宽,这样在电压增益较小时,LLC变换器的工作频率可能会变化很大,因此要对输出电压与工作频率之间的关系进行分析。

首先,对均流电容进行等效变换,由于均流电容 C_{b1} 在一个周期内充放电平衡,因此可将其两端电压 V_{cb1} 等效为直流电压 V_{cb1} 叠加一个交流电压 v'_{cb1} 。直流量 V_{cb1} 用一个电压源来等效,交流量 v'_{cb1} 用来表示电容 C_{b1} 的特性。因为均流电容 C_{b2} 、 $C_{b3} \gg C_{b1}$,故 C_{b2} 、 C_{b3} 端电压的交流量很小,忽略不计,将其等效为一电压源 $V_{cb3}^{[8]}$ 。等效电路如图2所示。

由图2可得 V_1 是一个幅值为 V_0 的正负交替的方波,占空比为50%。其中

$$V_0 = \frac{V_{o1} + V_{o2} + V_{o3} + V_{o4}}{4} \quad (1)$$

将变压器二次侧的电路等效到一次侧,可得图3所示的交流等效电路,其中 $R_{eq} = n^2 R_{ac}$, $R_{ac} =$



(a) 正半周等效电路

(b) 负半周等效电路

图2 均流电容替换后的分段等效电路

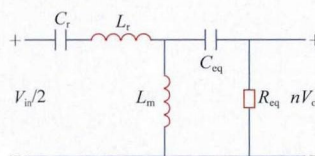


图3 交流等效电路

$$4R_0/\pi^2, C_{eq} = C_1/n^2。$$

由图3可得输出电压增益为

$$M = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \lambda - \frac{\lambda}{f_n^2}\right)^2 + Q^2 \left[-\frac{1}{kf_n} \left(1 + \lambda - \frac{\lambda}{f_n^2}\right) + \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)\right]^2}} \quad (2)$$

$$k = C_{eq} / C_r \quad (3)$$

$$Q = 0.5(L_r / C_r) / R_{eq} \quad (4)$$

$$M = nV_o / (0.5V_{in}) \quad (5)$$

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{R_{ac}} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_o}{N^2 \frac{2}{\pi^2} V_o} \quad (6)$$

联立式(2)~式(6)消除 M 后可得输出电压与频率之间的关系为

$$V_o(f_n, I_o) = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{N}{V_i/2}\right)^2 \left[\left(f_n - \frac{1}{f_n}\right) - \frac{1}{kf_n} \left(1 + \lambda - \frac{\lambda}{f_n^2}\right)\right]^2 \frac{L_r I_o^2}{C_r} \left(N^2 \frac{2}{\pi^2}\right)^2}{\left(\frac{N}{V_i/2}\right) \left(1 + \lambda - \frac{\lambda}{f_n^2}\right)^2}} \quad (7)$$

式中, f_n 为归一化频率。

根据式(7)可得如图4所示的特性曲线图。

在实际设计宽电压范围多路输出的均流电路时,应在设计完电路参数后根据所作的输出电压曲线图求得电路在既定的负载变化范围内其开关频率的变化范围,并根据 L_r/C_r 、 k 和 λ 等参数对特性曲线的影响,来选择更加合理的电路参数,以减小频率的变化范围,避免因频率变化过大而造成的问题。

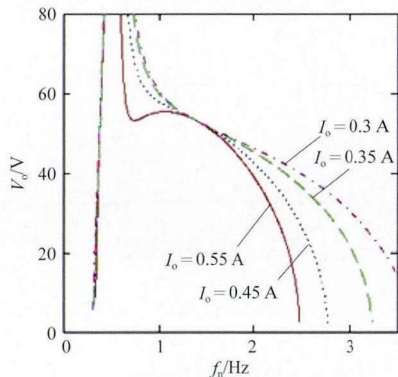


图4 多路恒流输出时的输出电压曲线图

均流方案

1. 四路均流原理分析

由LLC半桥谐振网络的特性可知,在变压器的二次侧绕组上会产生一个正向电压和反向电压交替出现的电压波形。

假设在 $t_a - t_b$ 时间里,二次侧绕组电压为正向电压。如图5a所示,电流 i_1 流经 C_{b1} 、 C_{b2} 、LED₁和 V_d ,电流 i_1 给 C_{b1} 、 C_{b2} 充电;电流 i_2 流经 C_{b1} 、LED₃、 C_{b3} 、 V_d ,电流 i_2 给 C_{b1} 、 C_{b3} 充电。在 $t_b - t_c$ 时间里,二次侧绕组电压为反向电压。如图5b所示,电流 i'_1 流经 C_{b3} 、LED₂、 C_{b2} 、 C_{b1} 和 V_d ,电流 i'_1 给 C_{b1} 、 C_{b2} 和 C_{b3} 放电;电流 i'_2 流经LED₄、 C_{b1} 和 V_d ,电流 i'_2 给 C_{b1} 放电。

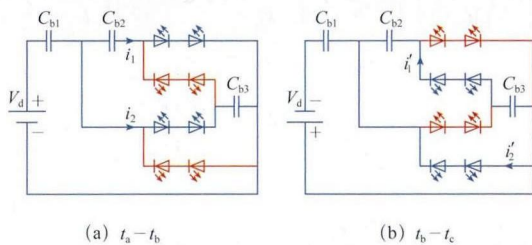


图5 分段等效电路

由稳态时电容在一个周期内充放电电荷平衡,可得

$$I_{o1} = I_{o2}, I_{o2} = I_{o3}, I_{o1} + I_{o3} = I_{o2} + I_{o4} \quad (8)$$

从而可推出四路输出平均电流相等,即

$$I_{o1} = I_{o2} = I_{o3} = I_{o4} \quad (9)$$

因此,所提电路能够实现各支路平均电流相等。

2. 均流电容端电压分析

电容均流电路主要是依靠均流电容端电压来补偿不同支路LED压降的不同,从而实现各支路的输出均流。因此均流电容两端电压在一个周期内的平均值与各路LED负载的压降有关。将二次侧绕组的电压在半个周期内的电压平均值也可以等效为 V_s 。在忽略二极管压降情况下

$$\begin{cases} V_s = V_{cb1} + V_{cb2} + V_{o1} \\ V_s = V_{cb1} + V_{cb3} + V_{o3} \\ V_s = V_{o4} - V_{cb1} \\ V_s = V_{o2} - V_{cb3} - V_{cb2} - V_{cb1} \end{cases} \quad (10)$$

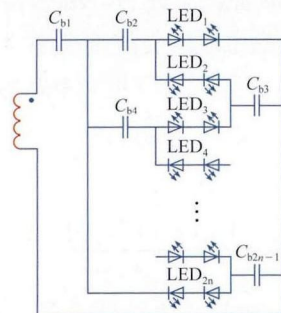
由式(10)可得

$$\begin{cases} V_{cb1} = \frac{3V_{o4} - V_{o1} - V_{o2} + V_{o3}}{4} \\ V_{cb2} = \frac{V_{o2} + V_{o3} - V_{o1} - V_{o4}}{2} \\ V_{cb3} = \frac{V_{o1} + V_{o2} - V_{o3} - V_{o4}}{2} \end{cases} \quad (11)$$

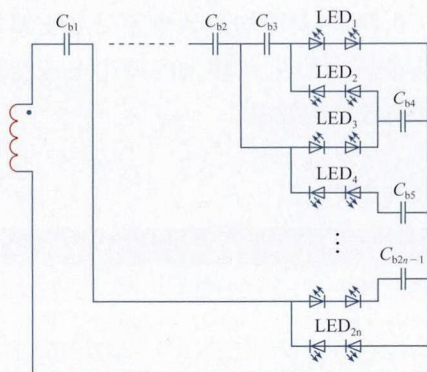
由式(11)可知,每一个均流电容的端电压与负载的压降有关,且当 $V_{o1} = V_{o2} = V_{o3} = V_{o4}$ 时, $V_{cb1} = V_{cb2} = V_{cb3} = 0$ V。

3. 多路均流方案的电路拓扑

图1中的四路均流方案可以扩展应用到多路均流的场合,电路拓扑有如图6所示的两种形式,其



(a) 拓扑一



(b) 拓扑二

图6 多路均流方案电路拓扑

均流的理论分析过程与上述基本一致。

图6中的多路均流方案不仅适用于偶数路负载，而且适用于奇数路负载，奇数路负载时只需将 C_{b1} 去掉即可。 n 路负载只需要 $n-1$ 个电容即可实现均流，电路结构简单。

实验结果

为了验证理论分析的合理性，设计了一台基于电容均流的数控型四路输出LED驱动器实验样机。主要参数如下：满载输出功率 $P_o=80\text{ W}$ ，额定输入直流电压 $U_{dc}=400\text{ V}$ ，谐振电容 $C_r=12.4\text{ nF}$ ，电感 $L_r=210\text{ }\mu\text{H}$ ， $L_m=1.52\text{ mH}$ ，均流电容 $C_{b1}=0.1\text{ }\mu\text{F}$ ， $C_{b2}=C_{b3}=1\text{ }\mu\text{F}$ 。

该系统采用Dispic单片机进行数字控制，程序框图如图7所示。

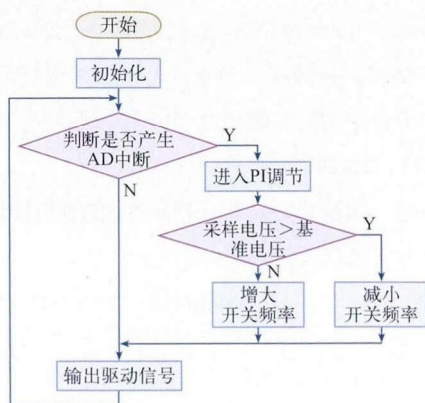


图7 程序框图

实验结果如图8、图9和下表所示。

图8为各均流电容两端的电压：I组为四路负

载压降相等时其均流电容两端电压，如图8a、图8b和图8c所示；II组为四路负载压降均不等时其均流电容两端电压，如图8d、图8e和图8f所示。由图中可以看出，电容均流电路主要是利用均流电容的端电压来补偿不同支路LED压降的不同，从而实现各支路的输出均流。且每一个均流电容上的压降与四路LED负载的压降有关。

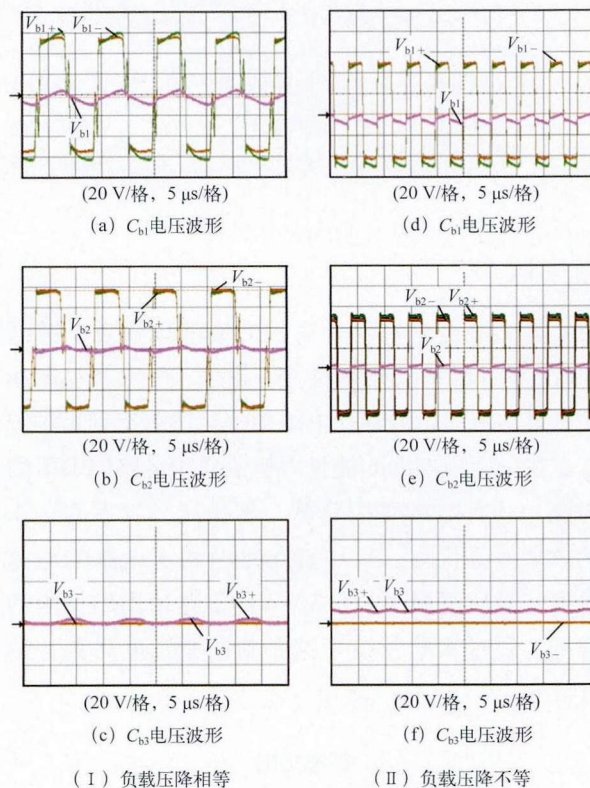


图8 各均流电容端电压波形

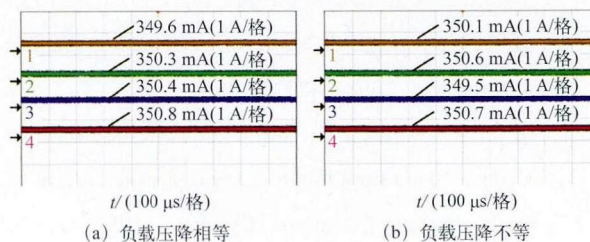


图9 各路输出电流波形

图9a、图9b分别为四路负载压降相等和负载压降不相等时各路输出电流的波形。从图中可以看出：无论是在各路负载压降相等或者各路负载压降不等时，四路输出的电流平均值基本一致，表明了该电路能实现四路输出的均流。

下表为不同负载压降情况下各支路输出电流值。从表中可以看出,当各路负载的输出电压在不同的情况时,均流电路的均流效果良好,均流

误差 $\Delta I < 0.5\%$,表明均流效果不受各支路输出电压的影响。且整机在较大的输出电压变化范围内均能保持较高的效率。

表 不同负载压降情况下各支路输出电流值

支路1负载电压/输出电流	支路2负载电压/输出电流	支路3负载电压/输出电流	支路4负载电压/输出电流	输出平均电流	均流误差	效率	开关频率
$V_{o1}/I_{o1}/(V/mA)$	$V_{o2}/I_{o2}/(V/mA)$	$V_{o3}/I_{o3}/(V/mA)$	$V_{o4}/I_{o4}/(V/mA)$	I_{av}/mA	$\Delta I/(\%)$	$\eta/(\%)$	f/kHz
51.35/350.7	51.36/350.6	51.43/349.3	51.34/349.6	350.1	0.4	92.3	90.7
51.42/349.5	51.36/350.6	51.32/349.7	39.54/350.7	350.1	0.3	92.1	121.6
34.58/349.5	51.36/349.6	51.40/350.2	51.30/350.2	349.9	0.2	91.2	147.4
51.31/350.4	39.52/350.1	51.46/350.5	44.45/349.6	350.2	0.3	91.2	152.7
34.53/349.6	39.50/349.8	51.37/350.5	51.31/350.2	350.0	0.3	90.3	178.6
34.56/350.6	39.50/350.7	44.40/350.3	51.35/349.6	350.3	0.3	90.1	189.5

结束语

本文通过分析现有均流方案的优缺点,并结合LLC拓扑结构的频率特性,提出了一种新型的基于电容均流的LED驱动电路拓扑,该方案利用均流电容在一个周期内的能量守恒来实现各路LED串的均流,具有电路结构简单,易拓展,效率高,均流效果好等优点。文中详细地分析了电路的均流原理,最后研制了一台80 W的四路输出LED驱动样机,通过实验验证了这种新的驱动电路拓扑的可行性。

参考文献

[1] Chiu C L, Chen K H. A high accuracy current-balanced control technique for LED backlight [C]. Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008: 4202-4206.

[2] Hwu K I, Yau Y T. Applying one-comparator counter-based sampling to current sharing control of multi-channel LED strings [C]. Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf., 2010: 737-742.

[3] Hwu K I, Chou S C. A simple current-balancing convener for LED lighting [J]. Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf., 2009: 587-590.

[4] Yuequan Hu, Jovanovic M M. A new current-balancing method for paralleled LED strings [C]. Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf., 2011: 705-712.

[5] Choi S, Agarwal P, Kim T, et al. Symmetric current balancing circuit for multiple DC loads [C]. Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf., 2010: 512-518.

[6] Wu Xinke, Hun Guichao, Zhang Junming, et al. A new current-driven synchronous rectifier for series parallel resonant (LLC) DC-DC converter [C]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2011: 289-297.

[7] 于晓强,林国庆,强京. 基于LLC变换器的多路LED自动均流策略研究 [J]. 中国照明电器, 2013 (11): 25-29.

[8] 陈越. 谐振型高效率LED驱动器的分析设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

(收稿日期: 2015-03-18) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告