

基于智能灯杆的可见光通信和亮度调节的集成化研究

邹斌,赵少锋,杨坤,徐奕帆,陈意

(湖北省电力装备有限公司,湖北 武汉 430035)

摘要:智能灯杆是智慧城市中不可或缺的一部分,将光通信和亮度调节集成至智能灯杆具有重要意义。传统的可见光通信和亮度调节是独立工作的,容易出现相互干扰的问题。提出一种将两者高度集成的智能灯杆方案。其中发光二极管(LED)的亮度是通过并联谐振式的反激变换器的占空比调节,可见光的通信则在同一变换器中使用频移键控(FSK)的调制方式实现。在理论分析之后,对LED的亮度控制器、可见光通信的调制器和解调器进行了详细的设计。最后制作了一个实验样机,实验结果表明:可见光通信和LED亮度集成化具有可行性,并具有一定的外界光照强度和偏移距离的抗干扰的能力。

关键词:智能灯杆;可见光通信;亮度调节;并联谐振网络;反激式变换器

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20811

Research on Integrated Visible Light Communication and Brightness Adjustment for Smart Light Pole

ZOU Bin, ZHAO Shaofeng, YANG Kun, XU Yifan, CHEN Yi

(Hubei Electric Power Equipment Co., Ltd., Wuhan 430035, Hubei, China)

Abstract: Smart light poles are an integral part of smart cities, and it is important to integrate optical communication and brightness adjustment into smart light poles. Conventional visible light communication and brightness adjustment work independently, and are prone to mutual interference problems. A solution for a smart light pole that was highly integrated was proposed. The brightness of the light emitting diode(LED) was regulated by the duty cycle of the parallel resonant flyback converter, and the communication of visible light was implemented by the frequency shift keying(FSK) modulation method in the same converter. After the theoretical analysis, the brightness controller of the LED, the modulator and demodulator of the visible light communication were designed in detail. Finally, an experimental prototype was produced. The experimental results show that the visible light communication and LED brightness integration are feasible, and have certain anti-interference ability of external light intensity and offset distance.

Key words: intelligent lamp pole; visible light communication; brightness adjustment; parallel resonant network; flyback converter

随着智慧城市的高速发展,智能灯杆不仅能应用在城市照明中,而且集成了多种智能的设备。这些设备和外部的媒介之间需要通过通信的方式实现信息的交互。基于可见光的通信方式具有抗电磁干扰能力强、不受时间地点限制等优势,因此在该领域受到广泛的研究。其中可见光通信实施的重要组成部分是LED照明设备。

LED照明由于不仅具有使用寿命长、节能等优势,还具有快速的开关和切换特性^[1-2],因而被

大量应用在可见光的照明系统中。文献[3]中有关LED亮度的方法主要有调节LED的输入电压,然而LED工作在额定状态时表现为恒流的负载。另一方面,当LED出现过流的情况极易导致其光衰和使用寿命缩短的问题。为了保证其限定恒流的输出特性,相关的芯片制造商推出了多种LED驱动的方案^[4-6]。

智能灯杆的一项主要指标是必须节能环保,即LED需要根据外界的光照强度对自身的亮度

进行自动调节^[7]。可见光通信作为一种新型的户内或户外的通信方式,具有较大的传输带宽^[8-10]。现有的可见光通信方案中没有考虑到LED亮度的调节,使得在通信的过程中出现亮度的变化。

本文提出了一种利用反激变换器和并联谐振网络构成智能灯杆的亮度调节和可见光通信的集成系统。在不影响LED工作的情况下,使用频移键控(frequency shift keying, FSK)的调制方式对功率变换器的工作频率进行切换。同时,在不影响通信的前提下对功率变换器的占空比进行调节,实现LED亮度的调节。最终实现了一种集成化的可见光通信和LED亮度调节的方案。最后搭建了一个实验平台,通过实验验证所提出方法的可行性和有效性。

1 集成化系统的工作原理

本文所提出的LED亮度调节和可见光通信集成化的系统如图1所示。

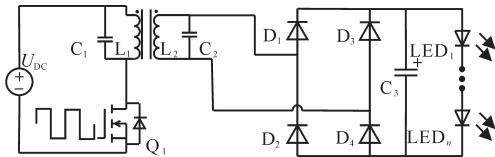


图1 集成化的LED亮度调节和可见光通信系统
Fig.1 Brightness adjustment of integrated LED and communication system of visible light

图1中,工作电源 U_{DC} 为直流电源,它是经过交流整流之后或通过直流电网得到的。为了减少开关器件的数量和同时实现隔离的要求,由MOS管 Q_1 、隔离变换器和全桥整流器($D_1 \sim D_4$)构成的反激变换器被使用。由于LED具有恒流的工作特性,本文使用并联谐振式的补偿网络,不仅具有恒流输出的特性,而且具有多个工作特性相同的谐振点。 $LED_1 \sim LED_n$ 为串联的照明灯的阵列,为了避免出现闪烁的问题, C_3 用于滤除谐振变换器产生的高频电压波动。

谐振变换器具有传输的功率大、容易实现软开关、功率密度大等优势,在DC-DC变换器中得到了大规模的使用。由图1可知,本文所选取的并联谐振网络是由 L_1, L_2, C_1 和 C_2 构成的。由于耦合变压器之间存在互感 M ,它和两侧耦合变压器的自感之间满足如下关系:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (1)$$

式中: k 为耦合变压器的耦合系数。

并联谐振网络如图2所示。

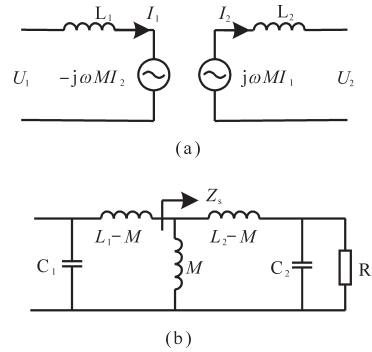


图2 并联谐振网络

Fig.2 Parallel resonant network

补偿网络耦合电感的等效电路如图2a所示。在图2a中,根据基尔霍夫电压定理(KVL),原边线圈电压 U_1 和副边线圈上的电压 U_2 表示为

$$\begin{cases} U_1 = -j\omega MI_2 + j\omega L_1 I_1 \\ U_2 = -j\omega ML_2 I_2 + j\omega MI_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为系统工作的角频率; I_1, I_2 分别为流过原边、副边线圈的电流。

其中副边电流可用下面简化的方程表示:

$$I_2 = \frac{j\omega MI_1}{Z_s} \quad (3)$$

式中: Z_s 为副边的阻抗。

当补偿网络使用T型等效的电路时(如图2b所示), Z_s 表示为

$$Z_s = j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{R}} \quad (4)$$

式中: R 为从整流器看进去的交流等效电阻。

R 和实际的负载电阻 R_L 之间的关系为

$$R = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (5)$$

联立式(2)~式(4),并对输出的电流 I_2 进行求导,在 $\partial I_2 / \partial R = 0$ 时,存在两个频率点(f_h 和 f_l),都能实现恒定的电流输出:

$$\begin{cases} f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1(L_1 - M)}} \\ f_l = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1(L_1 + M)}} \end{cases} \quad (6)$$

电路参数设置为:线圈自感 $L_p=L_s=70.2 \mu\text{H}$;补偿电容 $C_p=C_s=0.35 \mu\text{H}$;输入电压 $U_{in}=48 \text{V}$;工作频率 f_l, f_h 分别为 28 kHz, 38 kHz;控制器为STM32F407。

采用交流扫描方法,对输出电流 I_2 在不同的

频率 f 和负载 R_L 下的传输特性进行数值计算分析。其中频率的变化范围为10~60 kHz,负载电阻的变化范围为10~50 Ω ,得到如图3所示的频率特性曲线。

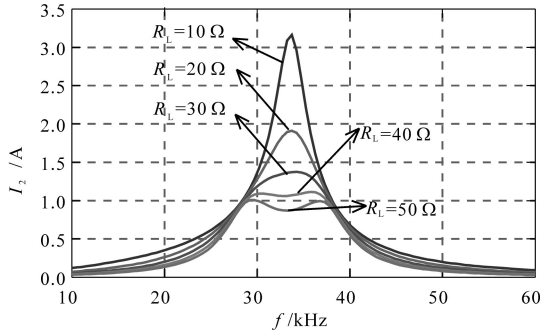


图3 输出的电流和频率之间的关系
Fig.3 The relationship between output current and frequency

从以上的数值计算结果可以得到:随着频率的变化,出现了两个对称的负载特性曲线的交叉点,在这两点输出电流 I_2 和负载的大小无关,即表现为恒流的输出特性。这两个交叉点和上面的理论分析部分得到的 f_h 和 f_l 是一致的。

2 LED亮度的控制

当系统工作在上面所设计的两个频率后,流过LED的电流为恒定值。

在实际的应用中LED需要根据外界的光照强度大小对输出的亮度进行调节,同时调节的范围应该尽量控制在线性的工作区域。在这里,反激变换器原边的占空比 D 的调节范围满足下面的等式:

$$D > \frac{nU_{out}}{nU_{out} + U_{in}} \quad (7)$$

式中: n 为隔离变压器匝比; U_{in} , U_{out} 分别为输入、输出的电压。

LED输出功率 P 的表达式为

$$P = \frac{U_{in}^2 D^2}{2L_1} T_s = \frac{U_{in}^2 T_{on}^2}{2L_1 T_s} \quad (8)$$

式中: T_{on} , T_s 分别为反激变换器开通的时间和整个开关的周期。

为了实现对LED的亮度进行精确的控制,需要引入闭环控制系统,控制框图如图4所示。设定的光照电流 I_{ref} 和实际的反馈电流 I_n 进行比较得到误差信号,经过一个并联的PI调节器(其中, K_p 和 K_i 分别为比例增益和积分增益)和一个限幅器之后,得到控制LED亮度调节的指令 I' 。

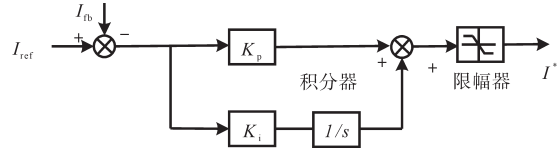


图4 LED亮度调节的控制框图
Fig.4 Control block diagram of LED brightness adjustment

3 可见光通信的设计

3.1 调制器的设计

在第2节中设计了一个LED亮度的控制方法,为了和本节中所设计的可见光调节系统集成,使用如图5所示的方法。

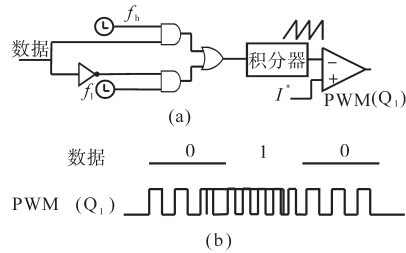


图5 可见光通信和LED亮度调节的混合调制
Fig.5 Mixed modulation of visible light communication and LED brightness adjustment

在图5a电路中,有两个不同频率的时钟。当需要传输的数据为“1”时, f_h 的通道被选通。反之,当需要传输的数据为“0”时, f_l 通道被选通。由于每次有且仅有一个通道被选通,完整的数据序列可通过或门得到。本文选取FSK的调制方式,被传输的数据“1”和数据“0”用下面的方程表示:

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_h t + \varphi_h) & \text{数据“1”时} \\ A\cos(2\pi f_l t + \varphi_l) & \text{数据“0”时} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $s(t)$ 为一个数据序列; A 为载波信号的幅值; φ_h , φ_l 分别为数据“1”和数据“0”的初始相位角,为了保证在频率切换的过程中相位的连续性, φ_h 和 φ_l 的值都设置为0。

式(9)的方波信号经过一个可复位的积分器之后得到一个连续的三角波信号。再将LED的亮度调节指令信号 I 通过比较器之后,得到了一个频率和占空比都可调的信号PWM。最后将该信号经过驱动电路之后送至反激式变换器的开关管 Q_1 ,具体的波形如图5b所示。

3.2 解调器的设计

在可见光的通信系统中,解调器的设计是必不可少的。当高速的光敏二极管接收到被调制的光信号之后,将含有信息的光信号转换为微弱

的电流信号;经过 R_1 之后将该电流信号转换为电压信号,再经过同相放大器之后得到增强的电压信号,其中增益的大小可通过 R_5 进行调节。由于在前面的转换和放大的过程中,频率 f_1 和 f_0 的光调制信号以及噪声信号都被引入至后级的电路中。为了避免这些信号之间的串扰,并将噪声信号滤除。在这里,选取了一个带通的滤波器,其带通滤波器所对应的频率为 f_h ,即数字“1”所对应的频率。最后经过比较器就得到了数字信号,如图6所示。

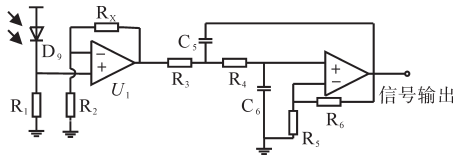


图6 可见光通信的解调电路

Fig.6 Demodulation circuit of visible light communication

4 实验结果

为了验证所设计系统的通信特性和光照的调节特性,对现有的智能灯杆的试点进行改造,将反激变换器、通信调制电路和亮度调节电路集成至智能灯杆中,如图7a所示。光照信号的接收电路以及解调电路则使用单体分离的结构,如图7b所示。

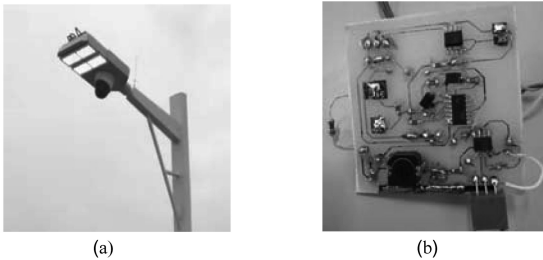


图7 实验装置图

Fig.7 The photograph of prototype

实验装置中的主要实验参数见第1节中的电路参数设置,耦合变压器的原边和副边线圈自感值相同,且两侧的补偿电容值也相同。直流输入电压的取值为48V。在通信的调制过程中一共使用了两个频段,它们分别是28kHz和38kHz。为了实现集成化控制的可见光通信和LED亮度调节,智能灯杆中使用STM32F407作为中心的控制器。

图8为一帧凯撒序列码(CH₁)从智能灯杆中发出来,经过200μs的延时之后,在解调器(CH₂)中被完整地恢复出来的可见光通信的测试波形。此时,光通信系统的信号传输速率为10kb/s。

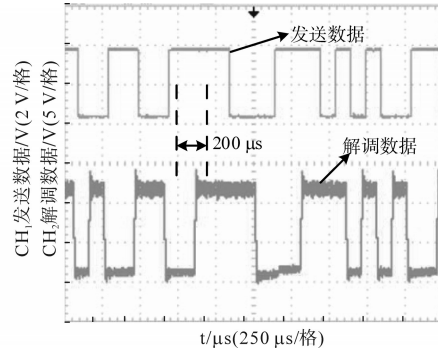


图8 可见光通信的测试波形

Fig.8 The waveforms of visible light communication

为了验证光照调节的性能,反激式变换器的占空比 D 的范围设定为5%~45%,定义智能灯杆中的LED在额定功率工作时的亮度为100%,它们之间的关系如图9所示。实验的结果表明LED的亮度和反激变换器的占空比 D 近似正比的关系;但到达一定值之后,亮度值逐渐趋于饱和。

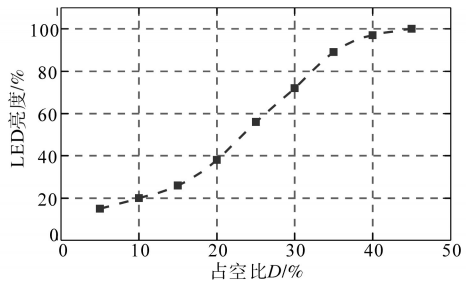


图9 LED的亮度和占空比之间的关系

Fig.9 The relationship between light brightness of LED and duty cycle

图10为不同接收器的偏移角度和不同距离 d 与通信的误码率的关系曲线。实验的结果表明随着可见光通信距离的增加,误码率随之增大。接收器的偏移角度增大也会使得误码率上升。因此,为了减少传输的误码率,可以从优化设计接收器的相对距离和偏移角度着手,将误码率控制在可行的范围之内。另外,为了增加数据解析的正确率,可以引入奇偶校验、求和校验和CRC冗余校验等多种方式。

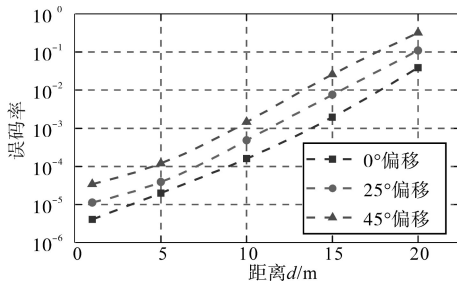


图10 误码率与接收器的距离、偏移角之间的关系

Fig.10 The relationship among bit error rate, distance and offset angle of the receiver

5 结论

为了解决应用在智能灯杆中的可见光通信和LED亮度调节之间的相互兼容的问题,本文利用并联谐振网络的恒流的特性,在反激变换器的原边实现了FSK调制传输的数据,占空比调节LED亮度的方案。理论分析和数值计算结果说明了这种方案的可行性。

实验结果表明LED的亮度能在较大的范围内被调制,满足实际的光照控制需求;在不同的距离和偏移角下,接收器能接收到可见光的通信信号,且误码率在可接受的范围内。因此,本文提出的集成化的可见光通信和LED亮度调节具有一定的可行性和实用价值。

参考文献

[1] 张波,郑宏,曹丰文,等. LED光伏路灯系统的研究与设计[J]. 电气传动,2010,40(9):38-40.

(上接第75页)

技术[J]. 电工技术学报,2017,32(13):130-136.
 [20] Li Hongchang, Li Jie, Wang Kangping, *et al.* A maximum efficiency point tracking control scheme for wireless power transfer systems using magnetic resonant coupling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015,30(7):3998-4008.
 [21] 李森涛,樊绍胜,李富林,等. 磁耦合谐振式电能传输系统的功率输出特性分析及其最大功率点追踪[J]. 现代电子技术, 2015,38(12):143-145,149.

[2] 曹永健,董建宇,杨雨龙,等. 不间断供电的LED路灯智能控制与管理系统的[J]. 照明工程学报,2019,30(2):67-70.
 [3] 杨秀增,杨仁桓. 大功率太阳能LED路灯恒流驱动电源设计[J]. 现代电子技术,2017,40(6):168-170.
 [4] 唐嘉铭,郑阳,李晖,等. 无线LED照明驱动系统方案设计[J]. 电子设计工程,2014(15):105-108.
 [5] 钟发荣. LED驱动电源调光方案浅析[J]. 科技风,2015(4):130-130.
 [6] 夏中金,凌六一,黄家伟,等. 可见光通信LED高速驱动电路研究与设计[J]. 光通信技术,2019,43(2):22-26.
 [7] 王澍. 有关动态调光玻璃原理、节能效率与应用的研究[J]. 智能城市,2019,5(6):119-120.
 [8] 王思远. 一种基于蓝光LED的远距离可见光通信系统[J]. 通讯世界,2019,26(1):65-67.
 [9] 陈文娟,胡姗姗,徐嘉远,等. 可见光通信中解调信号与基带信号关系的研究[J]. 光通信技术,2019,43(8):7-10.
 [10] 钟菲,赵紫斐,张学敏,等. 绿色照明的新领域——LED可见光通信研究[J]. 科学技术创新,2018(34):75-76.

收稿日期:2019-09-04

修改稿日期:2019-10-21

[22] Ananthapadmanabha Berigai Ramaiah, Rakesh Maurya, Sabha Raj Arya. Magnetic energy recovery switch-based power quality AC-DC converters[J]. European Transactions on Electrical Power, 2017,27(8):1-13.
 [23] 黄悦华,周健飞,魏业文,等. 电动汽车动力锂电池LCL型无线充电技术[J]. 电测与仪表,2020,57(6):140-147.

收稿日期:2020-05-18

修改稿日期:2020-05-26