

智慧照明中基于导通角调制的电力线通信技术

刘剑滨¹, 李 莎¹, 姜岩峰², 程学农³

(1. 无锡太湖学院江苏省物联网应用技术重点建设实验室, 江苏无锡 214064;
2. 江南大学物联网应用技术教育部工程研究中心, 江苏无锡 214122; 3. 中电海康无锡科技有限公司, 江苏无锡 214028)

摘 要: 针对智慧照明可靠性要求高、通信数据量小的特点, 本设计提出一种基于导通角调制的电力线通信技术. 利用斩波技术调制工频波形的导通角, 并将调制后的工频波形在电力线上传输. 本设计的编码方式是将完整工频波形设为信号“0”, 斩波波形设为信号“1”, 一帧数据包含 24 位信号. 为满足电网电能质量要求, 减少畸变的影响, 导通角调制区间定义为 $0.91\pi \sim \pi$ 之间. 经验证测试, 该设计可实现调光控制, 总谐波畸变率小于 5%, 电压闪变幅度小于 4%, 功率因数大于 0.90. 该设计可广泛应用在智慧照明领域.

关键词: 导通角; 电力线通信; 路灯调光; 总谐波畸变; 电压闪变; 功率因数; 电磁兼容性

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021) 07-1331-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200704

Power Line Communication Technology Based on Conduction Angle Modulation in Intelligent Lighting

LIU Jian-bin¹, LI Sha¹, JIANG Yan-feng², CHENG Xue-nong³

(1. Jiangsu Key Construction Laboratory of IoT Application Technology, Wuxi Taihu University, Wuxi, Jiangsu 214064, China;
2. Engineering Research Center of the Ministry of Education of Internet of Things Applied Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. CETHIK Wuxi Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214028, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of high reliability of the intelligent lighting technique with limited communication data, a power line communication technology based on the conduction angle modulation is proposed. The chopper technology is used to modulate the conduction angle of the power waveform and transmit the modulated power waveform on the power line. The principle of the coding in the design is simple and distinctive, in which a complete power waveform corresponding to signal "0", while the chopped waveform relating to signal "1". One frame data contains 24 bit signal. In consideration of the power quality standard of power grid, the conduction angle modulation interval is from 0.91π to π . Based on the practical testing results, the design can realize dimming control, the total harmonic distortion rate is less than 5%, the voltage flicker amplitude is less than 4%, and the power factor is greater than 0.90. This design has a wide application prospect in the field of intelligent lighting.

Key words: conduction angle; power line communication; light dimming; total harmonic distortion; voltage flicker; power factor; electromagnetic compatibility

1 引言

近年来我国路灯建设快速发展, 每年新增路灯超百万套, 打造智慧照明, 通过云平台实现路灯的调光控制、状态监测、故障报警等, 可有效提高路灯可靠性, 降低功耗等^[1,2]. 智慧照明常见三类通信^[3-5]: (1) LoRa, 5G 等无线通信, 安装方便, 但防护等级低, 易受干扰, 天线

破坏灯具防水性; (2) RS485、DMX512 等有线通信, 需单独布置通信线, 通信线易受损及受相邻电力线干扰; (3) 电力线载波通信 (Power Line carrier Communication, PLC) 等电力线通信, 电力线同时传输电能及通信信号, 无需额外信号线, 施工方便, 线路可靠, 在工业控制等高可靠性场合应用较多. 本设计基于可靠性考虑, 选择

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-12-29; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金项目 (No.18KJB510045); 无锡市科协软科学研究课题设计 (No.KX-20-B11); 江苏省物联网应用技术重点建设实验室资助项目 (No.18WXWL05)

电力线通信技术路线.

电力线载波通信(PLC)应用广泛,但存在如下问题:(1)电力线载波通信需要将信号调制到 10kHz~12MHz 载波上再进行电力线传输,这会影响到电网其他电器,带来电磁干扰(ElectroMagnetic Interference, EMI)问题;(2)电网上各类用电设备带来复杂电磁噪声,这些干扰不规则,频率范围宽,叠加后干扰幅度大,干扰电力线载波通信,带来电磁敏感度(ElectroMagnetic Susceptibility, EMS)问题;(3)配电网中,容性负载、感性负载和配电网会构成许多谐振回路,在谐振回路及谐振频率形成低阻抗区,导致载波信号的畸变和衰减;(4)用电设备接入配电网时间随机多变,使得电网特性时变性强,不利于匹配设计;(5)窄带电力线载波通信频段(10kHz~500kHz)被规划为电力应用,宽带电力线载波通信频段(2MHz~20MHz)一般用于无线电类业务应用,载波通信占用宝贵的频带资源.

电力线载波通信持续改良,天津大学提出了一种低压电力线载波信号时频混合降噪方法^[6];为提高电力线载波通信的可靠性、实时性,华北电力大学提出了一种静动态中继相结合的分级分层 PLC 路由算法^[7];为克服配电网的时变性,华北电力大学提出了一种 TWACS(Two Way Automatic Communication System)的电力线载波路径搜索算法^[8]. 基于路灯照明通信可靠性高、通信数据量小、电磁兼容性要求高的特点,本文提出并设计了一种基于导通角调制的低速率、高可靠的通信方式,利用斩波技术微调工频电力波形的导通角,调制后的工频波形传输电力的同时传输控制信号.

2 导通角调制通信原理

该技术包括通信发送端、通信接收端:通信发送端调制外部电网输入的工频波形的导通角,并将调制后的工频波形在内部局域电网上传输;通信接收端获取电能的同时解调该导通角信号.

2.1 导通角信号调制

导通角信号调制原理图及波形图如图 1、图 2 所示. u_{in} 为外部电网输入的工频波形,为完整的正弦波. G_1 为双向大功率晶闸管,方波脉冲信号 u_g 为晶闸管 G_1 的驱动信号. 当 u_g 低电平无效,晶闸管 G_1 截止, u_{out} 无输出; u_g 高电平有效触发晶闸管导通, u_{out} 输出,即使 u_g 返回低电平,晶闸管仍维持导通,直到工频波形过零点(π 相位)关断. 从过零点到 u_g 有效为触发角 θ , 导通角 $\alpha = \pi - \theta$. 输入指令 f_{in} 通过编码单元产生 u_g 信号,控制大功率晶闸管 G_1 的通断,得到导通角 $\alpha (\alpha \leq \pi)$ 可调的输出工频波形 u_{out} . u_{out} 在局域电网传输电能的同时传递信号,不同的导通角 α 代表不同的控制信号.

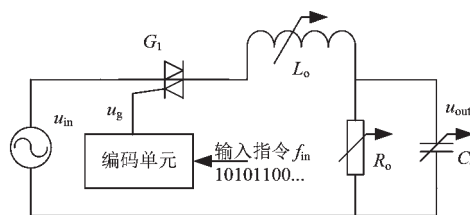


图 1 导通角调制原理图

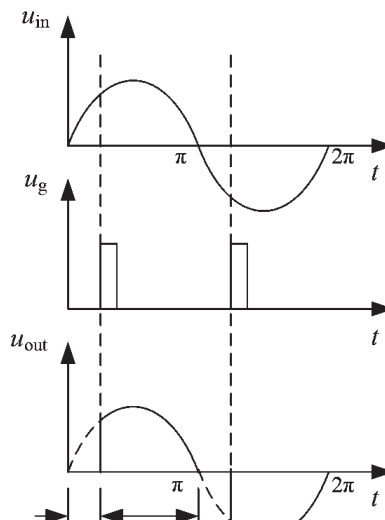


图 2 导通角调制波形图

2.2 导通角信号解调

导通角信号解调原理图及波形图如图 3、图 4 所示. 局域电网内经过调制的工频波形 u_{out} 通过全桥整流电路得到高压半波 u_z . 考虑到后续数字电路的耐压(峰值不超过 12V), 需要降压电路将 u_z 降至低压半波 u_s . u_s 为低压正弦半波, 通过检波电路将其转换成同相位方波 u_d , u_d 的相位通过解码单元解析出输出指令 f_{out} . 理想状态下, 解调输出指令 f_{out} 等于调制输入指令 f_{in} .

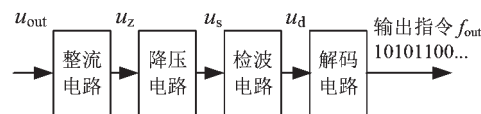


图 3 导通角解调原理图

3 导通角调制通信方案设计

3.1 整体方案

道路照明中,一台配电柜控制一段道路百余台路灯,通信发送端作为控制中枢置于配电柜内,在给智慧路灯供电的同时群发控制信号;通信接收端置于单个智慧路灯内,在接收电能的同时解调工频波形内的信号,再根据解调信号进行 PWM(Pulse Width Modulation)调光.

图 5 所示系统结构为总线、单工通信,包含 1 台通信发射端, n 台通信接收端, 每台通信接收端控制一台

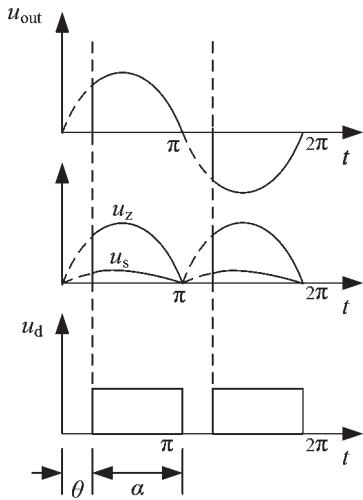


图4 导通角解调波形图

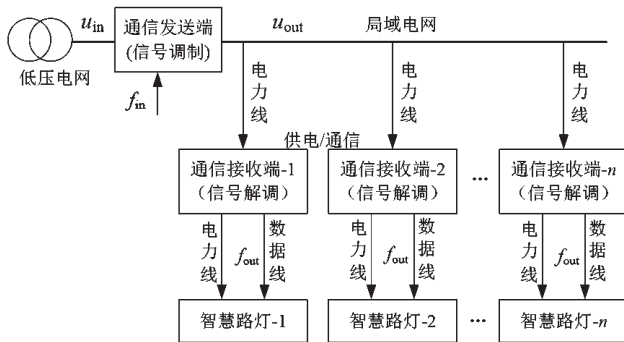


图5 系统整体结构图

智慧路灯。低压电网给通信发射端提供工频波形 u_{in} ，通信发射端根据指令 f_{in} 对输入的 u_{in} 波形进行调制，得到导通角 α 可调的工频波形 u_{out} ，并传送到局域电网。局域电网内并联 n 台通信接收端， u_{out} 既给通信接收端供电， u_{out} 导通角 α 也包含 f_{in} 的指令。通信接收端将 u_{out} 包含的指令解调出 f_{out} ，通过数据线传输给控制系统，并通过电力线给该智慧路灯供电。

3.2 编码方式

目前常见四种编码：(1)RZ(Return Zero code)即归零编码，在一位数据周期内，前半周期传输数据，高电平表示1，低电平表示0，后半周期用低电平表示该数据位结束；(2)NRZ(Non Return Zero code)即不归零编码，在一位数据周期内用高电平表示1，低电平表示0，与RZ码的区别在于不用低电平归零，因此需要时钟线(例如SPI通信)或通信双方约定好波特率(例如UART通信)；(3)NRZI(Non Return Zero Inverted code)即反向不归零编码，相较上一数据位周期，本数据位周期信号电平翻转表示0，信号电平不变表示1(例如USB2.0通信)；(4)曼彻斯特编码，在一位数据周期内，信号由高向低跳变表示0，信号由低向高跳变表示1(例如以太网

通信)。

表1 常见编码方式对比

编码	电平/数据位	波特率/时钟	帧长度
RZ	2	需约定	不需约定
NRZ	1	需约定	需约定
NRZI	1	需约定	需约定
曼彻斯特	2	不需约定	需约定

如表1对比，RZ、曼彻斯特编码需两个电平定义一位数据；NRZ、NRZI编码一个电平定义一位数据，NRZ、NRZI速率快一倍。RZ、NRZ、NRZI编码采用电平高低表示0/1，在连续0/1时，将无法区分数据位边界，要约定波特率或外接时钟线；曼彻斯特编码采用电平跳变上升沿或下降沿表示0/1，自带信号同步。NRZ、NRZI、曼彻斯特编码一帧数据没有起始位、结束位，需收发双方约定帧长度；RZ编码自带结束标志位，通过信号本身即可判断帧长度。

本设计中，导通角调制会破坏工频波形，产生谐波，降低电压有效值，降低功率因数等，因此只能微调导通角。为保障导通角微调情况下的信号可靠性，定义完整波形(导通角 $\alpha = \pi$)为“0”，斩波波形(导通角 $\alpha < \pi$)为“1”，不同斩波幅度不再额外定义信号。工频50Hz正弦波整流得到100Hz正弦半波，定义一个正弦半波传递一位数据，传输速率为100bit/s，其过零信号可作通信同步信号，无需额外约定波特率^[9]。

道路照明中，一个配电柜需控制上百台路灯，即一个通信发送端与上百台通信接收端通信，故设定10位地址位，实现对1024只智慧路灯的控制。人眼辨识的亮度约数十档，故采用8位控制位，实现256档调光，定义关灯指令“00000000”，亮度全开指令“11111111”，其他亮度指令均匀分布两者之间。非通信时段，电力线网传输完整正弦波为智慧路灯供电，将被接收并识别为信号“000……”，因此通信前后需发送数位“1”作为起始位和结束位。1位“奇偶校验位”对收/发的数据进行比对校验。

综上分析，结合参考文献[10~12]得到图6编码方式，一帧通信数据包括：3位起始位，10位地址位，8位控制位，1位奇偶校验位，2位结束位，合计24位数据。单个正弦半波表示1bit数据，1bit周期10ms，一帧数据24bit，故一帧信号周期 T_1 为240ms。假设一台通信发

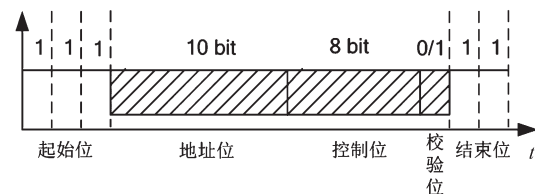


图6 通信编码方式

送端控制 100 台智慧路灯, 每台通信接收端都需要 1 帧独立指令, 则通信发送端需要广播 100 条指令实现全覆盖. 为提高通信可靠性, 通信将重复 3 次, 故每次通信合计发送 300 条指令, 单次通讯总时长 T_s 如式(1):

$$T_s = 10\text{ms} \times 24 \times 300 = 72\text{s} \quad (1)$$

道路照明一般每天改变 3 次, 白天全灭、傍晚全亮、半夜半亮, 通信频次低, 实时性要求低, 因此该编码方式虽然速率低, 仍可满足应用要求.

3.3 导通角调制区间

外界电网输入 u_{in} 为完整波形(导通角 $\alpha=\pi$), 经过通信发送端调制导通角后, 得到斩波波形 u_{out} (导通角 $\alpha < \pi$) 用于传输能量和信号. u_{out} 斩波后会带来三方面问题: 谐波干扰破坏电磁兼容性, 电压闪变冲击电网用电设备, 功率因数降低电网品质. 导通角 α 越小上述问题越严重, 需合理定义导通角的调制区间, 避免上述 3 方面问题.

(1) 谐波干扰

图 2 中, 电网输入 $u_{in}=U_p \cdot \sin\omega t$, $\omega=100\pi$, 电压峰值 $U_p=310\text{V}$, 只有基波分量的 u_{in} 经过导通角调制后得到含有谐波分量的 u_{out} , u_{out} 为半波镜像信号, 傅里叶分解后如式(2)所示:

$$u_{out} = \sum_{n=2k+1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2)$$

其中 a_n, b_n 如下:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\alpha}^{\pi} U_p \cdot \sin\omega t \cdot \cos n\omega t dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\alpha}^{\pi} U_p \cdot \sin\omega t \cdot \sin n\omega t dt \quad (4)$$

式中 $n=2k+1, k=0, 1, 2, \dots$, 导通角 $\alpha \leq \pi$, 式(3)、式(4)带入式(2)得到:

$$u_{out} = \frac{\alpha}{\pi} U_p \sin\omega t + \sum_{n=2k+3}^{\infty} \frac{U_p \sin n\alpha}{n\pi} \sin[n(\omega t - \alpha)] \quad (5)$$

式(5) u_{out} 各谐波含量汇总得到图 7, 导通角 $\alpha=\pi, u_{out}=u_{in}$ 时, 基波占比 100%, 无谐波分量; 导通角 α 从 π 减小, 斩波幅度增加, 基波含量降低, 谐波含量增加; 直到导通角 $\alpha=0$, 则 $u_{out}=0$, 所有电压分量无信号.

根据国标《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549-1993)^[13], 380V 以下低压电网电压要求总谐波畸变率 $\text{THD}_v \leq 5\%$, 代入式(5)得到导通角 $\alpha \geq 0.89\pi$.

(2) 电压闪变

图 2 中, 电网输入完整工频波形 u_{in} , 当导通角 $\alpha=\pi$ 时, u_{out} 无斩波为完整波形, 电压有效值 220V, 稳定无闪变. 当导通角 $\alpha \neq \pi, u_{out}$ 斩波为非完整波形, 导致电压闪变跌落, 将对电网用电设备产生冲击. 根据式(6)计算斩波后信号 u_{out} 的有效值 U_o :

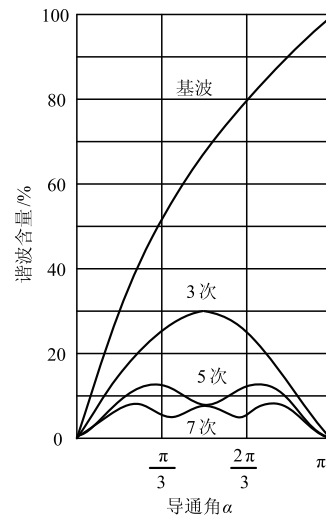


图 7 基波与谐波含量

$$U_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi-\alpha}^{\pi} (U_p \sin\omega t)^2 dt} \quad (6)$$

式(6)积分得到式(7), 其中 U_p 为电压峰值:

$$U_o = \frac{\sqrt{2} U_p}{2} \sqrt{\frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (7)$$

由式(7)可见, 当导通角 $\alpha=\pi$ 时, u_{out} 无斩波, 电压值最大, $U_{omax} = \frac{\sqrt{2} U_p}{2}$; 当导通角 α 从 π 逐步减小, 斩波幅度加大, U_o 减小导致电压闪变跌落; 当导通角 $\alpha=0, U_o$ 闪变至 0.

根据国标《电能质量 电压波动和闪变》(GB/T 12326-2008)^[14], 380V 以下低压电网要求电压闪变幅度 $\leq 4\%$, 即 $U_o \geq 0.96 U_{omax}$, 将该指标代入式(7)得到式(8):

$$\frac{\sqrt{2} U_p}{2} \sqrt{\frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2\pi}} \geq 0.96 \frac{\sqrt{2} U_p}{2} \quad (8)$$

计算式(8)得到导通角 $\alpha \geq 0.76\pi$.

(3) 功率因数

为满足城市道路照明的要求, 根据国标《LED 模块用直流或交流电子控制装置性能要求》(GB/T 24825-2009)^[15], 对接入照明电网的 LED 电源、控制器等电子控制装置, 推荐功率因数 $\lambda \geq 0.90$.

本设计中, 对 u_{in} 进行斩波得到 u_{out} , 从两方面导致功率因数 λ 降低, 一方面如前所述产生谐波干扰, 部分谐波带来的无功功率使功率因数降低, 将基波电流在总电流中的占比 ω_0 称为基波因子; 一方面由于晶闸管 G_1 的滞后导通使得 i_{in} 相对于 u_{in} 延迟 $\pi-\alpha$ 相位, 将 $\cos(\pi-\alpha)$ 称为相移因子. 两者结合得到式(9)总功率因数 λ :

$$\lambda = \omega_0 \cdot \cos(\pi - \alpha) = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}} \cdot \cos(\pi - \alpha) \quad (9)$$

导通角调制带来 $\text{THD}_v \leq 5\%$, 所接 LED 驱动电源产生谐波 $\leq 5\%$, 叠加后 THD 近似取值 10%. 将 $\lambda \geq 0.90$,

THD=10% 带入式(9)计算得到 $\cos(\pi-\alpha) \geq 0.96$, 导通角 $\alpha \geq 0.91\pi$.

综合考虑谐波干扰 ($\alpha \geq 0.89\pi$)、电压闪变 ($\alpha \geq 0.76\pi$)、功率因数 ($\alpha \geq 0.91\pi$), 得到导通角 $\alpha \geq 0.91\pi$, 即导通角调制区间 $0.91\pi \sim \pi$.

4 智慧路灯中的设计实现

如前述, 本设计包括集中控制器(通信发送端)和智能调光控制器(通信接收端)两部分.

4.1 集中控制器(通信发送端)的设计

设计图 8 所示的集中控制器装在道路配电柜内, 给路灯局域电网供电的同时, 调制导通角 α 群发控制信号. 集中控制器通过过零检测、可控硅驱动电路精确调制导通角 α , 外网电压 u_{in} 经过调制得到内网电压 u_{out} , 为内部局域电路灯供电, 总功率约 20kW, 总电流约 100A. 选用 MTC300A 双向可控硅, 通态电流 $I_T=300A$, 通态内阻 $R_T=0.72m\Omega$. 可控硅的散热决定了使用寿命, 计算耗散功率 P_D :

$$P_D = I_T^2 R_T = 100A \times 100A \times 0.72m\Omega = 7.2W \quad (10)$$

耗散功率 P_D 为 7.2W, 发热严重, 采用整片散热器并加装风扇, 经过热仿真可实现可控硅表面温升 $\Delta T < 60^\circ C$ 的安全值.

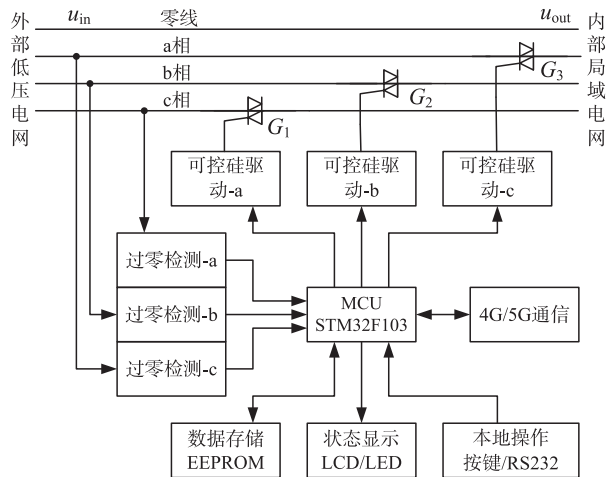


图 8 集中控制器框图

4.2 智能调光控制器(通信接收端)的设计

智能调光控制器装在单个智慧路灯内, 解调导通角 α 信号, 并通过 PWM 调光.

图 9 为智能调光控制器框图, 输入已调制电力信号 u_{out} , AC-DC 变换得到低压直流电, 给 LED 光源及智慧路灯扩展设备(摄像头、气象站等)供电. 过零检测电路判断 u_{out} 频率及过零点, 导通角检测电路识别 u_{out} 是否斩波, 从而读取信号 0/1. 单片机 (MicroController Unit, MCU) 读取导通角检测出的信号得到调光目标值, 并通

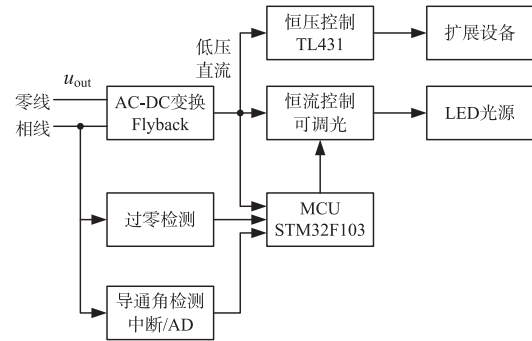


图 9 智能调光控制器框图

过 PWM 驱动 LED 光源实现该目标值.

导通角检测电路如图 10 所示, u_{out} 通过 $D_1 \sim D_4$ 整流得到高压半波 u_z ; u_z 通过 R_1 (1M Ω 高压大功率绕线电阻)、 R_2 (20k Ω 普通贴片电阻), 辅以必要的滤波、限压电路得到低压半波 u_s ; u_s 通过运放 OP₁ 检波得到同相位方波 u_d , u_d 被 MCU 中断口识别出“0”或“1”. 普通绕线电阻存在的微弱感量会对 u_z 波形产生畸变和时延, 故 R_1 为定制的高压大功率无感绕线电阻.

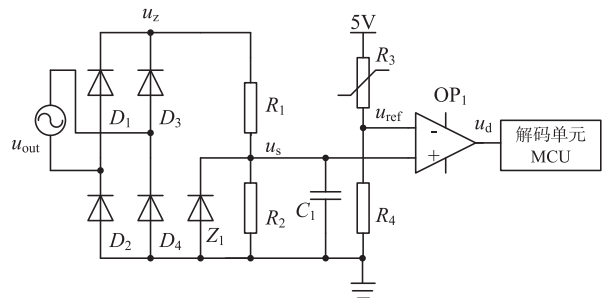


图 10 导通角检测电路图

5 测试与结果分析

5.1 测试方案

测试样品包括一台集中控制器(通信发送端)和一台智能调光控制器(通信接收端), 按图 11 所示进行连线测试.

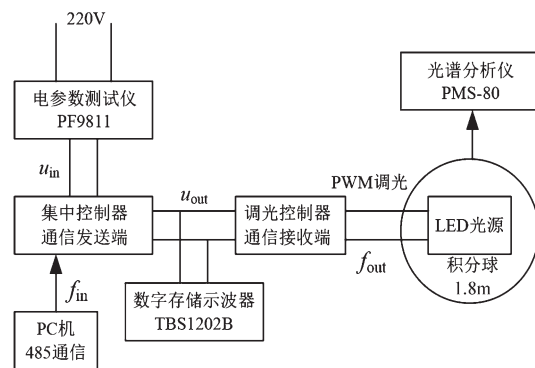


图 11 测试方案图

输入市电 AC220V,通过电参数测试仪输出 u_{in} 给集中控制器(通信发送端),集中控制器根据 PC 机的 f_{in} 信号对 u_{in} 的导通角 α 进行调制得到 u_{out} , u_{out} 给智能调光控制器(通信接收端)供电和通信,示波器观察 u_{out} 波形. 智能调光控制器将信号解调得到 f_{out} ,并根据 f_{out} 对 LED 光源进行 PWM 调光,积分球和光谱分析仪测试 LED 光源的光通量变化. 本测试采用 200W LED 光源,全亮(调光幅度 100%)时光通量 Φ 等于 20970 流明(lm).

5.2 测试结果及分析

本测试设定 f_{in} : 起始位“111”,地址位固定为“000000000”,控制位在“00000000~11111111”之间调节,实现 0~255 档 PWM 调光,校验位“0/1”,结束位“11”. 本次测试将调光区间从 0 到 100% 平均分成 8 个区间,选取 9 个点进行测试,控制位分别是“00000000”、“00100000”……“11100000”、“11111111”,对应的调光幅度为 0%、12.5% …… 87.5%、100%.

测试结果表 2 所示,档位 0,输入 f_{in} “111 0000000000 00000000 1 11”,信号中“1”的位数最少,斩波最少,谐波、电压闪变、功率因数 λ 影响最小,实测 u_{out} 有效电压 220V 近似于 u_{in} ,功率因数 λ 为 0.915,调光幅度 0%,实测光通量 Φ 为 0lm. 档位 8,输入 f_{in} “111 0000000000 11111111 1 11”,信号中“1”的位数最多,斩波最多,谐波、电压闪变、功率因数 λ 影响最大,实测 u_{out} 有效电压 216V 略小于 u_{in} ,功率因数 λ 为 0.908,调光幅度 100%,实测光通量 Φ 为 20970lm. 其余 1~7 档位测试结果介于两者之间. 综上,实现了输入指令 f_{in} 调光,且调光曲线具备较好线性,并满足《电能质量 电压波动和闪变》(GB/T 12326-2008)中对电压闪变幅度 $\leq 4\%$ 的要求,《LED 模块用直流或交流电子控制装置性能要求》(GB/T 24825-2009)中对功率因数 $\lambda \geq 0.90$ 的要求.

u_{out} 在档位 0、档位 8 下的波形如图 12、图 13,波形细节如图 14,符合设计预期. 导通角 $\alpha \approx 0.9\pi$,波形略有畸变,实测谐波 $THD_U = 4.2\%$,符合《电能质量 公用电网谐

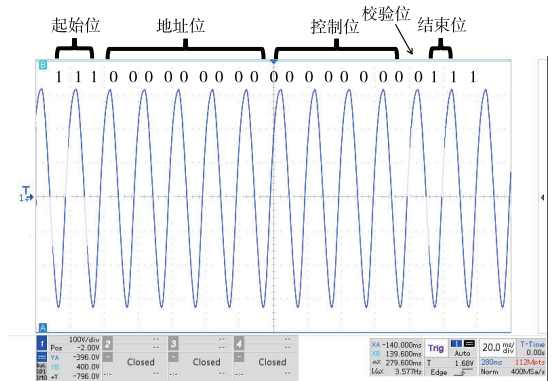


图 12 u_{out} 波形图(0档)

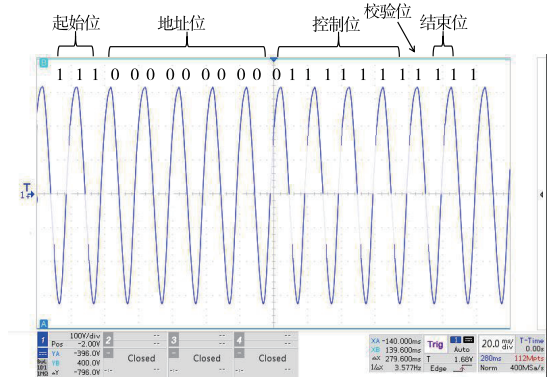


图 13 u_{out} 波形图(8档)

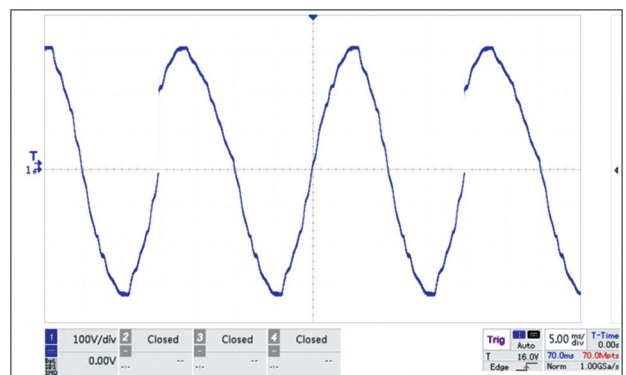


图 14 u_{out} 波形细节图

表 2 测试结果

档位	输入指令 f_{in}	调光幅度%	功率因数 λ	有效电压 V	光通量 lm
0	111 0000000000 00000000 1 11	0	0.915	220	0
1	111 0000000000 00100000 0 11	12.5	0.915	220	3557
2	111 0000000000 01000000 0 11	25.0	0.916	220	6670
3	111 0000000000 01100000 1 11	37.5	0.913	218	9987
4	111 0000000000 10000000 0 11	50	0.913	219	12670
5	111 0000000000 10100000 1 11	62.5	0.914	218	15020
6	111 0000000000 11000000 1 11	75.0	0.915	220	17210
7	111 0000000000 11100000 0 11	87.5	0.913	217	19110
8	111 0000000000 11111111 1 11	100	0.908	216	20970

波》(GB/T 14549-1993)中总谐波畸变率 $THD_v \leq 5\%$ 的要求。

6 总结

本文提出并实现了基于导通角调制的电力线通信方式,包括通信发送端、通信接收端两部分。通信发送端调制外部电网输入的工频波形 u_m 的导通角 α ,并将调制后的工频波形 u_{out} 在内部局域电网上传输;通信接收端通过局域电网获取 u_{out} 电能,并解调导通角 α 包含的信号,用于智慧路灯调光控制。该通信一帧数据 24 位,可控制 1024 个路灯,实现 256 档调光。导通角 α 调制区间为 $0.91\pi \sim \pi$,以满足《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549-1993)对总谐波畸变率小于 5% 的要求,《电能质量 电压波动和闪变》(GB/T 12326-2008)对电压闪变幅度小于 4% 的要求,《LED 模块用直流或交流电子控制装置性能要求》(GB/T 24825-2009)对功率因数 λ 大于 0.90 的要求。

经测试,该设计可实现正常信号收发,实现对智慧路灯的调光控制,并在道路照明领域小范围试点应用,具有广泛的应用前景,亦可为电力线通信及智慧照明提供参考设计。

参考文献

- [1] 余建波,宗卫周,等.城市智慧照明控制系统研究与实现[J].计算机工程与设计,2018,39(03):836-841.
YU Jian-bo, ZONG Wei-zhou, et al. Research and implementation of smart urban lighting control system[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(03): 836-841. (in Chinese)
- [2] 张宏宇,贾素梅,姜韶军.基于物联网的太阳能LED路灯系统设计与实现[J].电源技术,2017,41(07):1039-1041,1059.
ZHANG Hong-yu, JIA Su-mei, JIANG Shao-jun. Design and implementation of solar LED street lamp system based on internet of things [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(07): 1039-1041, 1059. (in Chinese)
- [3] 史建超,谢志远.面向电力物联网信息感知的低压电力线与微功率无线通信融合方法[J].电力自动化设备,2020,40(10):147-157.
SHI Jian-chao, XIE Zhi-yuan. Fusion method of low voltage power line and micro power wireless communication for information perception of power internet of things [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 147-157. (in Chinese)
- [4] 于季弘,刘昊,王帅.无源物联网综述—从感知、通信与管理的视角[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2020,32(05):736-751.
YU Ji-hong, LIU Hao, WANG Shuai. Survey on passive internet of things: From the perspective of sensing, communications and management [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(05): 736-751. (in Chinese)
- [5] 景皓,张智远,等.一种低压电力线载波通信主动抗干扰技术[J].南京航空航天大学学报,2018,50(05):701-708.
JING Hao, ZHANG Zhi-yuan, et al. Active Anti-jamming technique for low voltage power line carrier communication [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(05): 701-708. (in Chinese)
- [6] 杨挺,刘佳林,等.电力线载波通信时频混合降噪方法[J].电网技术,2018,42(10):3153-3160.
YANG Ting, LIU Jia-lin, et al. Time-frequency hybrid noise reduction method for power line carrier communication [J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3153-3160. (in Chinese)
- [7] 王艳,薛晨,焦彦军.中压配电网静态中继结合的分级分层电力线载波通信路由算法[J].电力自动化设备,2017,37(12):8-15.
WANG Yan, XUE Chen, JIAO Yan-jun. Hierarchical classification PLC routing algorithm combining static relay with dynamic relay in medium voltage distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 8-15. (in Chinese)
- [8] 马文静,孙凤杰,等.融合工频通信的电力线载波路径搜索算法[J].电力系统自动化,2017,41(03):141-146.
MA Wen-jing, SUN Feng-jie, et al. Path search algorithm of power line carrier merged with two way automatic communication system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(03): 141-146. (in Chinese)
- [9] 孙建永,任永春,张国俊.一种新型AC电压过零检测方法及其实现[J].微电子学,2015,45(03):349-351.
SUN Jian-yong, REN Yong-chun, ZHANG Guo-jun. A new method and implement of AC input voltage zero-crossing detection [J]. Microelectronics, 2015, 45(03): 349-351. (in Chinese)
- [10] 侯磊,张灿,等.基于高性能编码调制映射的联合解调译码方法[J].电子学报,2018,46(9):2194-2200.
HOU Lei, ZHANG Can, et al. A joint demodulation and decoding method based on high-performance code-modulation mapping [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(9): 2194-2200. (in Chinese)
- [11] 谢显中,陈九九,扶渝茜.全双工信息与能量同传系统

的鲁棒性预编码及高能效时隙分配方案[J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1213 – 1221.

XIE Xian-zhong, CHEN Jiu-jiu, FU Yu-xi. Robust precoding and energy-efficient timeslot allocation for full-duplex SWIPT system[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1213 – 1221. (in Chinese)

- [12] 曾伟超, 陈雁, 等. 无线多载波信道的保密容量及最优功率分配[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, (08): 1281 – 1285.

ZENG Wei-chao, CHEN Yan, et al. Secrecy capacity and optimal power allocation over wireless multi-carrier channel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, (08): 1281 – 1285. (in Chinese)

- [13] GB/T 14549-1993, 电能质量公用电网谐波[S].

- [14] GB/T 12326-2008, 电能质量电压波动和闪变[S].

- [15] GB/T 24825-2009, LED模块用直流或交流电子控制装置性能要求[S].

作者简介



刘剑滨(通信作者) 男,1978年生于湖南邵阳,硕士,高级工程师,硕士研究生导师,研究方向为LED照明、物联网技术,任职于无锡太湖学院江苏省物联网应用技术重点建设实验室.

E-mail: 1905447@qq.com

李莎 女,1981年生于四川成都,硕士,副教授,研究方向为光学仪器、物联网技术,任职于无锡太湖学院江苏省物联网应用技术重点建设实验室.

E-mail: 33936910@qq.com

姜岩峰 男,1972年生于吉林,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为集成电路设计、测试技术,任职于江南大学物联网工程学院.

E-mail: jiangyf@jiangnan.edu.cn

程学农 男,1974年生于安徽池州,硕士,高级工程师,研究方向为集成电路设计、物联网技术,任职于中电海康无锡科技有限公司.

E-mail: chengxuenong@hikmicro.com