

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.03.013

高充电效率的恒流太阳能路灯控制器

向 敏,冉景海,屈洪春

(1. 重庆邮电大学 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室,重庆 400065;
2. 重庆市物联网工程技术研究中心,重庆 400065)

摘 要:针对传统太阳能路灯控制器主要存在充电效率低、恒流精度低的问题,提出基于多路脉冲宽度调制(PWM)恒流技术的新型太阳能路灯控制器的设计方案。该控制器采用复合式DC-DC变换器,通过控制多路PWM信号,实现高效地充放电功能。充电过程以改进的扰动观察法实现最大功率点跟踪(MPPT),提高充电效率;放电过程通过实时检测LED路灯的实际电流,动态调整相应PWM信号的占空比实现高精度恒流驱动LED路灯。实物测试结果表明该控制器能有效地改善充电效率和恒流源精度,充电速度提高了4%~7%,恒流源精度高达2.5%。

关键词:太阳能;路灯控制器;脉冲宽度调制;最大功率点;恒流;充电效率

中图分类号:TP29

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)03-0093-08

Solar street lamp controller of high charging efficiency and constant current

XIANG Min, RAN Jinghai, QU Hongchun

(1. Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Networked Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P.R.China; 2. Chongqing Internet of Things Engineering Technology Research Center, Chongqing 400065, P.R.China)

Abstract: The traditional solar street lamp controller is constrained with the low charging efficiency and the low precision of the constant current source. A novel solar street lamp controller based on the multi-channel PWM constant current technology is designed. A composite DC-DC converter is adopted to realize charging and discharging efficiently through controlling multi-channel PWM signals. During the charging stage, the efficiency of charging is improved by tracking the maximum power point with the perturbation and observation method. During the discharging stage, the duty cycle of the relevant PWM signals are used to implement the high precision constant current source for driving the LED street lamp, which can be adjusted automatically through real-time detecting of the lamp's actual current. The test results show that the charging efficiency of the street lamp controller can be improved evidently, and the charging speed increases 4% to 7%. Furthermore, the precision of the constant current source reaches a high level of 2.5%.

Key words: solar energy; street lamp controller; pulse width modulation; maximum power point; constant current; charging efficiency

收稿日期:2015-03-15

基金项目:国家自然科学基金基金项目(61102145, 61374093);重庆市信息产业发展资金资助项目(渝财企[2010]626号);重庆市科委前沿与应用基础研究计划项目(cstc2013jcyjA40002, cstc2013jcyjA40014)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(61102145, 61374093); Chongqing Information Industry Development Fund Project ([2010] 626) and Research Project of Chongqing S&T Committee (cstc2013jcyjA40002, cstc2013jcyjA40014).

作者简介:向敏(1974-),男,重庆邮电大学副教授,主要从事无线传感器网络和嵌入式研究,(E-mail) xiangmin@cqupt.edu.cn。

随着社会的快速发展,各国对能源的需求越来越大,能源作为可持续发展的前提和基础,是国民经济和社会发展的关键战略资源^[1]。由于过度开发使得不可再生能源逐渐枯竭,诸如煤、石油等化石燃料,使用化石燃料带来的温室效应和环境污染也越发严重^[2-4]。为缓解能源压力,可再生能源的开发与使用得到了广泛的研究和快速的发展,可再生能源主要包括太阳能、风能、生物质能、海洋能和地热能等^[5]。近年来,随着大功率发光二极管(light emitting diode, LED)技术的快速发展,LED 的发光效率和颜色质量得到了改善,这使 LED 在照明系统中的应用越来越广泛^[6-7],LED 在太阳能路灯控制系统的应用成为研究的热点课题之一。传统的太阳能路灯控制器存在许多不足:首先,采用恒流、恒压、二阶段或三阶段的充电方法,存在充电效率低、控制精度低、蓄电池使用寿命短的问题^[8];其次,多数控制器仅采用恒定电压控制法、扰动观测法、导纳增量法、模糊控制法等传统的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法,这些算法存在不同的优缺点(例如:导纳增量法控制精度高,但控制算法较复杂,对控制系统要求高,成本高;扰动观测法简单可靠,对系统要求也低,但在最大功率点存在系统震荡,降低了充电效率和控制精度),难以兼顾稳态性能和动态性能,控制器成本和充电效率也难以兼顾^[9-15];最后,缺少温度补偿功能,蓄电池的性能受温度的影响也很大。因此,太阳能路灯控制器应该带有温度补偿功能^[8,16-17]。除此之外,传统的太阳能路灯控制器需要两个独立的电压变换器,成本高、结构复杂,其结构框图如图 1 所示。为降低成本和简化结构,已有研究者提出了如图 2 所示的新型太阳能路灯控制器,由于采用的是复合式 DC-DC 变换器,达到了降低成本和简化结构的目的,但目前处于理论研究阶段,市场上还没有相关产品推出^[2]。



图 1 传统太阳能路灯控制器

Fig.1 The tradition controller of the solar street lamp



图 2 新型太阳能路灯控制器

Fig.2 The innovative controller of the solar street lamp

笔者提出了一种基于图 2 所示的太阳能路灯控制器设计思想,通过改进控制方式即采用多路(pulse width modulation, PWM)实现 PWM 脉宽调制充电方式和恒流驱动 LED 路灯的功能,充电过程采用改进的扰动观察法实现 MPPT,并设计了 12 V/24 V 自适应、过流保护和温度补偿功能。

1 设计与实现

提出的太阳能路灯控制器主要包括 CPU、DC-DC 变换器、电流与电压采集电路和温度采集电路,其结构框图如图 3 所示。

1.1 控制器结构设计

主控制器实时检测太阳能极板的输出电压 U_{solar} 和蓄电池电压 U_{bat} ,在满足电条件下,主控制器通过调整 PWM₁ 波形实现对蓄电池的充电;在满足放电条件时,主控制器通过调整 PWM₂、PWM₃ 波形实现蓄电池的放电,并通过实时检测放电电流 I_{led} ,将 I_{led} 作为控制对象,实现恒流驱动 LED 路灯的功能。

1.2 DC-DC 变换器

DC-DC 变换器如图 4 所示,包括充电回路和放电回路,图中 Q_1 和 Q_3 为大功率增强型 P 沟道 MOS 场效应管, Q_2 为大功率增强型 N 沟道 MOS 场效应管。主控制器通过产生 PWM₁、PWM₂ 和 PWM₃,控制 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 的导通与关断,实现蓄电池的充电和放电功能。

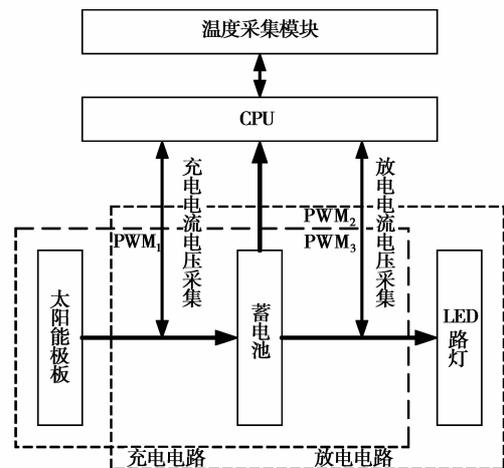


图 3 控制器结构框图

Fig.3 The diagram of the controller structure

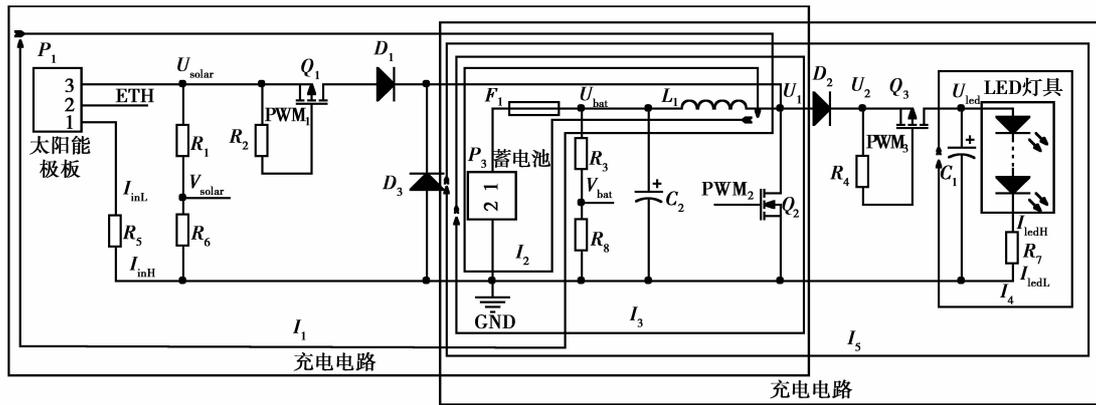


图 4 DC-DC 变换器

Fig.4 The voltage waveform of charging process

1.2.1 充电过程

充电过程,实质上是一个降压的过程。主控制器通过 AD 实时采集 V_{solar} 和 V_{bat} , 得到太阳能极板电压 U_{solar} 和蓄电池电压 U_{bat} , 进而判定蓄电池的充电和放电状态。当满足充电条件时, Q_2 和 Q_3 一直处于截止状态, 主控制器通过控制 Q_1 实现 PWM 脉宽调制方式充电, 该充电方式遵循蓄电池固有的充电接受率, 使蓄电池有较充分的反应时间, 减少了蓄电池充电过程的析气量, 提高蓄电池的充电效率。

由图 4 可知, Q_1 为增强型 P 沟道 MOS 场效应管, 要使 Q_1 导通, 则需要 PWM₁ 输出低电平。令 PWM₁ 的周期为 T , 占空比为 D , 输入电压为 U_{solar} , 输出的充电电压 U_{charge} 与时间 t 的波形图如图 5 所示, 利用电压伏秒平衡原则 (Voltage-Second Balance Principle) 可推出 U_{charge} 与 U_{solar} 的函数关系^[2,8,18] 为

$$U_{charge} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^T U_{solar} dt = (1 - D) \times U_{solar}, \quad (1)$$

式中: D 的变化范围为 $(0, 1)$, 则有 $U_{charge} < U_{solar}$ 。由此可知, 充电过程是一个降压的过程。通过调节 D , 将 U_{charge} 控制在合适的范围内, 从而实现对蓄电池进行高效、安全的充电。

整个充电过程的波形图如图 6 所示, 工作原理如下:

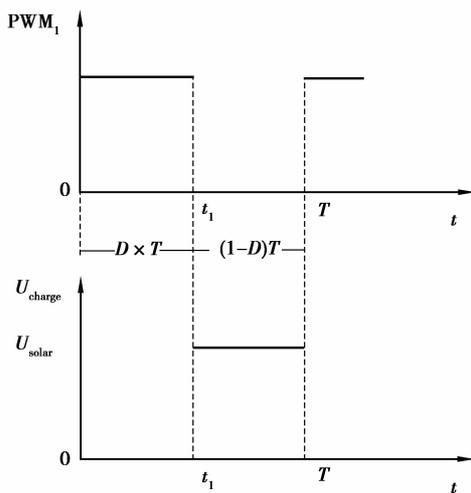


图 5 输出电压波形

Fig.5 The output voltage waveform

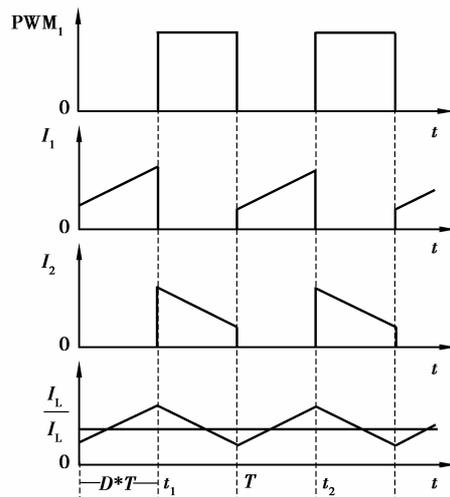


图 6 充电过程的波形图

Fig.6 The voltage waveform of charging process

- 1) PWM₁ 在 $(0, t_1)$ 为低电平, 则 Q_1 导通, 太阳能极板给蓄电池充电, 电流 I_1 回路如图 4 所示;
- 2) PWM₁ 在 $[t_1, T)$ 为高电平, 则 Q_1 关断, 电路中存在电流 I_2 , I_2 回路如图 4 所示。

令整个周期流过蓄电池的电流为 I_{charge} , I_{charge} 与流过 L_1 的电流平均值 \bar{I}_L 相等, 为

$$I_{\text{charge}} = \overline{I_L} = \frac{1}{T} \int_0^T I_L dt \quad (2)$$

由能量守恒定律可得太阳能极板给蓄电池充入的电能 P_{charge} 为

$$P_{\text{charge}} = U_{\text{charge}} \times I_{\text{charge}} \quad (3)$$

研究太阳能极板的 P - V 特性可知,在环境参数一定时,其输出功率具有唯一的 MPP,因此,为提高太阳能极板的发电效率和蓄电池的充电效率,实现 MPPT 显得非常重要^[14]。笔者提出的控制器通过对传统的扰动观察法进行改进,兼顾了稳态性能和动态性能,使得跟踪精度和相应速度得到了一定的改善。整个控制过程,就是通过调节 PWM₁ 的占空比 D ,控制 U_{charge} 和 I_{charge} 使得 P_{charge} 始终工作在 MPP,从而提高充电效率。

1.2.2 放电过程

放电过程,是一个集升压和降压于一体的过程。当太阳能 LED 路灯控制器控制小功率 LED 路灯时,放电回路工作在降压模式, Q_1 和 Q_2 处于关断,通过调节 PWM₃ 的占空比,实现降压功能,其工作原理与充电电路的工作原理类似,此处不再赘述。

当太阳能 LED 路灯控制器控制大功率 LED 路灯时,放电回路工作在升压模式。在整个放电过程中, Q_1 一直处于关断状态, Q_3 一直导通状态,通过调整 PWM₂ 的占空比 D ,实现升压功能,进而提高输出电流 I_{led} ,主控制器通过 AD 采集采样电阻 R_7 的电压,间接地获取放电电流,再反过来调整 PWM₂ 的占空比,实现恒流驱动 LED 路灯,整个升压过程的波形图如图 7 所示,工作原理如下:

1) PWM₂ 在 $(0, t_1)$ 为高电平,则 Q_2 导通,蓄电池经过 L_1 和 Q_2 形成电流 I_3 回路,蓄电池向电感 L_1 储能,同时 C_1 , LED 路灯和 R_7 构成电流 I_4 回路,如图 4 所示。

2) PWM₂ 在 $[t_1, T)$ 为低电平,则 Q_2 关断,整个回路形成电流 I_5 回路,如图 4 所示。

因二极管 D_2 具有单向导通特性,而 Q_2 导通阶段,存在 $U_1 < U_2$,因此, D_2 反向截止,即 $I_5 = 0$ 。由电压伏秒平衡原则可以得出 U_{led} 与 U_{bat} 的关系^[2,18]为

$$U_{\text{led}} = \frac{1}{1-D} U_{\text{bat}} \quad (4)$$

式中 D 的变化范围为 $(0, 1)$,则有 $U_{\text{led}} > U_{\text{bat}}$,实现了升压功能。

1.3 电流与电压采集

差分比例运算电路的特点是对差模信号有放大效果,对共模信号有抑制作用。由于采样电阻阻值较低,通过电流后,两端的电压也较低,易受到干扰,为提高采集精度,消除噪声信号,在采集充电电流和放电电流时,采用了差分比例运算电路,如图 8(a)所示,其中电路参数满足式(5), U_{ADC0} 与输入信号 U_{inL} 和 U_{inH} 的关系^[18]为

$$R_{41} = R_{43}, R_{42} = R_{44} \quad (5)$$

$$U_{\text{ADC0}} = -\frac{R_{42}}{R_{41}} (U_{\text{inL}} - U_{\text{inH}}) \quad (6)$$

电压跟随器具有输入阻抗很大,输出阻抗很小的特点。为减少负载对 AD 采样的影响,在采集太阳能极板电压和蓄电池电压的时候加入了电压跟随器,为消除噪声信号,在电压跟随器的输入端加了低通滤波电路,如图 8(b)所示,其中滤波器的截止频率 f_0 如式(7)所示, U_{ADC1} 与 U_{in} ^[18]为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_{45} C_{29}} \quad (7)$$

$$U_{\text{ADC1}} = U_{\text{in}} \quad (8)$$

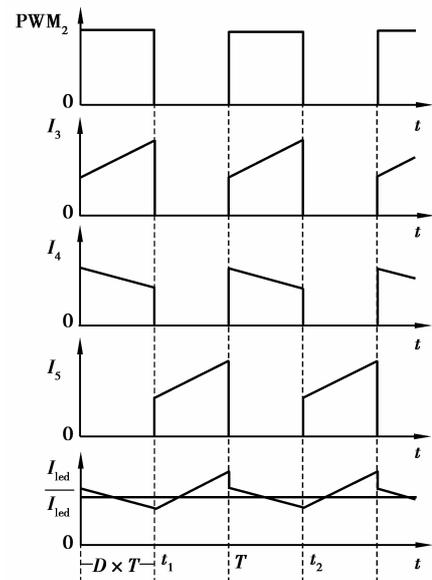


图 7 升压过程的波形图

Fig.7 The voltage waveform of the boost process

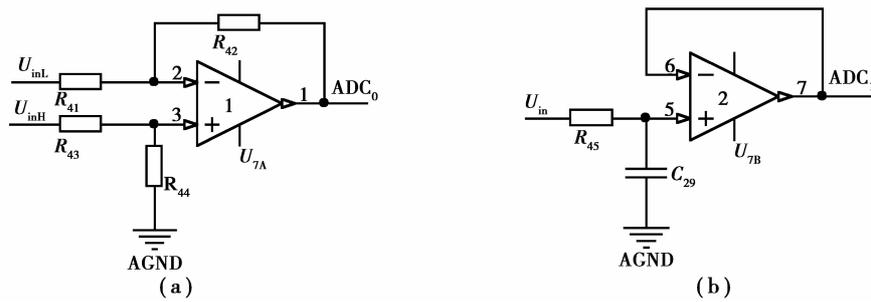


图 8 电流与电压采集电路

Fig.8 The acquisition circuit of the current and voltage

1.4 温度采集

太阳能 LED 路灯控制器应具有温度补偿功能,当环境温度升高或者降低时,实时调节充电或放电过程的相关参数以保护蓄电池。根据蓄电池的温度曲线,选择合适的温度补偿系数,有利于延长蓄电池的使用寿命。

2 软件设计

控制器包含 5 个主要功能:充电功能,采用了改进的扰动观察法实现 MPPT;放电功能,实现恒流驱动 LED 路灯;12 V/24 V 自适应;温度补偿;过流保护。

传统的扰动观测法的原理如图 9 所示,通过比较 P_k 和 P_{k-1} 来调整太阳能极板的输出电压 V_k ,实现 MPPT。具体实现过程如下,其中 $\Delta P = P_k - P_{k-1}$ [19-20]。

- ① $\Delta P > 0$, 太阳能极板处于 MPP 左侧,增大 V_k ;
- ② $\Delta P < 0$, 太阳能极板处于 MPP 右侧,减小 V_k ;
- ③ $\Delta P = 0$, 太阳能极板处于 MPP,保存 V_k 不变。

传统的扰动观测法程序流程如图 10 所示,其中 ΔU 通过调整 PWM₁ 占空比实现。

图 11 给出了改进的扰动观察法程序流程图,通过在传统的扰动观察法的基础上增加电压比较环节,用以改善传统的扰动观察法在 MPP 震荡剧烈、跟踪较慢的缺点 [19]。

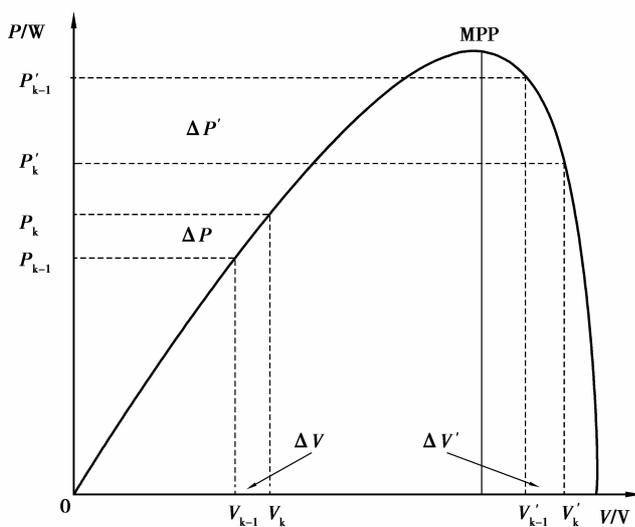


图 9 传统的扰动观测法原理图
Fig.9 The principle of the traditional disturbance observation

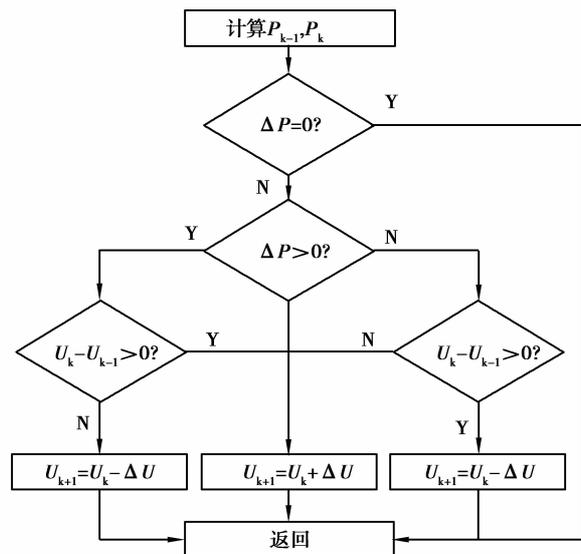


图 10 传统的扰动观察法程序流程图
Fig.10 The flow chart of the traditional disturbance observation

图 12 给出了本控制器的软件流程图,其中 24 V 系统相应的参数是 12 V 系统相应参数的两倍,图 12 主要介绍了 12 V 系统的软件流程。

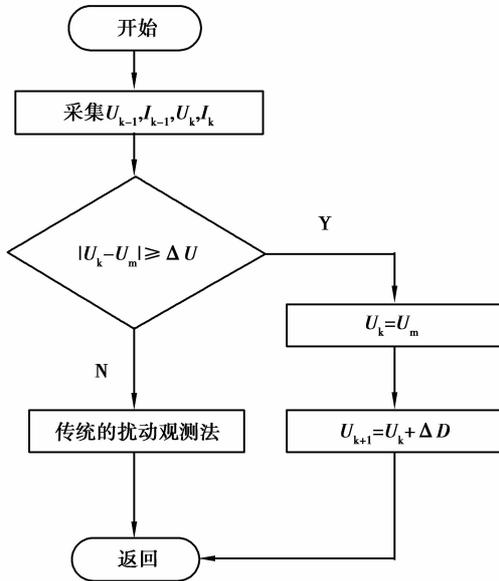


图 11 改进的扰动观察法程序流程图

Fig.11 The flow chart of the improved disturbance observation

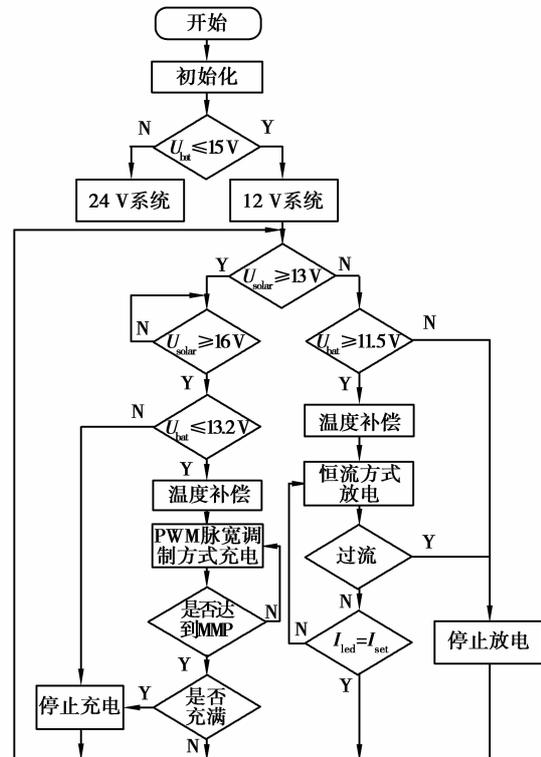


图 12 软件流程图

Fig.12 The program flow chart

3 测试实验

为测试提出的太阳能 LED 路灯控制器的性能,搭建了实验装置,配件参数如表 1 所示。提出的路灯控制器的 PWM 调制频率 $f = 36 \text{ kHz}$,充电过程测试波形如图 13 所示,示波器的 CH_1 为 PWM_1 波形, CH_2 为太阳能极板电压 U_{solar} 波形, CH_3 为给蓄电池充电的电压 U_{charge} 波形,为了更加直观的观察 U_{solar} 与 U_{charge} 之间的关系, CH_2 和 CH_3 的参考点被重合在一起。由图 13 可知, PWM_1 的调制频率为 36 kHz , U_{charge} 的波形平稳,表明主控制器通过采用改进的扰动观测法调节 PWM_1 的占空比,使得太阳能极板工作在 MPP,提高了充电效率,而且改善了传统的扰动观测法在 MPP 震荡剧烈的问题,实现了平稳、可靠的充电功能,有利于延长蓄电池的使用寿命。

放电电流精度测试所使用的 LED 路灯采用“四串一并”的结构,每个 LED 灯的功率为 1 W ,额定电压为 3 V ,改变 LED 路灯的功率,通过四位半高精度万用表测量蓄电池的放电电流 I_{led} ,获得数据如表 2 所示,其中每组数据的测量次数为 $N (N \geq 200)$,将测量数据排序后得到 $I_n (n = [1, N])$,去除最大和最小的 20 组数据,求取平均值 I_{led} , I_{led} 的计算公式如式(9)所示,精度的计算公式如式(10)所示。

表 1 配件参数

Table 1 The accessory parameters

配件	参数
太阳能极板	额定电压 $U_{\text{solar}} = 20 \text{ V}$,功率 $P_{\text{solar}} = 150 \text{ W}$
蓄电池	额定电压 $U_{\text{bat}} = 12 \text{ V}$,容量 $C = 120 \text{ Ah}$
LED 路灯	额定电压 $U_{\text{led}} = 12 \text{ V}$,功率 $P_{\text{led}} = 32 \text{ W}$

表 2 放电测试数据

Table 2 The test data of discharging

LED 路灯功率	理论电流	实际电流	精度
$P_{\text{led}} / \text{W}$	$I_{\text{set}} / \text{A}$	$I_{\text{led}} / \text{A}$	$\rho / \%$
4	0.333 3	0.341 2	2.37
12	1.000 0	1.021 3	2.13
20	1.666 7	1.704 6	2.27
28	2.333 3	2.383 1	2.13
32	2.667 0	2.718 4	1.93

$$I_{\text{led}} = \frac{\sum_{n=21}^{N-20} I_n}{N-40}, \quad (9)$$

$$\rho = \left| \frac{I_{\text{led}} - I_{\text{set}}}{I_{\text{set}}} \right| \times 100\%. \quad (10)$$

市场上的 LED 恒流驱动电源的精度为 $\pm 5\%$, 根据表 2 可知, 本控制器的电流精度低于 2.5% , 表明恒流源精度高, 有利于延长蓄电池和 LED 路灯的使用寿命。

为测试控制器的充电效率, 搭建了 10 套完整的太阳能路灯装置。通过 3 个月的测试, 其中阴雨天数占 36% , 平均每天放电时间为 9.5 h , 10 套设备全部实现了自给自足, 而某公司相同参数的 10 套设备, 有 8 套设备实现自给自足, 另 2 套设备偶尔出现欠压状态, 测试结果表明提出的路灯控制器充电效率高, 充电速度提高了 $4\% \sim 7\%$ 。

4 结 语

提出的太阳能路灯控制器, 利用一个复合式 DC-DC 变换器, 实现了蓄电池的充电和放电功能, 降低了成本。通过测试结果可知, 蓄电池充电过程, 提出的控制器通过改进传统的扰动观测法实现了 MPPT, 充电效率高, 提高了充电速度; 蓄电池放电过程, 恒流源精度高, 有利于延长蓄电池和 LED 路灯使用寿命。此外, 控制器还具有 $12 \text{ V}/24 \text{ V}$ 自适应、过流保护和温度补偿功能。

参考文献:

- [1] Wang S, Han G. Research on energy crisis and corresponding policies in Heilongjiang province[C]// Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on IEEE, 2011; 544-547.
- [2] Lin C C, Yang L S, Chang E C. Study of a DC-DC converter for solar LED street lighting[C]// Next-Generation Electronics (ISNE), 2013 IEEE International Symposium on. IEEE, 2013; 461-464.
- [3] Raza Kazmi S M, Goto H, Guo H J, et al. A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 58(1): 29-36.
- [4] 丁勇, 连大旗, 李百战, 等. 重庆地区太阳能建筑一体化应用的实测与分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(5): 76-81.
DING Yong, LIAN Daqi, LI Baizhan, et al. Experiment and analysis of integrated application of solar energy and building in Chongqing[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(5): 76-81.
- [5] Yang K, Walid A. Outage-storage tradeoff in smart grid networks with renewable energy sources[C]// Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012 International Conference on. IEEE, 2012; 517-521.
- [6] Costa M A D, Costa G H, dos Santos A S, et al. A high efficiency autonomous street lighting system based on solar energy and LEDs[C]// Power Electronics Conference, 2009. COBEP09, Brazilian. IEEE, 2009; 265-273.
- [7] 唐治德, 谢小慧, 王官涛, 等. 有源纹波补偿 Buck 型 LED 驱动电路及其小信号分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(3): 65-70.
TANG Zhide, XIE Xiaohui, WANG Guantao, et al. Small-signal analysis of the Buck circuit with active ripple compensation for LED[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(3): 65-70.
- [8] 高云. 太阳能充电控制器研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
GAO Yun. Study on Solar Charging Controller[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [9] 徐鹏威, 刘飞, 刘邦银, 等. 几种光伏系统 MPPT 方法的分析比较及改进[J]. 电力电子技术, 2007, 41(5): 3-5.
XU Pengwei, LIU Fei, LIU Bangyin, et al. Analysis, Comparison and Improvement of Several MPPT Methods for PV System[J]. Power Electronics, 2007, 41(5): 3-5.
- [10] Chim C S, Neelakantan P, Yoong H P, et al. Fuzzy logic based MPPT for photovoltaic modules influenced by solar irradiation and cell temperature[C]// Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2011 UkSim 13th International Conference on. IEEE, 2011; 376-381.

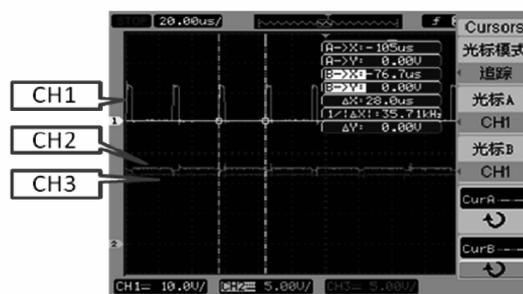


图 13 充电过程测试波形

Fig.13 The test waveform of the charging process

- [11] 艾欣, 韩晓男, 孙英云. 大型光伏电站并网特性及其低碳运行与控制技术[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 15-23.
AI Xin, HAN Xiaonan, SUN Yingyun. Grid-Connection Characteristics of Large-Scale Photovoltaic Power Station and Its Low-Carbon Operation and Control Technology[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 15-23.
- [12] Karanjkar D S, Chatterji S, Shimi S L, et al. Real time simulation and analysis of maximum power point tracking (MPPT) techniques for solar photo-voltaic system[C]// Engineering and Computational Sciences (RAECS), 2014 Recent Advances in. IEEE, 2014: 1-6.
- [13] 周维维, 杨柳. 光伏电池的最大功率跟踪以及并网逆变[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(2): 15-21.
ZHOU Luwei, YANG Liu. MPPT control of photovoltaic grid-connected system[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(2): 15-21.
- [14] 贺凡波, 赵争鸣, 袁立强. 一种基于优化算法的光伏系统 MPPT 方法[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 11-13.
HE Fangbo, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang. A MPPT Method for Photovoltaic Systems based on Optimization Algorithms[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 11-13.
- [15] 栗秋华, 周林, 刘强, 等. 光伏并网发电系统最大功率跟踪新算法及其仿真[J]. 电力自动化设备, 2009, 28(7): 21-25.
LI Qiuhua, ZHOU Lin, LIU Qiang, et al. Simulative research of MPPT for photovoltaic power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 28(7): 21-25.
- [16] Guijuan W, Zuoxun W, Yingchun Z, et al. A New Intelligent Control Terminal of Solar Street Light[C]// Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2011 International Conference on. IEEE, 2011, 1: 321-324.
- [17] Dalla Costa M A, Schuch L, Michels L, et al. Autonomous street lighting system based on solar energy and LEDs[C]// Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010: 1143-1148.
- [18] 杨素行. 模拟电子技术基础简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Suxing. Moni Dianzi Jishu Jichu Jianming Jiaocheng[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [19] 刘飞, 鲁宝春, 李昌超, 等. 改进扰动观察法的最大功率点跟踪[J]. 大功率变流技术, 2014(1): 24-27.
LIU Fei, LU Baochun, LI Changchao, et al. Maximum Power Point Tracking Based on Improved Perturbation and Observation Method[J]. High Power Converter Technology, 2014(1): 24-27.
- [20] Karanjkar D S, Chatterji S, Shimi S L, et al. Real Time Simulation And Analysis Of Maximum Power Point Tracking (Mppt) Techniques For Solar Photo-Voltaic System[J]. Engineering & Computational Sciences Recent Advances in, 2014:1-6.

(编辑 詹燕平)