

高效太阳能充电管理系统设计

朱舟¹ 易卫东¹ 余绍俊²

(1. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049; 2. 昆明学院信息技术学院 昆明 650214)

摘要: 提出了一种太阳能电池充电管理系统方案,旨在提高太阳能电池的能量利用率。设计的太阳能充电管理系统以 MSP430F2274 单片机作为主控制器,通过动态调节数字电位器 MAX5401,从而使 BQ24650 芯片的 Vmpptset 电压值(也就是太阳能电池的最大功率电压)动态变化。Vmpptset 动态变化的过程就是最大功率点追踪的过程,整个动态调整的依据是自行设计的改进扰动观察法;同时利用单片机定时器产生的 PWM 波形来控制 MOS 管组成的开关,进行能量的分配调度。通过自行设计的太阳能电池模拟器对系统功能进行验证。结果表明,太阳能最大功率追踪效率能够稳定的维持在 98% 左右;加入动态电源路径管理技术之后使系统的太阳能利用率提高了 16%,并且使铅酸电池充放电次数减少。

关键词: 最大功率追踪;改进的扰动观察法;动态电源路径管理;太阳能电池模拟器

中图分类号: TN710; TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Designing high-efficiency solar charging management system

Zhu Zhou¹ Yi Weidong¹ Yu Shaojun²

(1. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. School of Information Technology, Kunming University, Kunming 650214, China)

Abstract: A solar charging management system is put forward to improve the energy efficiency of solar panels. The solar charging management system in this paper, MSP430F2274 microcontroller is used as microprocessors, dynamically adjusts the digital potentiometer (MAX5401), causing the chip voltage (Vmpptset) of the BQ24650 (ie solar maximum power voltage) dynamically changes. The dynamic adjustment process is the process of maximum power point tracking (MPPT). An improved perturbation observation is used as the MPPT Algorithm. Dynamic Power-Path Management based on the PWM technique is used to dynamically allocate the energy between the photovoltaic panel and the lead-acid battery, which improves the energy efficiency of the system. A solar simulator is designed to carry out experiments, the results show that the MPPT efficiency is at around 98%, after adding the dynamic power path management technology the energy efficiency of solar panels increases by 16%. The times of the charge and the discharge of the lead-acid battery is reduced.

Keywords: improved perturbation observation algorithm; maximum power point tracking(MPPT); dynamic power path management(DPPM); solar array simulator

1 引言

工作在野外的电子设备,通常部署在地理位置偏远的地区或者污染环境,电池的更换极其不容易。因此,保证电子设备的长时间稳定运行,具有极大的挑战性^[1]。利用太阳能则可以解决设备的能量来源问题。

为了高效利用太阳能电池的输出功率,需要最大功率追踪(maximum power point tracker, MPPT)技术。已经有很多最大功率追踪技术应用到太阳能电池上^[2-3],有一些实现简单但

是效率低的方法,比如比例开路电压法和比例短路电流法^[4],它们满足最大功率点的电压或电流与太阳能电池的开路电压或短路电流成一个固定的比例关系并且独立于外界环境。这两种方法都要预先设置太阳能电池的电压或者电流,无法在外界环境变化时获得较高的最大功率追踪效率。

还有一些 MPPT 策略采用智能计算的方法例如人工神经网络^[5]和模糊逻辑^[6]等。但是这些方法计算负担大和实施成本高,不适合应用到以低功耗单片机为主控制器的嵌入式系统中。

爬山法^[7]、电导增量法、扰动观察法是一类实施简单的 MPPT 算法,能够以较低的计算代价获得较高的最大功率追踪效率,而且不需要太阳能电池的详细模型等信息,正因为此,这类 MPPT 算法成为占据主导地位的 MPPT 算法^[8]。然而这类算法存在一些类似的问题:一是稳定期追踪效率的损失^[9-10];二是不能快速识别外界环境的变化并进行追踪^[11-14];如图 1 所示, V_{mpp} 是太阳能电池最大功率点电压, V_{pv} 代表太阳能电池电压。传统的标准扰动观察法存在固有的问题:一是在太阳能电池输出稳定状态时追踪电压的振荡,引起能量损失;二是当光照度急变化时,不能做出准确的追踪决策。

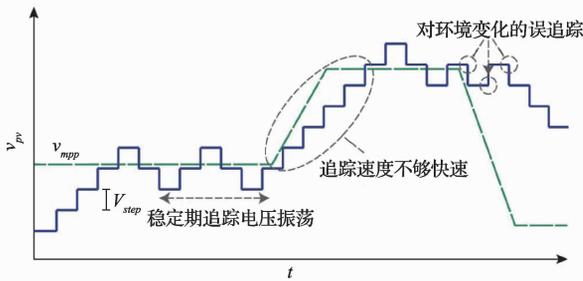


图1 标准扰动观察法存在的问题:稳定期的振荡、错误追踪步调、光照变化时的决策混乱^[15]

本文采用改进的扰动观察算法:

- 1) 设定空闲状态操作,消除不必要的追踪波动;
- 2) 调节 MPPT 实施过程中的追踪电压变化步调 (V_{step}),提高追踪速度,减少偏差;
- 3) 设定阈值区间,确定最大功率点的有效电压范围,防止误追踪。

太阳能电池的输出能量在该设计的充电管理系统中具有两个流向,一是充入铅酸电池作为储备;二是供向耗能负载。如果对获取的太阳能不进行路径管理,将不能充分利用获取的太阳能,造成能量的浪费,导致工作在野外的电子设备能量供应不足,甚至宕机^[16]。于是充电系统采用了基于 PWM 的动态电源路径管理技术 (dynamic power path management, DPPM),把太阳能电池输出的电能充入铅酸电池和供向负载之间进行动态调度。该调度算法以最大化利用太阳能电池的输出功率为准则,能够提高铅酸电池的能量储备率。

2 太阳能电池特性的数学描述

太阳能电池由若干基本单元 (cell) 串并联组成,这些基本单元是一种能够把太阳光的辐射能量转换为电能的半导体器件。光伏电池输出特性可描述为^[17]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I_{ph} 是光生电流; R_{sh} 为等效并联电阻,形成的原因主

要是漏电流所对应的 P-N 结漏泄电阻; R_s 为等效串联电阻,主要由电池的体电阻、表面电阻、电极导体电阻和电极与硅表面接触电阻形成; I 、 V 是太阳能电池的输出电流和电压, I_0 为 P-N 结反向饱和电流; A 为 P-N 结曲线参数; T 为绝对温度, K 为玻尔兹曼常数。

太阳能电池的输出特性曲线如图 2 所示,其中 I_m 是最大功率点处的电流, V_m 是最大功率点处的电压, I_{sc} 是太阳能电池的短路电流, V_{oc} 是太阳能电池的开路电压。太阳能电池的输出功率等于输出电压和电流的乘积,从图 2 中的太阳能电池的 V - I 曲线可以计算出其 P - V 曲线,功率曲线上存在一个最大值点,既是太阳能电池的最大输出功率,也是 MPPT 算法需要追踪的点。

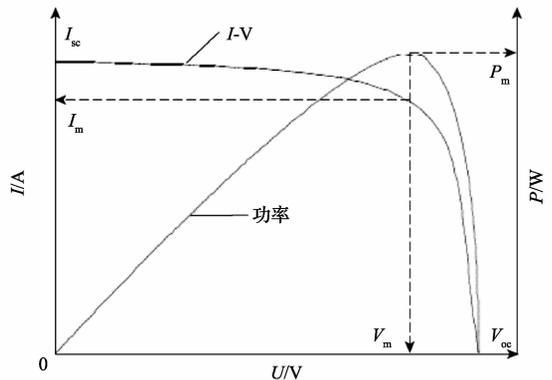


图2 光伏阵列 I - V 、 P - V 特性曲线

3 太阳能电池充电管理系统设计

本文设计实现的太阳能充电管理系统的整体架构如图 3 所示,太阳能电池输出的电能经过 MPPT 算法进行追踪,然后利用动态电源路径管理技术在铅酸电池和系统负载之间进行动态调度。系统采用 MSP430F2274 作为主控制器,MPPT 控制算法和动态电源路径管理算法运行在其上。6 V、12 Ah 的铅酸电池是系统的能量储备单元。系统采用 BQ24650 作为充电管理芯片。BQ24650 是 TI 公司出品的一款同步开关模式充电控制器,BQ24650 对电池充电包括 3 个阶段:预充电阶段、恒流充电阶段、恒压充电阶段。预充电的时间为 30 min,预充电阶段的电流大小为恒流充电阶段充电电流的 1/10,恒流充电电流可以通过外接电阻进行设定。

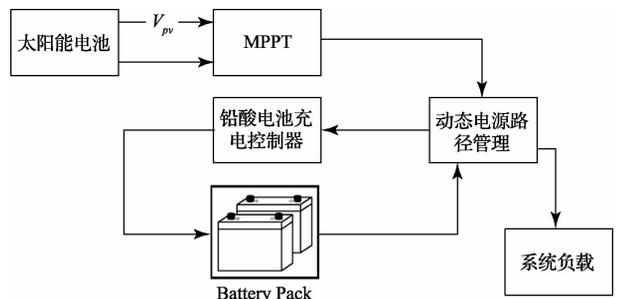


图3 太阳能充电管理系统架构

3.1 太阳能电池充电管理系统硬件设计

太阳能电池充电管理系统的电路原理如图 4 所示。利用 MSP430F2274 单片机内部的 4 路 ADC 通道分别测量太阳能电池板的电压 (V_{solar})、太阳能电池板的输出电流 (I_{solar})、铅酸电池的电压 (V_{bat})、负载电流 (I_{load})。单片机每 10 ms 采集一次电压和电流数据,然后执行本文提出的改进的扰动观察算法,利用普通 I/O 口模拟 SPI 总线信号控制 MAX5401 调节太阳能电池板的输出电压,从而控制太阳能电池最大功率电压。其中供向负载的电压设定为 3.9 V,采用 MPS1492 作为开关降压芯

片。根据图 4 所示,太阳能电池板的最大功率点电压 ($V_{mpptset}$) 满足关系式(2):

$$V_{mpptset} = \frac{R + R_x}{R_x} V_{chip} \quad (2)$$

式中: R 是分压电阻, $V_{chip} = 1.2 \text{ V}$ 是 BQ24650 的内部电压, R_x 是 MAX5401 的电阻值,MAX5401 的可调电阻范围 $0 \sim 100 \text{ k}\Omega$,256 级调节。系统采用 MSP430F2272 的内部时钟 TA 产生的 PWM 波形控制图 4 中开关 S1、S2、S3,完成电源路径管理,其中开关由 MOS 管组成。

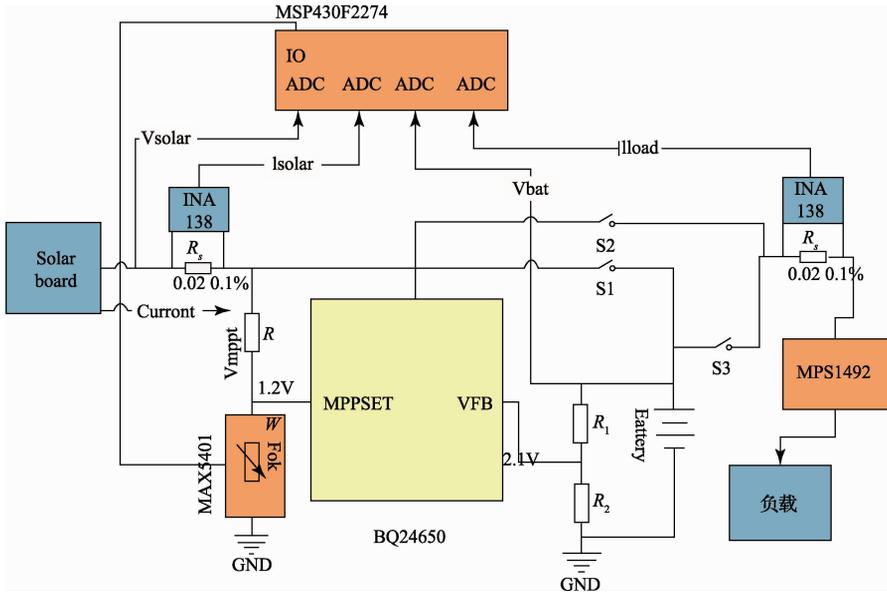


图 4 高效太阳能铅酸电池系统电路

3.2 太阳能电池充电管理系统软件设计

系统的软件主要是改进的扰动观察算法和动态电源路径管理算法两个模块的程序设计。

3.2.1 改进的扰动观察法

如图 5 所示,传统的扰动观察法 (the basic P&O MPPT algorithm) 扫描太阳能电池的 I/V 曲线^[14],通过不断改变工作的电压或者电流,然后测量改变后的功率 P 并计算功率的变化值 (ΔP),改变工作电压或者电流的过程称为扰动。如果 ΔP 大于零,那么一个新的扰动在同一引入方向,如果 ΔP 小于零,则改变扰动的方向。扰动观察法 (P&O),直到已找到一个这样的工作点——得 ΔP 小于在任何方向上的零,这种情况被称为稳定状态。为了检测最大功率点的变化,扰动观察法需要每隔一段时间扰动一次。其中 V_{pv} 是太阳能电池电压, I_{pv} 是太阳能电池电流。 V_{last} 、 I_{last} 分别是上一次的功率值和电流值。

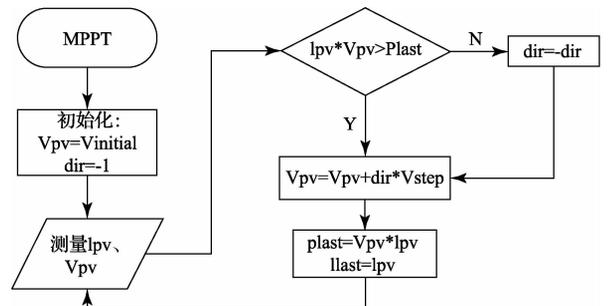


图 5 传统扰动观察法算法流程

以上是传统扰动观察法的描述,传统扰动观察法在稳定状态时会出现最大功率点追踪电压的振荡,而且不能对光照度的急剧变化做出快速反应。为了改善传统扰动观察法存在的问题。本系统采用改进的扰动观察法,算法的具体流程如图 6 所示。

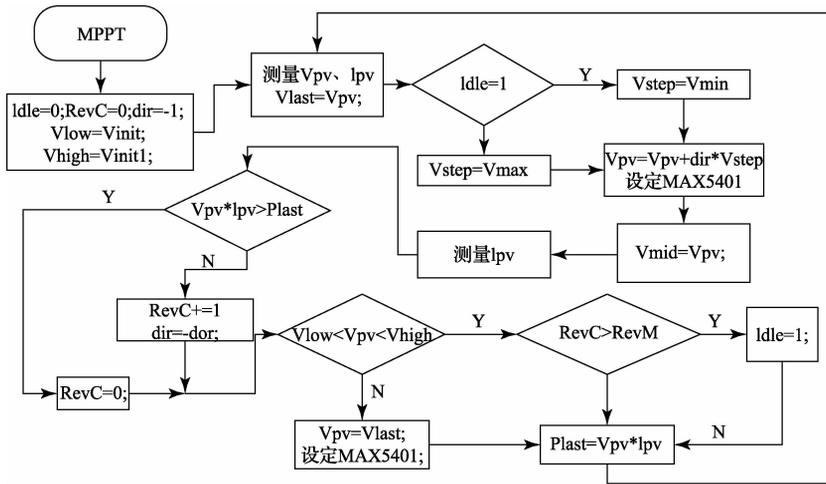


图6 改进的扰动观察法算法流程

1) 执行初始化工作,通过设定数字线性电位器 MAX5401 数值,得到一个太阳能电池输出电压 V_{pv} 的初始值。

2) 初始化变量 I_{dle} (标示是否处于稳定状态)、 dir (记录扰动的方向)、 V_{low} (太阳能电池电压的历史最小值)、 V_{high} (太阳能电池电压的历史最大值)、 $R_{ev}C$ (记录扰动方向的变化次数) 的数值。

如果 $I_{dle} = 1$, 则处于稳定状态, 电压调整步调 $V_{step} = V_{min}$, 如果 $I_{dle} = 0$, 则此时处于追踪阶段, 则 $V_{step} = V_{max}$ 。得到调整步调之后施加一次电压调整, 设定一次 MAX5401 的阻值。单片机 A/D 采样太阳能电池电压 V_{pv} 和太阳能电池电流 I_{pv} , 计算当前太阳能电池板的输出功率。如果当前功率大于上次功率 P_{last} 则把记录扰动方向的变量 $R_{ev}C$ 置零, 如果当前功率小于 P_{last} , 则改变扰动方向, $R_{ev}C$ 加 1。接着算法判断此时的太阳能电池电压 V_{pv} 是否在利用太阳能电池模拟器 (具体原理见实验部分) 测试各种极端条件得出的 V_{low} 、 V_{high} 范围内, 如果不在此范围内, 此次动作无效。当 $R_{ev}C$ 变量的值递增到一定次数 $R_{ev}M$, 系统进入稳定状态。

程序循环执行, 持续追踪太阳能电池最大功率点。

3.2.2 系统动态电源路径管理算法

太阳能电池输出的能量在本文的充电管理系统中具有两个流向: 一是充入铅酸电池作为储备; 二是供向耗能负载。铅酸电池的电压和太阳能电池板的输出电压是动态变化的。为了保证系统有最长的工作时间, 需要保证满足以下的条件 ($I(s)$ 是从太阳能电池获得的最大最大功率点处的电流值, $I(o)$ 为系统负载需要的供电电流): 当太阳光充足的时候, 本文设计的系统满足 $I(s) > I(o)$, 太阳能电池直接向负载供电, 然后剩余的能量充入电池储存。系统能量分配利用的准则是最大化利用从太阳能电池输出的功率, 要求满足式 (3), 其中 P_{supply} 是负载消耗功率、 P_{bat} 是充入铅酸电池功率、 P_{solar} 是太阳能电池输出功率。

$$\delta = \max\left(\frac{P_{supply} + P_{bat}}{P_{solar}}\right) \quad (3)$$

当太阳光不足的时候, 太阳能电池板的全部能量供向负载, 不足的部分通过铅酸电池补充。

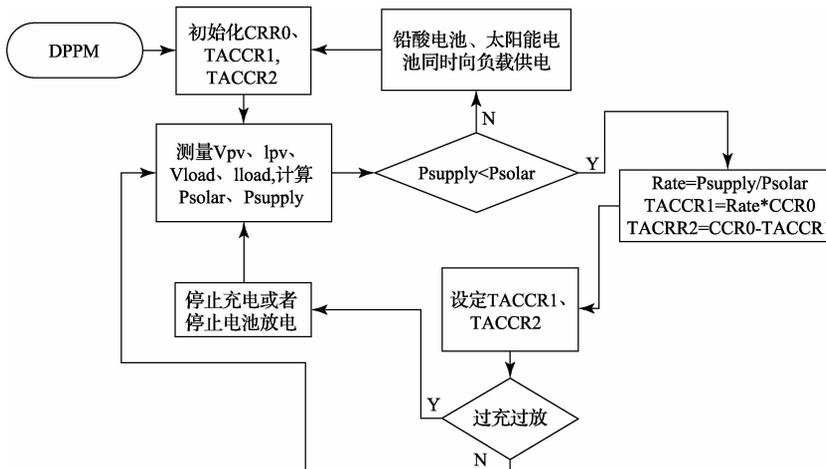


图7 动态电源路径管理算法流程

电源路径管理算法是通过 MSP430 调节内部时钟的占空比来实现,具体流程如图 7 所示。首先初始化 TACCR1、TACCR2、CRR0,然后分别测量电压和电流计算 P_{supply} 、 P_{solar} ,在满足 $P_{supply} < P_{solar}$ 时,计算 $P_{supply}/P_{solar} = \eta$ 作为两路 PWM 输出占空比分配系数,通过公式(4)~(7)得到:

$$\eta = \frac{P_{supply}}{P_{solar}} \quad (4)$$

$$CCR0 = 120 \quad (5)$$

$$TACCR2 = \eta * CRR0 \quad (6)$$

$$TACCR1 = (1 - \eta) * CRR0 \quad (7)$$

TACCR1、TACCR2 的数值。如果 $P_{supply} \geq P_{solar}$,则太阳能电池直接向负载供电,不足的部分由铅酸电池补充。在动态路径管理的过程监测电池电压,避免电池的过冲过放,以延长电池的使用寿命。MSP430 的定时器不仅可以完成精确定时,还能产生 PWM 波形输出。本设计利用 MSP430 的 TA 时钟产生 PWM 波形,TA 有 3 个模块,CCR0、CRR1、CCR2,可以输出完整的 2 路 PWM 波形。CCR0 用作 TA 增计数模式的周期寄存器,当单片机的计数器 TAR 增计数到 CCR0 的值时,定时器 TA 复位并从 0 开始重新计数。设计中设定 TA 的时钟为 12 MHz,因此 PWM 的频率为 12 MHz/120 为 100 kHz。

4 实验及测试结果

4.1 太阳能电池模拟器

利用太阳对太阳能电池系统进行现场测试验证,难以对各种环境条件下系统的运行状况都进行验证。太阳能

电池模拟器可以模拟出各种环境条件下太阳能电池的输出特性。因此,为了验证最大功率追踪算法的准确性和效率,自行设计了太阳能电池模拟器。其架构如图 8 所示。

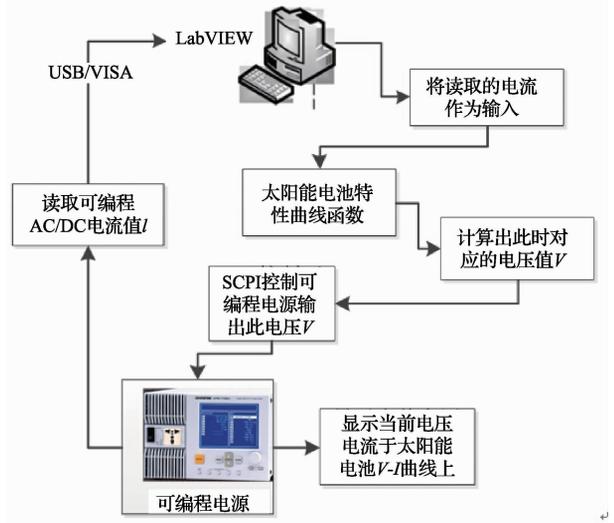


图 8 太阳能电池模拟器结构及架构

PC 利用 USB 接口和固纬可编程数字电源 APS-1102 连接,通过 VISA 进行通信^[18]。PC 端 LabVIEW 首先通过 VISA 读取可编程电源的电流 I ,将电流 I 作为输入参数输入太阳能电池的 $V-I$ 特性函数,得到电压 V 。然后 PC 端 LabVIEW 通过 SCPI 指令控制 APS-1102 的输出模式和输出电压值。最终的 LabVIEW 界面如图 9 所示。

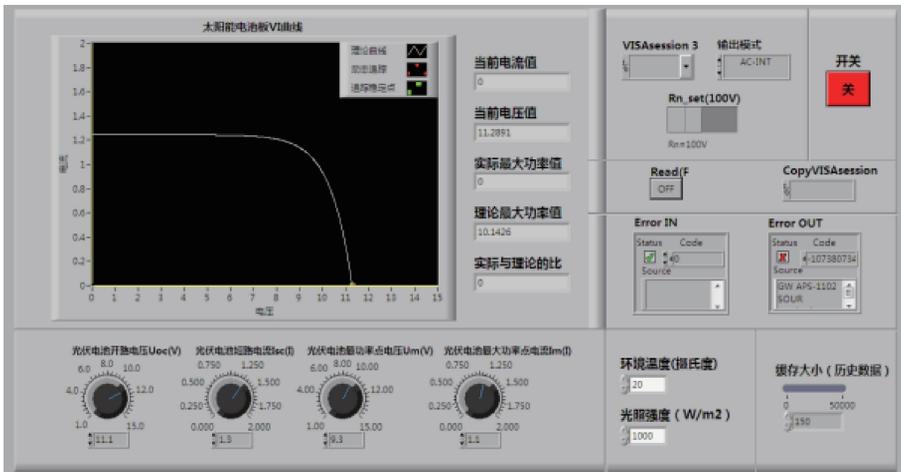


图 9 太阳能阵列模拟器界面

4.2 实验结果

为了验证太阳能电池充电管理系统最大功率追踪的

效率和动态电源路径管理的效果。搭建了模拟实验环境,实验平台结构如图 10 所示。

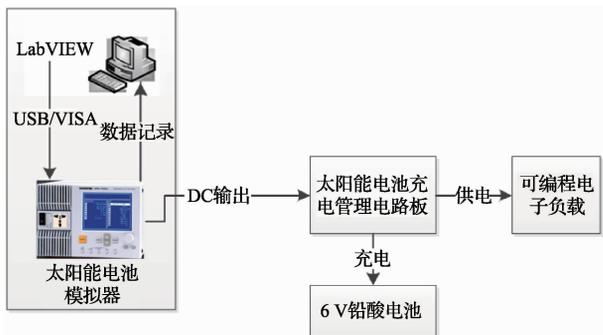


图10 太阳能电池充电管理系统模拟实验平台架构

连接太阳能电池模拟器和太阳能电池充电管理电路板,该电路板分别连接铅酸电池和可编程电子负载(固纬PEL-300)。由于实验使用的太阳能电池的特性参数为:开路电压为10.8V,短路电流为1.22A,在标准测试环境(温度25℃, $E=1000\text{ W/m}^2$, $A_m=1.5$)下的最大功率点电压为9V,最大功率点电流为1.11A,因此太阳能电池模拟器的特性参数也设定成这样。然后调节太阳能电池模拟器的环境温度和光照强度参数,使太阳能电池模拟器产生不同环境下的输出。在光照度为 1000 W/m^2 ,温度为25℃时太阳能最大功率追踪结果如图11所示。

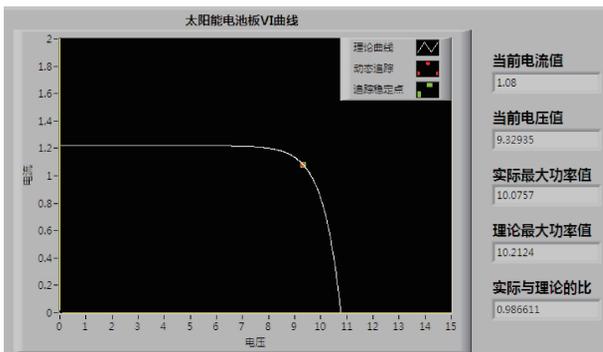


图11 1000 W/m^2 , 25℃时追踪结果

可见最大功率追踪的效率为98.7%。接着测试在光照度为 1000 W/m^2 不同温度下追踪的效率,如图12是温度分别为5℃和45℃时的效率,分别为98.8%、99.7%。

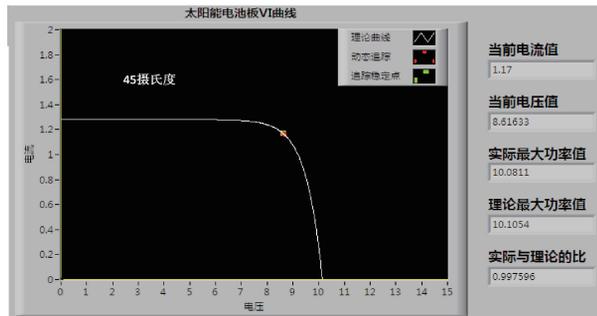
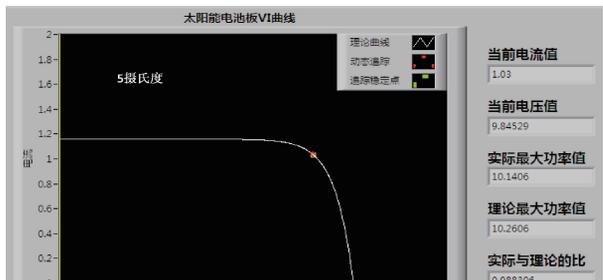


图12 1000 W/m^2 温度为5℃和45℃的追踪结果

然后测试温度为25℃度时不同光照度下的追踪效率,图13是光照度分别为 600 W/m^2 和 1200 W/m^2 时的追踪效率,效率分别为98%和99.6%。记录光照度为 1000 W/m^2 ,不同温度下的太阳能电池最大功率点追踪效率可以得到实验结果如图14所示。

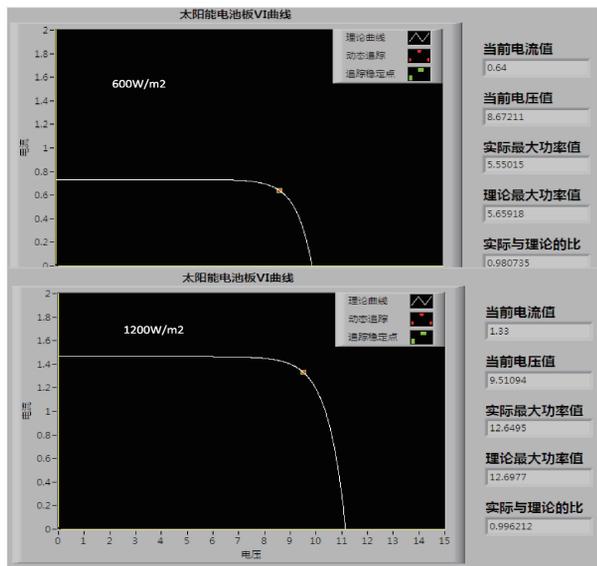


图13 温度为25℃,光照度为 600 W/m^2 和 1200 W/m^2 的追踪结果

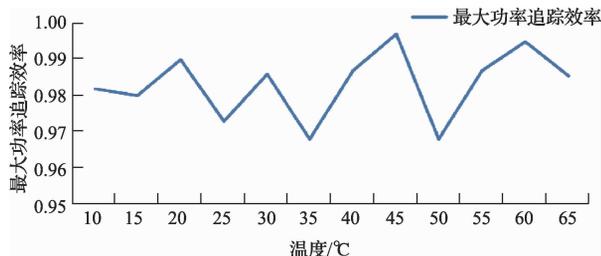


图14 光照度为 1000 W/m^2 不同温度下的效率

记录温度为 25℃,不同光照度下的最大功率点追踪效率,如图 15 所示。

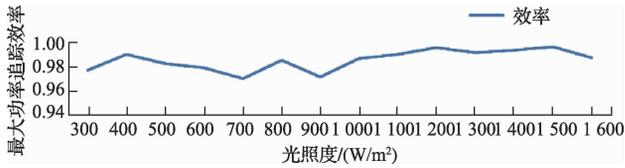


图 15 温度为 25℃,不同光照度下的效率

可见改进的扰动观察法能很好的适应环境变化,追踪效率能比较稳定的维持在 98%左右。而且实验过程中环境变化时不出现误追踪的情况,而且如图 11、图 12、图 13 所示图中曲线上最大功率显示只有一个点,说明在稳定状态不存在追踪的振荡。图 16 是传统扰动观察法追踪的效果,由图可见传统扰动观察法存在误动作和稳定期追踪电压的振荡。

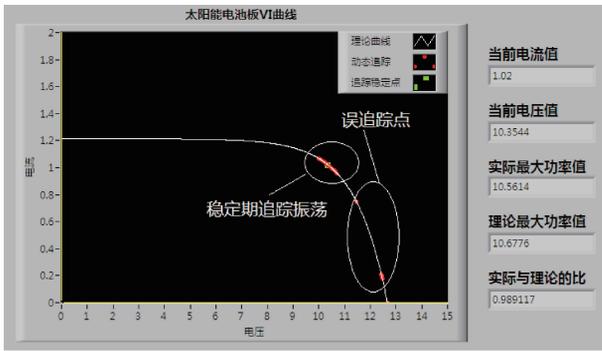


图 16 传统扰动观察法最大功率追踪效果

为了验证系统的实际工作效果,进行了实测对比实验。接上太阳能电池板(开路电压为 10.8 V,短路电流为 1.22 A,在标准测试环境下的最大功率点电压为 9 V,最大功率点电流为 1.11 A),利用 GPRS 将测量数据传回远端服务器,每隔 7 s 记录一次太阳能电池电压 V_{solar} 、电流 I_{solar} ,铅酸电池电压 V_{bat} 、电流 I_{bat} ,和负载的电压 V_{supply} 、电流 I_{supply} 。如图 17,是 2015 年 2 月 6 日 8:00~17:00,室外温度为 3℃时,利用传回的数据计算得到的太阳能的转换效率。

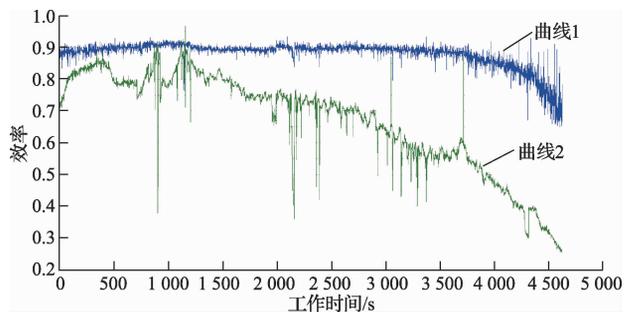


图 17 系统的整体转换效率

曲线 1 是利用了本文提出的动态电源路径管理技术得到的太阳能的转换效率,在阳光充足时基本维持在 88%左右,在阳光不充足时,由于主要是铅酸电池供电,太阳能的转换效率很低。曲线 2 是没有使用动态电源路径管理技术得到的太阳能的转换效率,可见,效率比利用动态路径管理要低 16%左右。这是由于太阳能电池板输出的能量不进行动态路径管理,直接冲入电池然后向负载放电。这其中铅酸电池充电和放电阶段的能量损失,还有充电芯片(BQ24650)不同充电阶段充电电流不同,使太阳能的输出电流不是最大功率点时的电流。在恒压充电阶段,电流下降很快,此时太阳能的利用效率急剧下降,如图 17 中的曲线 2 所示。

5 结 论

设计的太阳能电池充电管理系统采用改进的扰动观察法作为最大功率追踪的算法,能够保证较高的太阳能电池最大功率追踪效率。系统采用动态电源路径管理(DPPM)技术进行能量分配和调度,能够显著提高太阳能电池能量利用率和铅酸电池的电能储备量。对于工作在野外的设备提供了优良的电能供给方案。

参考文献

- [1] PANTAZIS N A, VERGADOS D J, VERGADOS D D. Increasing intelligent wireless sensor networks survivability by applying energy-efficient schemes [M]. Artificial Intelligence Applications and Innovations. Springer US, 2006: 657-664.
- [2] 韦世宽,雷加,谈恩民,等. 光伏系统最大功率点跟踪技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(6): 490-494.
- [3] DE BRITO M A G, GALOTTO JR L, SAMPAIO L P, et al. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 1156-1167.
- [4] SUBUDHI B, PRADHAN R. A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems[J]. IEEE transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 89-98.
- [5] ELOBAID L M, ABDELSALAM A K, ZAKZOUK E E. Artificial neural network based maximum power point tracking technique for PV systems[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2012: 937-942.
- [6] ALAJMI B N, AHMED K H, FINNEY S J, et al. A maximum power point tracking technique for partially shaded photovoltaic systems in microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1596-1606.

- [7] 崔畅, 赵强. PSMG 风力发电系统 MPPT 优化控制策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(5): 60-63.
- [8] PETRONE G, SPAGNUOLO G, TEODORESCU R, et al. Reliability issues in photovoltaic power processing systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2569-2580.
- [9] SULLIVAN C R, AWERBUCH J J, LATHAM A M. Decrease in photovoltaic power output from ripple: Simple general calculation and the effect of partial shading [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(2): 740-747.
- [10] FARANDA R, LEVA S, MAUGERI V. MPPT techniques for PV systems: energetic and cost comparison[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. IEEE, 2008: 1-6.
- [11] ELGENDY M, ZAHAWI B, ATKINSON D J. Assessment of the incremental conductance maximum power point tracking algorithm [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 108-117.
- [12] ELGENDY M, ZAHAWI B, ATKINSON D J. Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 21-33.
- [13] KJAER S B. Evaluation of the "hill climbing" and the "incremental conductance" maximum power point trackers for photovoltaic power systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 922-929.
- [14] BERRERA M, DOLARA A, FARANDA R, et al. Experimental test of seven widely-adopted MPPT algorithms[C]//PowerTech, 2009 IEEE Bucharest. IEEE, 2009: 1-8.
- [15] PAZ F, ORDONEZ M. Zero-oscillation adaptive-step solar maximum power point tracking for rapid irradiance tracking and steady-state losses minimization [C]//2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2013: 1-6.
- [16] 张静静, 赵泽, 陈海明, 等. EasiSolar: 一种高效的太阳能传感器网络节点系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 1952-1960.
- [17] 苏建徽, 余世杰. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- [18] 田雷, 郑敏信. 基于 LabVIEW 的光伏储能控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12): 53-36.

作者简介

朱舟, 1988 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail: zhuzhou_dz@163.com

易卫东, 教授, 博士生导师, 中科院“百人计划”入选者。美国布朗大学硕士, 伯克利加州大学(UC Berkeley)博士。主要研究方向为无线传感器网络及其相关应用, 信号处理。