

独立光伏系统充放电控制器的研究与设计

陈亚欢, 罗晓曙, 廖志贤, 黎璋霞

(广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 设计了一种基于 STM32 微处理器和 Buck 电路的光伏控制器, 并提出了一种改进型变步长扰动观察法来提高光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 性能, 同时实现了蓄电池的合理充放电及过放保护; 样机实验结果表明: 该光伏控制器能在 0.01 s 的时间内克服扰动, 并且 MPPT 的效率达到了 99.94%, 该光伏控制器具有快速的动态响应和良好的稳态性能, 并能很好地监测蓄电池的状态, 减少电池损耗, 延长蓄电池寿命。

关键词: 太阳能控制器; 最大功率点跟踪; STM32; 扰动观察法 (P&O)

Study and Design of Solar Controller System for a Standalone Photovoltaic System

Chen Yahuan, Luo Xiaoshu, Liao Zhixian, Li Zhangxia

(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: A solar controller was designed based on STM32 microcontroller and Buck converter. And a modified Perturb and Observer (P&O) method with variable step size was presented to improve Maximum Power Point Tracking (MPPT) performance of photovoltaic (PV) systems. At the same time, a reasonable management for charging and discharging had also been implemented on the solar controller with discharge protection. The results of sample experiments show that the solar controller can overcome the disturbance within 0.01 second, and the MPPT efficiency can reach to 99.94 percent, and it has rapid dynamic response and excellent tracking effectiveness. And it also can evaluate state of battery and reduce the charged wastage, and prolong the life of battery.

Key words: solar controller; MPPT; STM32; P&O

0 引言

随着世界能源的不断枯竭和环境的污染, 人类越来越重视对“绿色新能源”的探索和研究。太阳能取之不尽, 用之不竭, 可再生并清洁环保; 太阳能发电具有无燃烧过程、无排放、无机械磨损、无噪声、维护成本低等优势, 使之成为近几十年来在新能源领域研究的焦点^[1-2]。太阳能电池转换效率低, 光伏发电系统使用成本较高是制约太阳能光伏发电得以广泛应用的主要因素。其中, 光伏发电系统的最大功率点跟踪 (MPPT, Maximum Power Point Tracking) 控制方法是提高太阳能电池转换效率的有效途径。

本文针对太阳能电池的特性, 发展出一种改进型变步长扰动观察法来实现最大功率点跟踪并通过充放电算法实现蓄电池合理充电的算法。最后设计制作了光伏控制器, 控制器采用高性价比的微处理器 STM32F103VE 芯片, 该芯片具有高性能的 ARM Cortex-M3 32 位的 RISC 内核, 控制器以该芯片为核心来实现最大功率点跟踪和充放电控制, 提高了 MPPT 的稳定性和光伏组件的利用效率, 延长了蓄电池的使用寿命。

1 光伏电池的等效电路和输出特性

光伏电池实际上是一个大面积的半导体 PN 结, 其工作可

收稿日期: 2013-08-21; 修回日期: 2013-10-20。

基金项目: 国家自然科学基金(11262004); 广西研究生教育创新计划资助项目(YCSZ2012061); 广西科学研究与技术开发计划(桂科攻1348017-2)。

作者简介: 陈亚欢(1988-), 男, 湖南攸县人, 硕士研究生, 主要从事光伏并网发电理论与应用方向的研究。

罗晓曙(1961-), 男, 湖北应城人, 教授, 博士, 主要从事非线性电路理论、非线性系统控制及自动化控制方向的研究。

以用图 1 的二极管等效电路来描述^[3]。光伏电池的输出特性方程为:

$$I_L = I_{sc} - I_{D0} \left\{ \exp \left[\frac{q(U_L + I_L R_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{U_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, I_L 、 U_L 分别为光伏电池的输出电流和输出电压, R_s 为电池的串联等效电阻, R_{sh} 为并联等效电阻, I_{sc} 为光电流, I_{D0} 为光伏电池在无光照时的饱和电流, K 为玻尔兹曼常数, A 为电池板特性常数, T 为光伏电池的表面温度, q 为电子电荷。

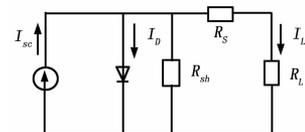


图 1 光伏电池等效电路

在恒温、日照均匀条件下, 光伏电池的 P-V 曲线中存在唯一的最大功率点 (MPP), 光伏阵列在这一点效率最高, 并以最大功率输出。光伏电池输出电流与光照强度成线性比例关系; 光伏电池输出电压与温度成线性比例关系。即光照影响电流, 温度影响电压^[4]。一般情况下, 光伏电池并没有工作在最大功率点, 因此输出效率也很低。为了克服这一问题, 就需要使用光伏电池最大功率点跟踪 (MPPT), MPPT 技术的实施最重要的是找到合适的 MPPT 算法, 有效地跟踪最大功率点, 使光伏电池以最大功率输出。

2 光伏控制器系统设计

控制器主体设计框图如图 2 所示。

本文采用 STM32 作为核心控制单元, 充分利用了该单片机的高速、高精度及指令丰富等优越性能, 有效地提高了实现 MPPT 算法的稳定可靠性和方便灵活性。文中 DC/DC 变换电

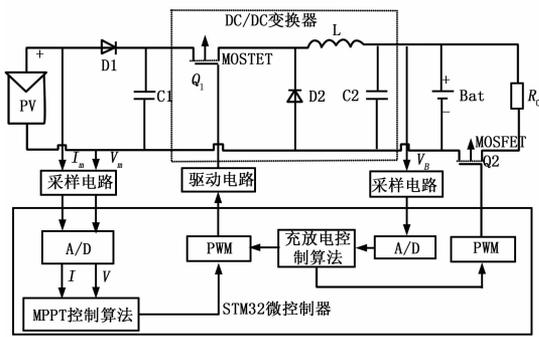


图 2 光伏控制器设计框图

路采用的是 Buck 变换器, Buck 变换器属于串联型开关变换器, 又称降压变换器。在光伏电池和蓄电池之间串联一个 Buck 电路, 通过控制 Buck 变换器来实现 MPPT。即通过改变控制功率开关管 Q1 的 PWM 信号导通占空比来调节 Buck 变换器的等效电阻, 使等效电阻始终和光伏电池内阻相等, 就可以使光伏电池获得最大功率输出实现 MPPT^[3]。电路中采用肖特基二极管 D1 作为防反充二极管, 防止晚上蓄电池向光伏电池反向充电; 采样电路中采用电流霍尔传感器采样光伏电池输出电流 I_m , 采用电阻分压电路采样电压值 V_m 、 V_B 。

3 MPPT 控制算法原理

由于具备了结构简单和参数较少的优点, 扰动观察法是目前应用最广泛的光伏发电最大功率跟踪方法。扰动观察法实际上采用了步进搜索的思路, 即将当前的功率与前一时刻的功率进行比较, 如果当前的功率大于前一时刻的功率, 说明寻找的方向是正确的; 如果当前的功率小于前一时刻的功率, 则说明方向错误, 应改变寻找的方向, 如此反复寻找和比较, 直到找到最大功率点, 从而实现自寻最优控制。但是扰动观察法在外界条件变化较快的情况下会出现误判, 从而偏离最大功率点。并且当到达最大功率点附近时, 会出现振荡现象, 导致功率损失^[5]。

为了解决上述问题, 本文提出了一种改进型的变步长扰动观察法, 如图 3 所示。由图可知, 当采样周期较小时, 输出电压变化量 ΔV 很小, 实际系统中用 $\frac{\Delta P(k)}{\Delta V(k)}$ 近似代替 $\frac{dP(k)}{dV}(k)$ 。功率系数 P_r 定义为光伏组件各点输出功率变化量与输出电压变化量的比值的绝对值, 即 $P_r = \left| \frac{\Delta P}{\Delta V} \right|$ 。当功率系数 $P_r > P_{th}$ 时, 说明系统工作点离 MPP 较远, 系统以较大步长 V_{step1} 跟踪 MPP; 当功率系数 $P_r \leq P_{th}$ 时, 则说明系统工作点越来越接近 MPP, 此时系统以较小步长 V_{step2} 跟踪 MPP。这样就可以有效地抑制系统在 MPP 处的振荡, 提高系统的稳定性。当 $\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$ 时, 说明系统工作在最大功率点, 则直接返回; 当 $\frac{\Delta P(k)}{\Delta V(k)} > 0$ 时, 说明系统工作在最大功率点左边, 此时符号系数 $K = 1$, 系统保持增大参考电压的扰动方式; 当 $\frac{\Delta P(k)}{\Delta V(k)} < 0$ 时, 说明系统工作在最大功率点右边, 此时符号系数 $k = -1$, 系统保持减小参考电压的扰动方式。

其中: V_{step1} 、 V_{step2} 为固定步长变化量, 且为定值; P_{th} 表示功率系数阈值, 是一个重要的调整参数, 其值也是决定系统能否较灵活地跟踪到光伏电池最大功率点输出和适应天气突变情

况的关键。由图 4 可知: P_{th} 由 (2) 式给出:

$$P_{th} = \tan\theta = \frac{\Delta P'}{V_{sep1}} \quad (2)$$

式 (2) 中, θ 定义为阈值角; 通过 $V_{MPP} \pm V_{sep1}$ 分别得到 V_1 、 V_2 , 从而得到 V_1 、 V_2 对应的功率 P_1 、 P_2 ; $\Delta P'$ 由 (3) 式给出:

$$\Delta P' = P_{MPP} - P_1 = P_{MPP} - P_2 \quad (3)$$

由于光伏电池输出电流 I_m 和光照强度成线性比例关系, 而 $\Delta P'$ 又和 I_m 线性比例关系, V_{sep1} 为定值。由式 (2) 可知, 阈值角的正切值 $\tan\theta$, 即功率系数阈值 P_{th} 和 I_m 成线性比例关系, 故 P_{th} 的值随着光照强度的变化而在线自动调整, 从而使系统可以自适应天气突变的情况。

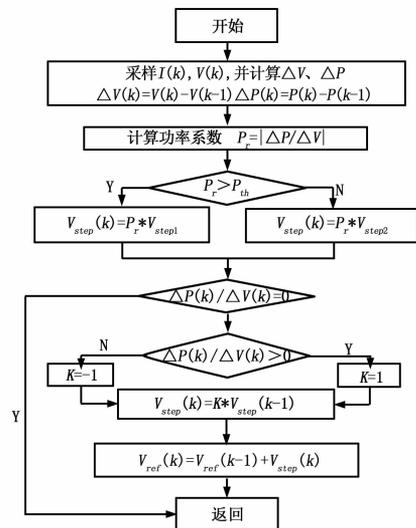


图 3 改进型 P&O 算法框图

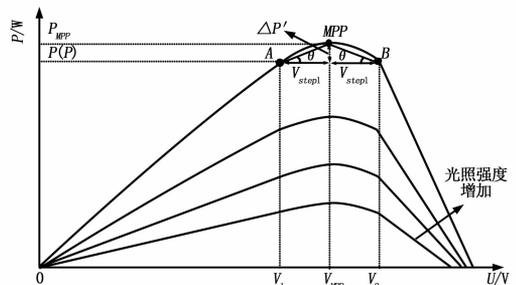


图 4 不同光照强度下光伏特性曲线

4 充放电控制原理

为了控制蓄电池能以合理的方式充放电, 本文利用 STM32 作为控制核心, 设计了一种可靠、高效的太阳能控制器。根据蓄电池的充放电特性可知, 蓄电池在充电初期电压快速上升; 中期电压缓慢上升, 并且延续时间较长; 末期电压基本稳定。蓄电池放电初期电压下降较快; 中期电压下降缓慢; 末期电压急剧下降, 此时应该立即停止放电, 否则蓄电池会过放, 给蓄电池造成较大的损害^[6]。根据蓄电池的特点, 利用微控制器 STM32 的 PWM 功能控制 Buck 电路对蓄电池进行充放电管理。当光伏板电压 $V_m > 10$ V 时 (针对单个标称电压 12 V 的蓄电池), 进入白天处理程序, 否则进入晚上处理程序。通过判断采样的电池电压来判断进入充电的状态; 当蓄电池电压 $V_B < 13.6$ 时进入快充状态, 即 MPPT 过程, 以最大功率给蓄电池充电; 当 V_B 到达 14.4 V 时, 结束快充进入均充, 在此

状态以 14.4 V 电压给蓄电池恒压充电,并持续 10 min 时间。均充 10 min 以后自动转入浮充状态。浮充充电也是采用恒压充电的方式,采用 13.6 V 电压进行充电。进入浮充阶段说明蓄电池已经充满电了,此时的充电只是补充电池的内损耗。在控制器工作的阶段(除晚上),几乎大部分时间是在浮充阶段的。浮充过程中检测到电池电压连续一段时间都低于 13.2 V 时,说明电池电量已经损耗得差不多了,又要进入下一轮的充电过程了。晚上处理程序中,主要是判断蓄电池电压是否低于 10.8 V 处于过放状态。如果过放,则通过 STM32 的 PWM 控制开关管 Q2 断开负载,保护蓄电池。

5 仿真结果及实验结果

5.1 仿真结果

根据上述光伏电池的数学模型,应用 Matlab/Simulink 建立了光伏发电最大功率点跟踪的仿真模型。图 5 所示为输出功率 P 随时间 t 变化的曲线。由仿真结果可知,系统在 0.01 s 就找到了最大功率点(MPP),在最大功率点较稳定,具有很好的跟踪效果和快速的动态响应。

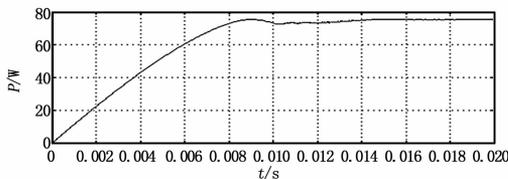


图 5 在固定光照和温度的仿真结果

5.2 实验结果

按照上述软、硬件设计方案搭建了一台光伏充放电控制器实验样机,对本文所研究的改进型扰动观察 MPPT 控制算法及充放电控制算法在光伏控制器样机和光伏电池阵列模拟器上加以验证。光伏电池的开路电压为 22 V,短路电流为 5 A。设定 V_{step1} 、 V_{step2} 分别为 1 V、0.5 V。

借助第三方软件,模拟光伏阵列得到的 MPPT 效率图如图 6 所示。由图可知,在 MPP 处能稳定地以最大功率输出,且 MPPT 效率达到了 99.94%。

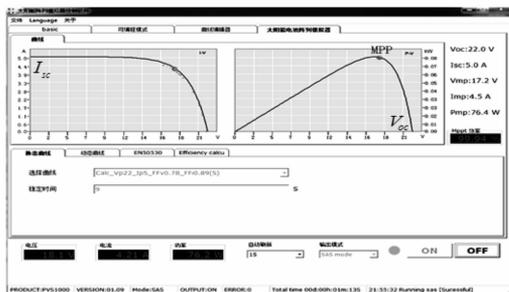


图 6 MPPT 效率图

表 1 为系统在正常的晴天从早上 8 点到下午 17 点的光伏控制器的 MPPT 控制过程的光伏电池的输出电压 V_{in} 、电流 I_{in} 和输出功率 P 实验记录。由实验结果可知,光照强度主要影响电流的变化,从而光伏电池阵列的输出功率随光照强度的变化而变化。光伏电池阵列的最大功率输出在 12~13 点之间。实验结果说明,本文提出的改进型 P&O 算法实现了 MPPT,具有良好的稳态性能,提高了系统的效率。

图 7 为快充、均充、浮充控制过程的 PWM 波形,快充时的 PWM 波形,占空比为 95.6%,此时开关管基本上处于导

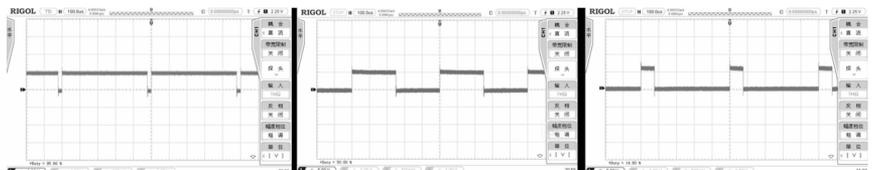


图 7 快充、均充、浮充的控制过程 PWM 波形

通状态,该状态以大电流对蓄电池充电;均充状态下的 PWM 波形,占空比为 50%;浮充状态下的 PWM 波形,占空比为 14.8%,该状态下充电电流最小。从测试波形可知,随着电压的上升,PWM 信号的占空比逐渐变小,充电电流也逐渐变小,并且 PWM 信号的频率始终保持在 2 kHz 不变。

表 1 MPPT 实验观察数据

时间	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P (W)
8:00	18.1	0.47	8.51
9:00	17.8	1.26	22.43
10:00	18.2	2.66	48.41
11:00	17.9	3.82	68.38
12:00	18.3	4.13	75.58
13:00	18.1	4.21	76.20
14:00	18.0	3.22	57.96
15:00	17.9	2.92	52.27
16:00	17.8	2.11	37.56
17:00	18.0	0.51	9.18

6 结束语

本文通过对 MPPT 算法的研究,发展了一种改进型变步长扰动观测法,该算法能快速、准确地追踪最大功率点,并且有效地提高了系统在最大功率点的稳定性和动态响应。同时,本文以 STM32 微控制器为核心设计了一台光伏充放电控制器样机,通过充放电控制算法实现了蓄电池的合理充放电,并进行过放保护。该光伏控制器可使太阳能电池板发挥最大功效、提高系统充电效率、延长蓄电池寿命、具有较高的精度和实用性。

参考文献:

- [1] 张兴,曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制 [M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [2] Maity J, Mitra S K, Majee J, et al. Development of an efficient photovoltaic MPPT Controller [A]. Power and Energy in NERIST (ICPEN), 2012 1st International Conference on [C]. IEEE, 2012: 1-4.
- [3] Al-Diab A, Sourkounis C. Variable step size P&O MPPT algorithm for PV systems [A]. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 International Conference on [C]. IEEE, 2010: 1097-1102.
- [4] 何薇薇,熊宇,杨金明,等. 基于改进 MPPT 算法的光伏发电最大功率跟踪系统 [J]. 电气传动, 2009, 39 (6): 39-41.
- [5] Elgendy M A, Zahawi B, Atkinson D J. Evaluation of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques [A]. Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), 6th IET International Conference on [C]. IET, 2012: 1-6.
- [6] Zheng G, Zhao J. Implementation of a novel solar controller with improved MPPT for hydrological forecast backup power [A]. Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on [C]. IEEE, 2008: 1703-1707.