

# 独立光伏电站蓄电池优化管理研究

李立伟<sup>1</sup>,陈伟斌<sup>2</sup>,马平<sup>1</sup>

(1. 青岛大学 自动化工程学院,山东 青岛 266071;2. 山东电力研究院,山东 济南 250002)

**摘要:** 为了实现独立光伏电站系统中蓄电池的优化管理,有效地延长其工作寿命,提出了基于混合型模糊PID控制算法的分段式蓄电池充电策略。该策略将蓄电池的充电分为恒流充电、恒压均充和恒压浮充3个阶段,浮充电压可根据电池温度进行实时补偿。将定时功能与电流判据相结合,控制均、浮充的转换,可避免蓄电池的过充或欠充。介绍了基于该策略的控制器硬件组成以及软件实现。试验结果和实际运行表明,该系统具有高效、稳定、自动化程度高的特点。

**关键词:** 独立光伏电站; 优化管理; 分段式充电策略; 混合型模糊PID控制算法; 蓄电池

**中图分类号:** TM 914.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2009)04-0110-04

## 0 引言

光伏发电是当前利用太阳能的主要方式。光伏电站系统可分为并网型和独立供电型系统2种。前者可以看作集中式或者分布式的太阳能电站;而后者则不与电网相连,直接向负载提供电力,为了提供持续的能量供应必须使用储能装置<sup>[1]</sup>。阀控铅酸蓄电池(VRLA)广泛应用于独立光伏电站中,其能量是由太阳能提供,白天由太阳能转化为电能给蓄电池充电,夜间则由蓄电池给用户所需的电能。

从已建光伏电站的调查分析发现,蓄电池是导致光伏电站系统故障和失效的主要原因之一。导致蓄电池提前失效的原因很多,除设计不合理、维护管理不到位外,蓄电池的控制方式不合理是导致其提前失效的重要原因<sup>[2-3]</sup>。因此,建立合理的蓄电池控制方式,可延长蓄电池使用寿命,降低系统运行成本并保证独立光伏电站的安全可靠运行。

## 1 蓄电池优化管理策略

容量和寿命是蓄电池的重要参数,它们受充电方法影响很大。在独立光伏电站系统中,不仅关心蓄电池的充电速度,而更关心如何在充电的过程中既能最大限度地利用光伏电池,又能实现充电的最小损耗和蓄电池的最长寿命。

### 1.1 分段式充电方法

根据蓄电池的充放电特性,建立科学、合理的充放电制度,对蓄电池进行智能化管理,有利于延长蓄电池的工作寿命、提高充电效率以及光伏电站系统的可靠性。该系统将蓄电池的充电分为恒流、恒压均充和浮充3个阶段,充电曲线如图1所示。系统可控制进行恒流、恒压均充、浮充状态的转换,从而实

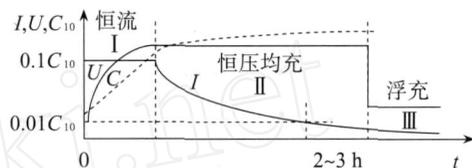


图1 电池充电曲线

Fig. 1 Charging curve of battery

现蓄电池的优化管理。

a. 恒流阶段:先采用  $0.1 C_{10}$  的恒定电流对蓄电池进行充电,其中  $C_{10}$  为 10 h 放电率时蓄电池的额定容量,随着充电的不断进行蓄电池电压会逐渐升高。

b. 恒压均充阶段:当充电电压达到均充电压时,转为恒压均充充电,这时蓄电池的充电电流会逐渐减小。

c. 浮充阶段:当充电电流小于  $0.01 C_{10}$  时,启动定时(2~3 h,可设定),定时到,则转浮充,浮充电压根据电池温度进行实时补偿。

将定时功能与电流判据结合起来,控制均、浮充的转换,可避免蓄电池的过充或欠充。系统可实现最优化的电池充放电管理,根据系统的工作状态,自动实现蓄电池的程序充电。当电池电压低于设定值或非恒流状态充电电流大于恒流均充电流后,控制器可自动启动充电程序对蓄电池进行补充充电。如在较长时间(几个月,可设置)内未对电池进行均充,控制器可根据参数设置启动一次周期充电。充电的持续时间可设定,或根据充电电流和电压由控制器自动控制。

### 1.2 浮充电压补偿

温度和浮充电压的变化会给铅酸蓄电池带来严重危害。在适当的浮充状态下,阀控铅酸蓄电池能够稳定工作6~10年。而浮充电压即使只有5%的偏差,也会使蓄电池的寿命减半<sup>[4]</sup>。因此,要求控制器必须根据电池温度对蓄电池的浮充电压进行实时补偿,避免高温过充电和低温欠充电,使蓄电池在各

种温度环境下都能保持满容状态。

本文的控制器采用了线性补偿方式,先对蓄电池温度进行实时监测,然后相应地调整蓄电池浮充电压,从而达到了浮充电压温度补偿的目的。以蓄电池的工作环境温度 25 为标准,当环境温度每升高 1 时,蓄电池单体浮充电压要降低 3 mV;当环境温度每降低 1 时,蓄电池单体浮充电压要升高 3 mV。

### 1.3 恒流充电算法

常规 PID 控制系统是按偏差的比例、积分和微分线性组合进行控制的,它是在获取对象数学模型的基础上,根据某一整定原则,适当地整定 PID 的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  3 个参数,可以获得比较满意的控制效果。实践证明,这种参数整定的过程实际上是对比例、积分、微分 3 部分控制作用的折衷,这种控制无法解决稳定性与准确性之间的矛盾。加大控制作用可使误差减小、准确性提高,但降低了系统的稳定性。反之,为保证系统的稳定性,限制控制作用,这样又降低了控制的准确性。虽然存在许多 PID 参数的整定方法及经验公式,但这种整定不仅时间长,且参数间相互影响,往往很难达到最优效果。即使对被控对象整定了一组满意的 PID 控制参数,当对象特性发生变化时,也难以保证良好的控制性能<sup>[5]</sup>。

实践中试验比较了多种控制算法,由于光伏电池输出、蓄电池充电电流与蓄电池电压、蓄电池温度之间难以用精确的数学模型描述,对蓄电池恒流或恒压充电的控制,采用如图 2 所示的混合型模糊 PID 控制器较为合适。其中,  $r$  为系统给定值,  $y$  为实际输出值,  $e$  为  $r$  和  $y$  之间的偏差,  $K_1$ 、 $K_2$  为比例系数,  $i_1$  为模糊控制器的输出,  $i_2$  为 PID 控制器的输出,  $i$  为混合型模糊 PID 控制器的总输出。当系统的偏差较大时,积分系数和比例系数较大;当系统的偏差较小时,积分系数和比例系数也较小。实验表明,这种控制方式既可保证系统的动态响应速度,又能满足一定的稳态精度。其中,恒流充电时的仿真结果如图 3 所示。

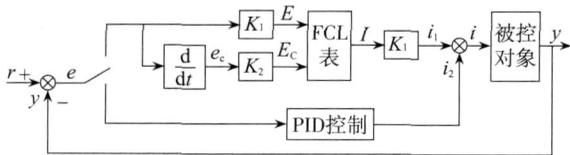


图 2 混合型模糊 PID 控制器

Fig. 2 Fuzzy-PID controller

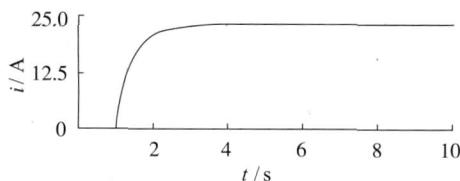


图 3 控制算法仿真结果

Fig. 3 Simulative result of control arithmetic

### 1.4 欠压保护

太阳光微弱时将由蓄电池为用户负载供电。当电池放电至终止电压时控制器会及时切断用电负载,同时发出声光告警,以防止蓄电池深度放电。蓄电池的欠压切断有软硬件双重措施,切实保证电池不会过放电。

## 2 控制器设计

控制器以 C8051F021 单片机为控制和检测核心,利用 IGBT 作为斩波器件,从而实现蓄电池的优化管理和光伏电站的运行监测。其结构框图如图 4 所示。

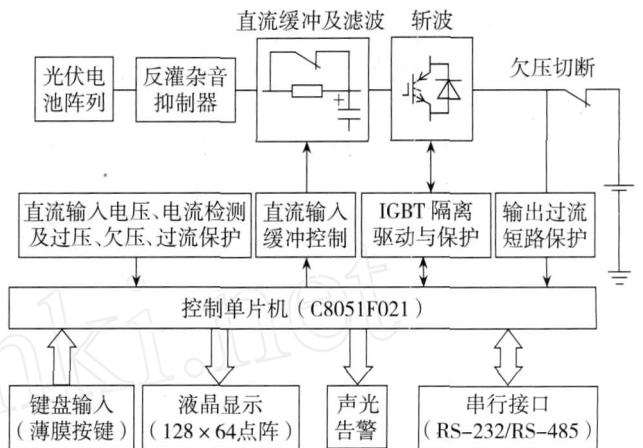


图 4 系统结构框图

Fig. 4 Block diagram of system structure

### 2.1 硬件设计

#### 2.1.1 单片机 C8051F021

C8051F021 单片机是 Cygnal 公司生产的高速、低功耗、多功能的 8 位单片机<sup>[6-8]</sup>。在该控制器中,利用片内 ADC 子系统测量系统的电压和电流;利用 PCA 定时器阵列产生 PWM 控制信号;利用 2 个电压比较器实现过压、过流保护;利用 I/O 口实现单体电池的温度测量、蓄电池放电欠压保护以及声光告警。由此可见,采用 C8051F021 单片机单个芯片即可完成系统的控制、检测和保护,不但简化了系统硬件设计,也显著降低了系统成本。

#### 2.1.2 主电路

系统主电路如图 5 所示,其中  $U^*$ 、 $U$  分别为电

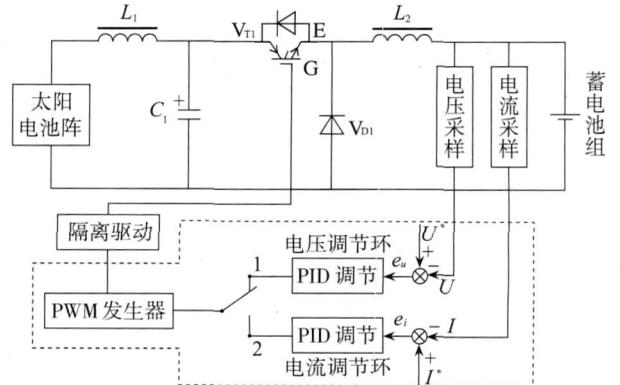


图 5 系统主电路

Fig. 5 Main circuit of system

压给定值与实际输出值,  $I^*$ 、 $I$  分别为电流给定值与实际输出值。当恒流或恒压充电时, 分别将蓄电池的充电电流或充电电压作为反馈信号进行闭环控制。系统设定值与实际值相比较得误差  $e$ , 经混合型模糊 PID 控制器调节后, 通过实时改变单片机 C8051F021 输出 PWM 控制信号的占空比, 再经光耦隔离驱动控制 IGBT 功率器件的导通和关断, 进行 DC/DC 斩波降压, 改变系统输出电压的大小, 从而实现了恒流或恒压充电功能。

### 2.1.3 驱动电路

IGBT 的驱动采用 TLP250 芯片, TLP250 内部有光耦隔离。为了实现 IGBT 的快速关断, 关断时需为 G、E 端提供一负偏压。驱动电路如图 6 所示, 其中稳压管  $V_{D1}$  为 5.1 V, 采用 +20 V 电源供电。由于稳压管  $V_{D1}$  及电容  $C_2$  的储能作用, 当 IGBT 导通时, G、E 之间产生 +14.9 V 的驱动电压; 当 IGBT 关断时, G、E 之间产生 -5.1 V 的偏压。

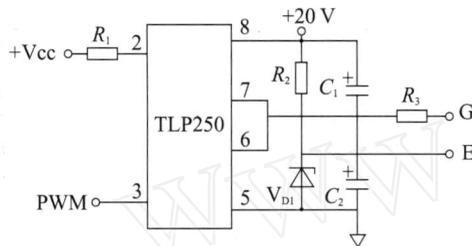


图 6 IGBT 驱动电路

Fig. 6 Driving circuit of IGBT

### 2.1.4 模拟量检测电路

模拟量检测主要包括电池电压、充放电电流以及单体电池温度等。

a. 电池电压。为了方便隔离, 这里选用了 LEM 公司的电压传感器 LV25-P。LV25-P 是应用霍尔原理的闭环电流传感器, 原边与副边之间是绝缘的。使用时原边串联一限流电阻  $R_1$ , 额定电流为 10 mA, 这时副边对应电流为 25 mA, 在副边接一测量电阻  $R_2$  可将电流信号转换为电压信号  $U_o$ ,  $U_o$  与  $U_i$  是线性成正比的, 因此通过测量  $U_o$  即可得到电池电压  $U_i$ 。其测量原理如图 7 所示。

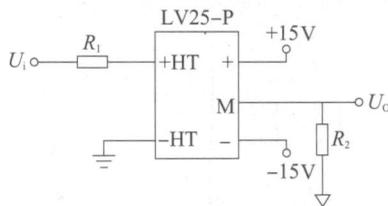


图 7 电池电压测量电路

Fig. 7 Circuit of battery voltage measurement

b. 充放电电流。蓄电池充放电电流的检测采用了 LEM 公司的磁平衡式霍尔电流传感器, 具有全隔离、高精度以及抗干扰能力强等优点, 其输出为 0~25 mA 电流, 经电阻转换成电压后通过单片机 C8051F021 的 ADC 子系统转换处理。

c. 电池温度。在电池负极柱根部安置温度传感

器, 实时测量各单体电池的温度, 然后相加取平均值作为浮充电压的补偿温度。在这里选用了 DALLAS 公司生产的单线数字温度传感器 DS1820, 多个 DS1820 可并联在一起, 仅需单片机 1 条 I/O 口即可实现多点温度的准确测量<sup>[9]</sup>。

## 2.2 电磁兼容设计

由于控制器处在光伏电站的强电磁干扰环境中, 如果不采取完善的抗干扰措施, 轻则会影响控制器的采样和控制的精度, 重则会破坏其器件和程序。为了保证系统稳定可靠工作, 必须周密考虑和解决系统的抗干扰问题<sup>[10-15]</sup>。

### 2.2.1 硬件抗干扰设计

a. 选用了高可靠性的工业级开关电源, 其输入范围宽, 对输入电压的波动有较强的适应能力, 并在其输入端外加高性能 EMI 滤波器。

b. 印制板布局时数字电路、模拟电路及功率电路应分开布置, 高压和低压数字系统之间全部采用光耦隔离设计。

c. 数字电路、模拟电路应分别单独供电, 减少电源地线的公共阻抗, 防止形成地线回路, 同时保证系统一点接地; 在电源入口适当位置增加去耦电容。

d. 各种弱电传输电缆全部采用屏蔽双绞线, 并且屏蔽层单端接地。

### 2.2.2 软件抗干扰设计

a. A/D 采样值计算采用数字滤波算法。对每个采样点作 16 次采样, 数值滤波通过筛除两端的数据并求平均值获得, 以减小干扰的影响, 提高测量的准确性。

b. 设置监视跟踪定时器 (WDT), 当程序执行出错或进入死循环时, 自动使系统复位。

c. 设计多个软件看门狗, 用以监视整个程序和重要模块的运行。

d. 设置软件陷阱, 将已跑飞的程序马上拉回到正常运行轨道。

e. 采用指令冗余技术, 减少程序跑飞的概率。

## 2.3 软件设计

系统软件设计完全按照结构化的程序设计方法, 将整个程序按照功能分为若干个程序模块, 以方便调试和维护。为提高编程效率采用 Keil C51 语言编程。本设计中的软件在 Keil  $\mu$ Vision2 集成环境中编辑、编译、连接、调试后, 直接通过 JTAG 接口将程序下载到 C8051F021 单片机中 (ISP), 系统投运后也可通过远方数据通道进行运行中编程 (IAP), 实现远方程序版本升级<sup>[7]</sup>。它主要包括主程序、模拟量采样程序、混合型模糊 PID 调节程序、故障处理程序、键盘显示程序、串口通信程序、时钟处理程序等。

## 3 实验结果

控制器经实际测试, 性能指标完全达到了设计要求。其中, 恒流控制误差在稳态时小于等于 0.2%, 调节过程中动态超调量小于等于 1%, 具有良好的动

态和稳态性能。

## 4 结论

实验和运行结果表明,该控制器完全实现了独立光伏电站蓄电池的优化管理,并且系统成本低、抗干扰能力强、使用维护方便,有利于提高光伏电站的自动化水平。系统自投入运行以来,取得了良好的效果,完全能满足光伏电站无人监控的需要。

## 参考文献:

- [1] 陈慧玲. 延长独立光伏电站蓄电池使用寿命的措施探讨[J]. 蓄电池, 2005(3):106-107.  
CHEN Huiling. Discussion on the methods of prolonging service life of VRLA batteries used for stand-alone PV power station [J]. Chinese Labat Man, 2005(3):106-107.
- [2] 黄国华, 施玉川, 杨宏. 光伏电站免维护蓄电池的维护分析[J]. 太阳能学报, 2004, 25(6):785-788.  
HUANG Guohua, SHI Yuchuan, YANG Hong. Analysis of the maintenance of VRLA battery in PV power plants [J]. Acta Energiae Solans Sinica, 2004, 25(6):785-788.
- [3] 陈维, 沈辉. 太阳能光伏应用中的蓄电池研究[J]. 电池, 2006, 36(1):67-68.  
CHEN Wei, SHEN Hui. Application research of storage batteries in photovoltaic system [J]. Battery Bimonthly, 2006, 36(1):67-68.
- [4] 王鹤, 刘东社, 杨宏. 铅酸蓄电池的过充电保护与温度补偿[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(12):1310-1312.  
WANG He, LIU Dongshe, YANG Hong. Overcharging protection and temperature compensation of lead acid battery [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(12):1310-1312.
- [5] 陶永华, 尹怡欣. 新型PID控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [6] 李立伟, 邹积岩. 新型双钳口接地电阻在线测量仪[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14):83-85.  
LI Liwei, ZOU Jiyan. New ground resistance on-line measuring instrument with double jaw [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14):83-85.
- [7] 李立伟, 刘险峰, 刘斌. 基于现场总线的分布式直流系统接地在线监测装置的设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12):55-58.  
LI Liwei, LIU Xianfeng, LIU Bin. Distributed on-line grounding monitoring system for DC system based on field bus [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12):55-58.
- [8] 李立伟, 邹积岩. 双CPU控制电力专用UPS的设计[J]. 电源技术, 2003, 27(2):115-117.  
LI Liwei, ZOU Jiyan. Design of a double CPU controlled special UPS for power industry [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2003, 27(2):115-117.
- [9] 李立伟, 邹积岩. 蓄电池在线监测系统的设计与实现[J]. 电工技术杂志, 2002, 21(11):7-9.  
LI Liwei, ZOU Jiyan. Design and realization of battery on-line monitoring system [J]. Electrotechnical Journal, 2002, 21(11):7-9.
- [10] 谈克雄, 李福祺, 张会平, 等. 提高电容型设备介损监测装置性能的意见[J]. 高电压技术, 2002, 28(11):21-23.  
TAN Kexiong, LI Fuqi, ZHANG Huiping, et al. Advice for improving performance of on-line monitoring devices for capacitive type equipment [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11):21-23.
- [11] 贺景亮, 关根志, 王洪新. 绝缘在线监测中若干问题的探讨[J]. 高电压技术, 1998, 24(3):38-40.  
HE Jingliang, GUAN Genzhi, WANG Hongxin. Investigation on several questions in on-line insulation monitoring [J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(3):38-40.
- [12] 赵金奎. 共模干扰和差模干扰及其抑制技术[J]. 电子质量, 2006(5):72-76.  
ZHAO Jinkui. Common mode interference and differential mode interference and their restraining technologies [J]. Electronics Quality, 2006(5):72-76.
- [13] 谢远圆. 提高变电站监控系统可靠性[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6):99-101.  
XIE Yuan. Improving substation monitoring system reliability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6):99-101.
- [14] 廖瑞金, 李俭. 电气设备介损损耗监测的谐波分析法及其特征[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 1999, 22(3):67-71.  
LIAO Ruijin, LI Jian. The harmonic analysis method and its characteristics for detecting dielectric loss of electric equipments [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1999, 22(3):67-71.
- [15] 林森, 关明. 变电所自动化系统的抗干扰措施[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12):67-69.  
LIN Sen, GUAN Ming. Anti-jamming measures of substation automation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12):67-69.

(责任编辑:柏英武)

## 作者简介:

李立伟(1970-),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要从事电力系统的在线监测与状态维修等方面的研究(E-mail: ytlw@163.com);  
陈伟斌(1964-),男,山东青岛人,高级工程师,主要从事电测计量方面的研究工作。

## Optimal battery management of stand-alone PV power station

LI Liwei<sup>1</sup>, CHEN Weibin<sup>2</sup>, MA Ping<sup>1</sup>

(1. College of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. Shandong Electric Power Research Institute, Ji'nan 250002, China)

**Abstract:** In order to realize the optimal management of storage battery for the stand-alone PV power station system to prolong its working life, a multi-step charge strategy based on fuzzy-PID control arithmetic is presented, which has three steps: constant current charge, constant voltage equalizing charge and constant voltage floating charge. The floating charge voltage is compensated in real time according to battery temperature. The time criterion is combined with the current criterion to control the transition between the equalizing charge and the floating charge, avoiding the overcharge and insufficient charge. The hardware and software implementation of the controller based on proposed strategy are introduced. Experiments and site operations show that the system has high efficiency, high stability and high automation.

**Key words:** stand-alone PV power station; optimal management; multi-step charge strategy; fuzzy-PID control arithmetic; storage battery