

小功率独立光伏发电系统研究

张超, 张学众, 张志宏, 张竑基
(河南省郑州供电公司, 河南 郑州 450052)



张超(1984—), 男, 助理工程师, 研究方向为新能源和电力系统自动化。

摘要: 提出了一种采用推挽输出的新型光伏独立发电主电路拓扑结构, 系统包括光伏阵列、CUK 充电器、蓄电池、升压变换和逆变部分。CUK 充电器采用了基于蓄电池电流控制的充电策略, 可以在短时间内使蓄电池达到充满状态; 升压变换拓扑采用推挽结构, 使由蓄电池输出的 24 V 直流电, 上升到符合逆变需要的 380 V (母线电压)。该系统采用闭环控制, 试验结果表明, 该方法简单有效, 灵活性强, 能够保证系统的稳定运行。

关键词: 太阳能; 蓄电池; 逆变器

中图分类号: TM 615 文献标志码: B 文章编号: 1001-5531(2010)14-0019-05

Study of Low Power Stand Alone PV Power System

ZHANG Chao, ZHANG Xuezhong, ZHANG Zhihong, ZHAO Hongji
(Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: A novel stand alone photovoltaic system topology was proposed, in which push-pull output circuit was adopted. The system was consisted of photovoltaic array, CUK charger, battery, Boost transformation and inverter. Charging strategy based on the battery current regulation principle was adopted in CUK charger, which made that a 100% battery state of charge could be reached in shorter time. Boost topology used push-pull structure, so that the output from the battery of DC 24 V rose to 380 V to meet the needs of inverter (bus voltage). Closed-loop control was adopted in the system, and experiment results showed that the method was simple, effective and flexible, and was able to ensure the stable operation of the system.

Key words: solar; battery; inverter

0 引言

目前, 在独立运行的光伏发电系统中, 普遍采用的结构如图 1 所示, 首先利用太阳能电池来收集太阳能, 再经过 DC-DC 变换器给蓄电池充电, 由于蓄电池的电压较低, 直接逆变的输出电压无法满足负载需求, 因此, 还需要一个升压变换器, 将直流电压升高, 最后再通过逆变器将直流电转化为 220 V/50 Hz 的交流电供用户使用^[1]。

1 系统设计及工作原理

由于设计的是独立型的光伏转换系统, 因此, 蓄电池是必不可少的一部分, 在太阳能电池和蓄

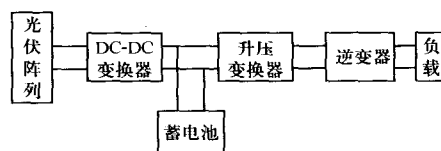


图 1 独立运行光伏发电系统框图

电池之间加入一级 DC-DC 变换器(充电器), 以实现最大功率点跟踪和蓄电池的充放电管理。由于蓄电池输出电压低, 不能满足逆变要求的直流母线电压, 因此, 在蓄电池和逆变器输入之间还需要加入一级升压电路, 以提升直流侧电压。加上最后的逆变器, 从太阳能电池的输入到系统的输出, 太阳能经过了三级变换, 分别是 DC-DC 变换、升压变换、逆变。

张学众(1961—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统自动化。

张志宏(1964—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

本文采用了这种比较传统的三级式系统构架,系统框图如图2所示。该构架的特点是可靠,

控制相对独立简单,便于系统的软件如硬件的模块化设计。

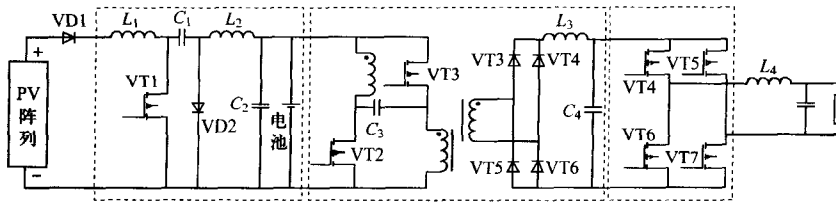


图2 独立光伏发电系统拓扑图

1.1 充电拓扑

本文所设计的独立运行的光伏转换系统需要蓄电池储存太阳能电池的能量,以备在没有日照的情况下使用,因此,蓄电池是独立光伏系统中一个必不可少的组成部分。由于太阳能电池输出为最大功率时的电压大于选定的蓄电池组电压,因此,本文提出一种基于CUK电路^[24](见图2),用于光伏发电系统中的MPPT充电控制策略,并在太阳能电池板的输出端串联了一个二极管VD1,防止蓄电池的能量向太阳能电池反灌,损坏PV板。

综合考虑光照强度、环境温度对光伏系统充电电流的影响、铅酸蓄电池性能及系统成本等因素,本文采用4阶段充电法充电,较好地使用涓流及浮充充电模式,从而使蓄电池的容量达到额定值,延长其寿命(见图3)。

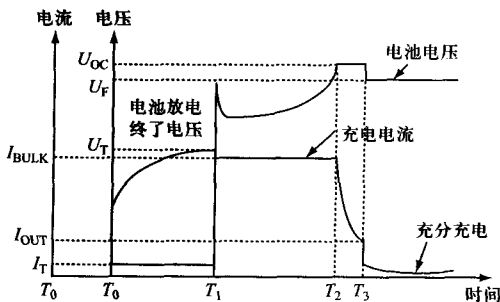


图3 4阶段充电方式

(1) 涓流充电。涓流充电是为了防止充电时大电流灌入蓄电池,超过蓄电池初始充电电流值,造成蓄电池的损坏。涓流充电原理为:充电时设定一个充电使能电压 U_T ,当蓄电池的端电压低于 U_T 时,光伏控制器将提供一个很小的电流 I_T 对

蓄电池进行充电。随着涓流充电状态的进行,铅酸蓄电池的端电压会逐渐升高,如果蓄电池端电压值达到 U_T ,充电器将进入第2个充电阶段,即恒流充电状态。如果充电之初,蓄电池的端电压已经高于 U_T ,充电器将直接进入恒流充电阶段,不再经过涓流充电阶段。

(2) 恒流充电。恒流充电阶段也是快速充电阶段,在恒流充电期间,充电器提供一个恒定的电流 I_{BULK} 给蓄电池充电,此时蓄电池容量快速增加,容量变化的同时,蓄电池的电压将会不断上升,如果蓄电池端电压达到设定的过压充电电压 U_{OC} ,蓄电池充电就转入过压充电状态。

(3) 过压充电。过压充电阶段期间充电电压 U_{OC} 不变,并稍高于蓄电池的额定电压,这样可以使蓄电池容量最后达到饱和,此时充电电流逐渐减小,如果充电电流减小到过充终止电流 I_{OCT} ,表明蓄电池已被充满,充电模式已经转入浮充状态。

(4) 浮充充电。浮充电压略低于 U_{OC} ,浮充充电就是提供一个恒定的带有温度补偿的浮充电压 U_F 给蓄电池充电,来保持蓄电池容量不变,浮充阶段会一直提供很小的浮充电流,用以弥补蓄电池自身放电造成的能量损失。此后,如果蓄电池端电压下降到 U_{OC} 的90%,充电器就会自动进入恒充或涓流状态。

传统的光伏发电系统充电控制策略中,仅在快速充电阶段采用MPPT控制,但对于该系统,无论出于哪个充电阶段,只要实际充电电流不大于最大允许充电电流设定值,即可采用MPPT充电控制,这就使光伏阵列输出能量的利用率大大提高。该充电控制不但能充分利用光伏阵列的输出功率,而且与MPPT技术的结合在短时间内即可

使蓄电池达到完全充满状态,从而延长蓄电池寿命。

1.2 升压变换拓扑

可以实现升压的变换器有 Boost 变换器、推挽变换器、全桥变换器、半桥变换器、单管正激和双管正激变换器等。其中,Boost 是输入、输出不隔离,其他 5 个都是隔离型变换器,为了同时实现升压和隔离的功能,Boost 变换器被排除掉。而剩下的几种变换器中,单管正激不适合 700 W 的功率等级,也被排除掉。全桥、半桥、双管正激变换器又较适合高压向低压变换的场合,而该系统的输入为 DC 24 V 蓄电池电压,输出为 DC 380 V 母线电压,保证逆变的需要,其输入侧的电压较低,电流较大,以上 3 种变换器并不适合,因此,只剩下最适合这种低压大电流场合的推挽变换器。推挽变换器采用推挽正激变换器又存在变压器偏磁的问题,为了解决该问题,对推挽电路做了改进,在原有电路的基础上增加一个箝位电容 C_3 ,成为推挽正激电路。推挽正激电路的优点是:既保留了推挽电路适合低电压大电流的输入场合的特点,又由于箝位电容 C_3 的存在可以很好地控制原边开关的电压尖峰,有效地抑制推挽电路变压器偏磁,因此,升压变换器采用推挽正激电路。

1.3 逆变器拓扑选择

常用逆变器的拓扑有全桥和半桥 2 种形式。全桥逆变电路的特点是适合大功率、高压输入场合,直流电压利用率高。由于全桥比半桥具有更高的直流电压利用率,因此,在该系统中采用全桥逆变电路。

另外,电容 C_5 作为连接 DC 升压变换与逆变的中间环节(Dclink 环节),其主要作用是维持逆变输入电压在 380 V 左右,从而保证逆变输出为 220 V/50 Hz 的交流电。

2 控制策略

该拓扑主要由 2 部分组成,前级的 DC-DC 变换器和后级的 DC-AC 逆变器,其中 DC-DC 变换部分包括 CUK 变换和升压变换 2 个环节,在 CUK 变换环节实现最大功率跟踪(MPPT)。

CUK 变换器控制部分的控制流程图如图 4

所示。将 A/D 采样得到的太阳能电池阵列的输出电压和电流值与上一次电压和电流的 A/D 采样值进行比较,根据 MPPT 控制算法得到最佳工作点的参考电压值 U_{ref} ,然后将得到的 U_{ref} 值与 A/D 采样的太阳能电池阵列的输出电压值做差,输出再经过一个比例积分环节,然后与固定频率的三角波比较得到 PWM 控制信号,最后再通过驱动电路对控制信号进行放大后去控制 CUK 变换器开关管的状态;而对升压变化部分的控制也是通过调节开关管的占空比来实现的。

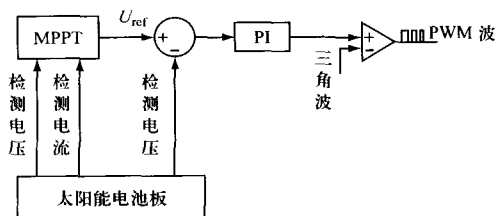


图 4 DC-DC 控制流程图

DC-AC 逆变器控制部分的控制流程图如图 5 所示。DC-AC 控制部分主要完成跟踪控制 Dclink 的输出电压维持恒定,此处设定的 Dclink 输出电压恒定值为 380 V。先将 Dclink 的参考电压值与 A/D 采样得到的 Dclink 实际电压值做差,再通过一个比例积分环节得到 DC-AC 逆变器输出指令电流的幅值 I_0 ,然后将 I_0 与给定的参考单位正弦信号 $\sin \omega t$ 相乘得到逆变器输出指令电流的矢量值 I_{ref} ;再将 I_{ref} 值与 A/D 采样得到的 DC-AC 逆变器实际输出电流值 I_{out} 的差值通过一个比例环节的作用后,与给定的参考电压信号 U_s 相加,输出信号再与固定频率的三角波比较后得到 PWM 控制信号,最后,再经过驱动电路放大后控制 DC-AC 逆变器的开关管的状态。

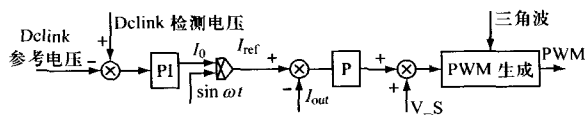


图 5 DC-AC 控制流程图

3 试验研究

为了验证所提出的拓扑结构及控制策略的有效性,根据图 2 主电路拓扑图,以及图 4 和图 5 控

制系统框图,对该系统进行试验研究。

太阳能电池阵列采用 4 块 175 W 的多晶硅太阳能电池阵列串连,额定输入功率为 700 W,太阳能电池阵列的开路电压约 140 V。铅酸蓄电池型号为 LC-X1238,12 V/38 AH,蓄电池 2 串 4 并 = 8 个,组成蓄电池组。充电使能电压 $U_T = 20.4$ V,过压充电门槛电压 $U_{oc} = 30$ V,浮充电压 $U_F = 27$ V,涓流充电电流 $I_T = 0.152$ A,快速充电电流 $I_{BULK} = 3.8$ A,过充终止电流 $I_{OCT} = 0.38$ A。

3.1 充电试验

为了验证独立光伏控制器的充电性能,对一组额定容量 24 V/380 AH 的蓄电池组进行充电,同时对充电电压、电流进行检测。

测量数据的天气情况:晴天,微风,白天最高温度 28 ℃。从上午 9:00 开始测第一组数据,到下午 6:00 结束,共测得 10 组数据。试验测试系统如图 6 所示。测得试验数据如表 1 所示。对表 1 数据进行如下分析。

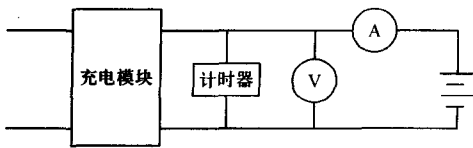


图 6 测试示意图

蓄电池进行放电之后,即开始充电初始时刻,蓄电池组端电压为 19.5 V,低于所设定的充电使能电压 U_T (20.4 V),充电器将提供一个很小的涓流 I_T 进行充电,所设定的 $I_T = 0.152$ A,此刻的充电电流是 0.18 A,考虑到误差的存在,实际充电电流接近所设定的涓流 I_T ,该充电阶段验证了 4 阶段充电的涓流充电,为了防止把恒流充电时的大电流灌入损坏蓄电池。

在充电 1 h 后,可以看到蓄电池端电压为 23.5 V,这时端电压大于充电使能电压 U_T (20.4 V),理论上应该转为恒流充电模式,所设定的恒流电流值 $I_{BULK} = 3.8$ A,从表 1 可以看出,实际充电电流为 3.5 A,此时已经转到恒流充电阶段。从表 1 还可以看出,恒流充电时间段是 1 ~ 5 h 之间。

该实验所设定的过压充电门槛电压 $U_{oc} = 30$ V,当蓄电池端电压高于 30 V 时,就要进入过压

表 1 测量数据

| 时间/h | 蓄电池电压/V | 蓄电池电流/A |
|------|---------|---------|
| 0 | 19.50 | 0.18 |
| 1 | 23.50 | 3.50 |
| 2 | 25.45 | 3.60 |
| 3 | 26.74 | 3.60 |
| 4 | 27.80 | 3.75 |
| 5 | 29.00 | 3.30 |
| 6 | 28.50 | 2.00 |
| 7 | 27.65 | 0.85 |
| 8 | 27.00 | 0.20 |
| 9 | 26.50 | 0.15 |

充电阶段,从表 1 看出,5 h 蓄电池端电压为 29 V,6 h 的端电压为 28.5 V,说明在 5 ~ 6 h,蓄电池电压达到了 30 V 后转入过压充电模式,此时充电电流逐渐减少,6 ~ 7 h 阶段就是过压充电阶段。

由表 1 可以看出,从 7 h 起,充电电压稳定在约 27 V,充电电流最终稳定在约 0.18 A。该试验设定的浮充电压 $U_F = 27$ V,过充终止电流 $I_{OCT} = 0.38$ A,当过压充电阶段充电电流小于 I_{OCT} 时,表明蓄电池已被充满,进入浮充状态,此时浮充电压为 27 V,浮充电流为 0.18 A。7 ~ 9 h 阶段验证了 4 阶段充电的浮充充电模式。

从这 10 组数据的分析可以得出,该充电过程实现了 4 阶段充电过程的转换。

3.2 逆变输出试验

试验测试系统如图 7 所示。

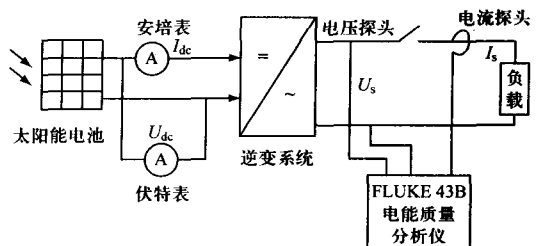


图 7 测试示意图

输入侧分别用安培表和伏特表测量太阳能电池的输入电压和电流,输出侧采用 FLUKE 43B 电能质量分析仪检测系统输出交流电压和电流的参数

和波形。由于输出交流电流值太小,因此,采用在电流探头上绕4匝后测量。

下午13:00的系统输出试验波形如图8~10所示。

测试结果表明,系统的输入电压为132 V,输入电流为1.975 A,输入功率为

$$P_{in} = 132 \times 1.975 = 260.7 \text{ W}$$

图8~10分别是输出电压和电流波形图,输出电流谐波分析图以及功率因数分析图。图中系统的输出电压为235.6 V,输出电流为4.261/4 A,输出功率为

$$P_{out} = 1000/4 = 250 \text{ W}$$

故系统的效率为

$$\eta_1 = P_{in}/P_{out} = 250/260.7 = 0.95$$

从图中可以看出,系统输出功率因数为0.98,

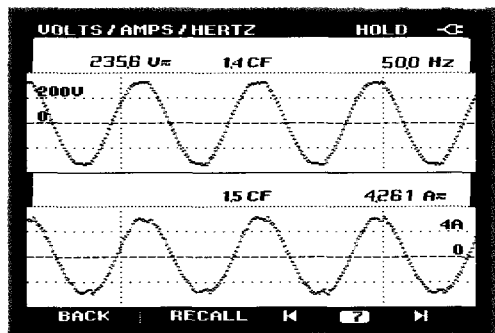


图8 输出电压电流波形

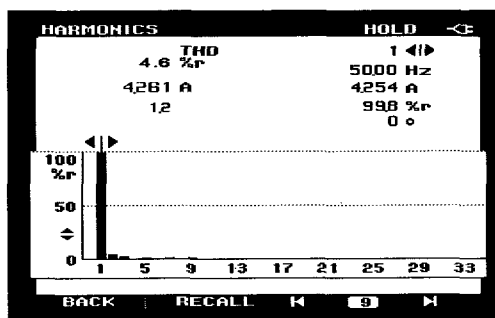


图9 输出电流谐波分析

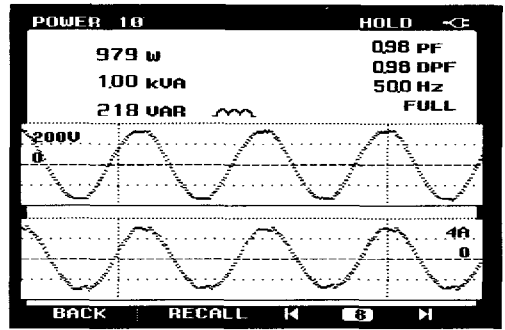


图10 输出功率及功率因数分析

输出电流的基波分量占电流总量的99.8%。因此,可以说逆系统输出的电能质量是令人满意的。

用FLUKE 43B电能质量分析仪检测系统输出交流电压和电流的参数和波形,结果显示输出电能质量良好。

4 结 语

本文提出了一种采用推挽输出的新型独立光伏发电主电路拓扑,该拓扑采用SPWM调制和闭环控制策略,通过试验研究,证明了理论分析的正确性,验证了通过该方法可以得到高质量的稳定电能。

【参考文献】

- [1] 唐友怀,张海涛,罗珊,等.一种新型独立光伏系统逆变器的研究[J].应用天地,2008,27(4):65-66.
- [2] 肖鹏,陈呈国,吴春华.一种新型光伏独立发电系统研究[J].电气传动,2008,38(8):33-34.
- [3] 马兰,钱荔,肖岚.电流型推挽全桥双向变换器的研究[J].电力电子技术,2008,42(1):21-22.
- [4] 王锋,张森,胡小伟,等.新型Cuk电路及其在光伏系统中的应用[J].电力电子技术,2009,43(5):26-27.
- [5] 杨海柱,金新民,刘洁.500 W光伏并网逆变器设计[J].国外电子元器件,2006(3):51-52.

收稿日期:2010-03-23

(上接第18页)

【参考文献】

- [1] GB 14048.1-2006 低压开关设备和控制设备 第1部分:总则[S].
- [2] 贺开华,马子文.爆炸式开关的瞬态温度场仿真计算[J].船电技术,2008,28(4):228-230.

- [3] 尚晓江,邱峰,赵海峰,等. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [4] 吴永桥,杨兴和,魏丽娜.工程力学[M].武汉:武汉工业大学出版社,1996.

收稿日期:2010-04-22