

# 光伏发电并网逆变器控制系统的设计

沙庭进

(连云港供电公司, 江苏 连云港 222004)

**摘要:** 本文根据逆变器结构以及光伏发电阵列特点, 提出了基于 DC-DC 和 DC-AC 两级并网逆变器的结构。基于 DC-DC 和 DC-AC 电路的相对独立性, 分别对 DC-DC 和 DC-AC 进行了分析, 重点分析了 DC-AC 的工作原理。并网逆变控制器设计是本文的重点, 包括逆变器驱动电路的设计、逆变器驱动电路的软件编程以及并网过程中直流侧欠电压、直流侧过电压、交流侧电流等硬件电路的设计。另外对主电路中各元件参数的选取、系统最大功率跟踪方法做了详细的分析。为类似结构的光伏并网逆变器提供了设计参考。

**关键词:** 太阳能; 光伏并网; 逆变器; 最大功率点跟踪

## 0 引言

世界环境的日益恶化和传统能源的日渐枯竭, 促使了对新能源的开发和发展。具有可持续发展的太阳能资源受到了各国的重视, 各国相继出台的新能源法对太阳能发展起到推波助澜的作用。其中, 光伏并网发电具有深远的理论价值和现实意义, 仅在过去五年, 光伏并网电站安装总量已达到数千兆瓦。而连接光伏阵列和电网的光伏并网逆变器便是整个光伏并网发电系统的关键。

本文以光伏并网发电系统为应用背景, 在了解光伏并网发电系统及逆变器的工作原理和特点的前提下, 建立光伏并网发电系统的硬件电路模型, 研究光伏并网逆变器的控制策略, 讨论光伏并网逆变器等的单、三相光伏并网发电系统最大功率点跟踪的方法等。

## 1 光伏发电并网逆变器控制系统的理论分析

### 1.1 太阳能发电并网系统总拓扑图

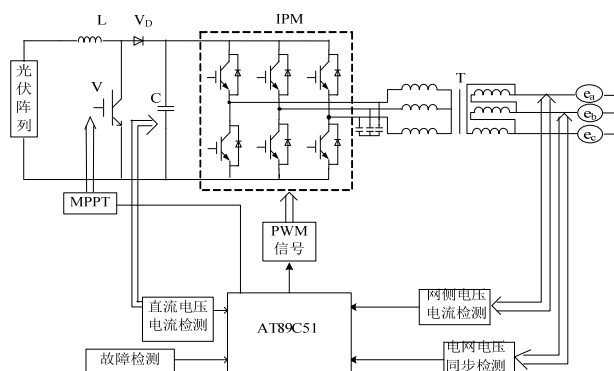


图1 系统总拓扑图

由总拓扑图 1 可以看到, PV 板产生的直流电压经过 DC/DC 变换器升压, MPPT 追踪最大功率点控制后, 经过逆变器变成三相交流电, 通过单片机控制下的电压检测, 负载过电流检测, 在辅助电源的作用下, 使得电能最终送到电网。

### 1.2 逆变器的电路原理

#### 1.2.1 逆变器的电路原理

为了设计并网逆变器控制系统, 先介绍逆变器的电路原理以图 2 的单相桥式逆变电路为例说明最基本的逆变工作原理。图中 SI-- S4 是桥式电路的四个臂, SI-- S4 为开关管。当开关 S1、S4 闭合, S2、S3 断开, 负载电压  $U_o$  为正; 当开关 S1、S4 断开, S2、S3 闭合时, “o 为负, 其波形如图 3 所示。这样, 就把直流电变成了交流电, 而改变两组开关的切换频率, 就可以改变输出交流电的频率。

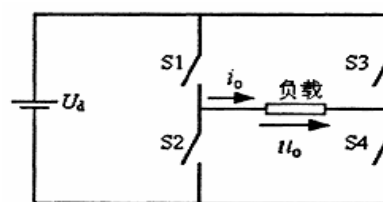


图2 单相桥式逆变电路

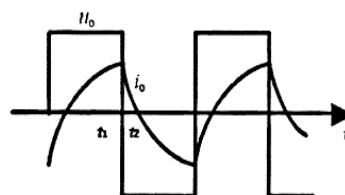


图3 单相桥式逆变电路的输出电压波形

#### 1.2.2 逆变器的逆变传统技术

在三相逆变电路中,应用最多的是三相桥式逆变电路。电压型三相桥式逆变电路如图4所示。

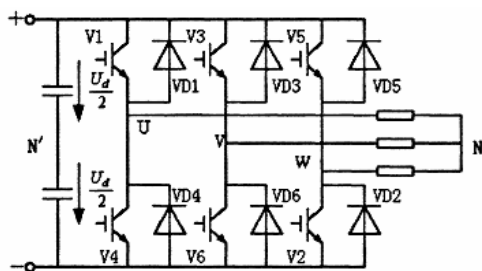


图4 电压型三相桥式逆变电路

三相电压型逆变电路传统的多数采用的工作方式如下: 逆变电路基本工作方式是 $180^\circ$  导电方式, 即每个桥臂的导电角度为 $180^\circ$ , 同一相上下两个臂交替导电, 每相开始导电的时间依次相差 $120^\circ$ , 如此每一瞬间, 将有三个桥臂同时导通。V相和W相的情况和U相相似, 只是相位依次差 $120^\circ$ 。UuN'、UvN'、UwN'的波形如图5所示。

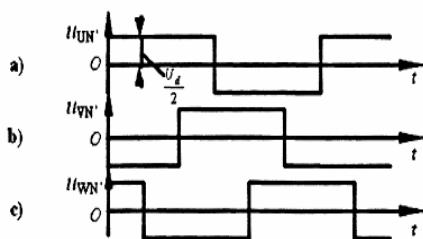


图5 UuN'、UvN'、UwN'的波形

由图 5 可见, 负载相电压的波形为六拍阶梯波, 通过傅立叶分析可知, 此种波形含有很大的谐波分量, 对负载(尤其是交流电动机负载)的工作性能带来很不利的影响。

### 1.2.3 逆变器的 SPWM 控制技术

PWM技术的理论基础是面积等效原理, 即冲量(面积)相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时, 其效果(环节的输出响应波形)基本相同。例如: 如图 6 所示, 有三个窄脉冲, (a)为矩形脉冲, (b)为三角形脉冲, (c)为正弦半波脉冲, 它们形状不同, 但它们的面积(冲量)都等于 1。当它们分别作为图 7(a)具有惯性环节的R-L电路的输入时, 图 7(b)给出了不同窄脉冲时 $i(t)$ 的响应波形。由图中波形可知, 在 $i(t)$ 的上升段, 脉冲波形不同 $i(t)$ 略有不同, 但其下降段几乎完全相同。脉冲越窄则其输出响应波形差异也越小。如果是周期性的

施加上述脉冲, 则其响应波形也是周期性的。

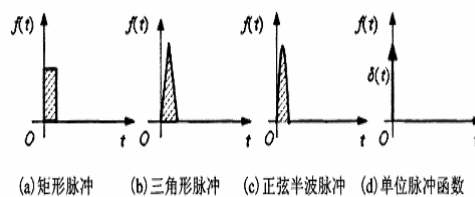


图6 波形不同而冲量相同的各种窄脉冲

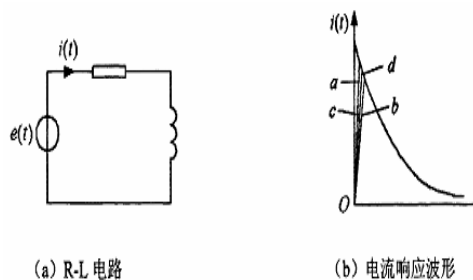


图7 冲量相同的各种窄脉冲的响应波形

本文的 SPWM 信号由单片机控制的 SA4828 产生, 下文将作详细介绍。

## 1.3 并网逆变

### 1.3.1 电路结构

并网逆变器结构如图5所示, 该电路结构由工频或者高频逆变器、工频变压器以及输入、输出滤波器构成。

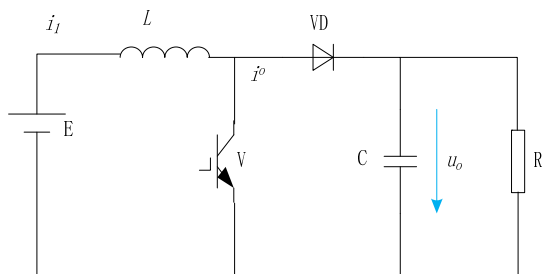
### 1.3.2 系统的总体方案

经过方案的比较论证, 本设计决定采用无变压器的两级结构, 前级DC-DC变换器和后级的DC-AC逆变器, 两部分通过DClink相连。前级DC-DC变换器, 可选择的形式有半桥式、全桥式、推挽式和Boost式, 考虑到输入电压较低, 如采用半桥式则开关管电流变大, 输出电压太低; 而采用全桥式则控制复杂, 开关管功耗增大, 因此这里采用结构简单, 控制方便的Boost升压电路, 它根据电网电压的大小使在不同天气条件下的输入电压达到一个合适的水平, 同时在低压情况下实行最大功率点的跟踪, 增大光伏系统的经济性能。后级的DC-AC逆变器, 采用单相逆变全桥, 作用是将DClink直流电转换成220V-50Hz正弦交流电, 实现逆变向电网输送功率。DClink的作用除了连接DC-DC变换器和DC-AC逆变器, 还实现了功率的传递。控制电路的核心芯片是TI公司TMS320F2407。系统保证并网逆变器输出的正弦电流与电网的相电压同频同相。系统主电路的拓扑电路如图1所示。

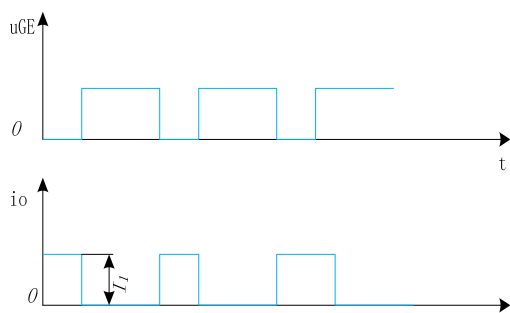
### 1.3.3 前级Boost电路的工作原理

电路原理图见图8。

Boost电路由开关管 $v$ ，二极管 $VD$ ，电感 $L$ ，电容 $C$ 组成，完成将太阳能电池输出的直流电压 $v$ 升压到 $V_{dc}$ ，其原理图如图8（a）所示。



(a) 原理图



(b) 升压斩波电路的工作波形

图8 升压斩波电路的工作原理图

升压斩波电路的工作波形如图8（b）所示。该电路中也是使用一个全控型器件。

分析升压斩波电路的工作原理时，首先假设电路中电感 $L$ 值很大，电容 $C$ 值也很大，当可控开关 $V$ 处于通态时，电源 $E$ 向电感 $L$ 充电，充电电流基本恒定，为 $I_1$ ，同时电容 $C$ 上的电压向负载 $R$ 供电。因此 $C$ 值很大，基本保持输出电压 $u_o$ 为恒值，记为 $U_o$ ，设 $V$ 处于断态时 $E$ 和 $L$ 共同向电容 $C$ 充电并向负载 $R$ 提供能量。设 $V$ 处于断态的时间为 $t_{off}$ ，导通时间为 $t_{on}$ ，则在此期间电感 $L$ 释放的能量 $(U_o - E)I_1t_{off}$ 。当电路工作与稳态时，一个周期 $T$ 中电感 $L$ 积蓄的能量与释放的能量相等，即

$$E I_1 t_{on} = (U_o - E) I_1 t_{off} \quad (1)$$

化简得

$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} = \frac{T}{t_{off}} E \quad (2)$$

式中， $T/t_{off} \geq 1$ ，输出电压高于电源电压，故

称该电路为升压斩波电路

式（2）中 $T/t_{off}$ 表示升压比，调节其大小，即可改变输出电压 $U_o$ 的大小。将升压比的倒数记作

$$\beta, \text{ 即 } \beta = \frac{t_{off}}{T}。$$

因为占空比 $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$ ，则 $\beta$ 和占空比 $\alpha$ 有如下关系

$$\alpha + \beta = 1 \quad (3)$$

因此式（2）可表示为

$$U_o = \frac{1}{\beta} E = \frac{1}{1 - \alpha} E \quad (4)$$

升压斩波电路之所以能是输出电压高于电源电压，关键有两个因素：一是电感 $L$ 储存的能量之后具有使电压泵升的作用，二是电容 $C$ 可将输出电压保持住。在以上分析中，认为 $V$ 处于通态期间的电容 $C$ 的作用使得输出电压 $U_o$ 不变，但实际上 $C$ 值不可能无穷大，在此阶段其向负载放电， $U_o$ 必然会有所下降，故实际输出电压会略低于式（4）所得结果。不过在电容 $C$ 值足够大时，误差很小，可以忽略不计。

如果忽略电路中的损耗，则电源提供的能量仅有负载 $R$ 消耗，负载电流有效值为 $I_0$ ，则

$$E I_1 = U_o I_0 \quad (5)$$

该式表明，与降压斩波电路一样，升压斩波电路也可看成是直流变压器。

根据电路结构得出电流 $I_0$ 为：

$$I_o = \frac{U_o}{R} = \frac{1}{\beta} \frac{E}{R} \quad (6)$$

即可得出电流 $I_1$ 为

$$I_1 = \frac{U_o}{E} I_o = \frac{1}{\beta^2} \frac{E}{R} \quad (7)$$

### 1.3.4 光伏系统最大功率跟踪的方法

日照强度和温度对太阳能电池阵列的开路电压和短路电流有很大的影响，当前光伏电池的光电能量转换效率在实验室条件下最高不超过百分之三十，

为了最大限度的提高光伏发电系统的发电效率，使其功率输出最大化，需要对光伏电池的最大功率点进行跟踪。根据太阳能电池阵列的输出特性功率—电压曲线，可知当阵列工作电压小于最大功率点电压时，阵列输出功率随太阳能电池端电压上升而增加；当阵列工作电压大于最大功率点电压 $U$ 时，阵列输出功率随输出电压上升而减少。因此最大功率点跟踪的实现实质是一个自寻优过程，即通过控制阵列端电压，使阵列能在各种不同的日照和温度环境下智能的输出最大功率。

从直流侧采集电压  $U$  和电流  $I$ ，通过 MPPT 算法并与三角波比较，产生 PWM 波，经过驱动来控制  $V$  (IGBT) 的开关，从而达到最大功率点的控制。

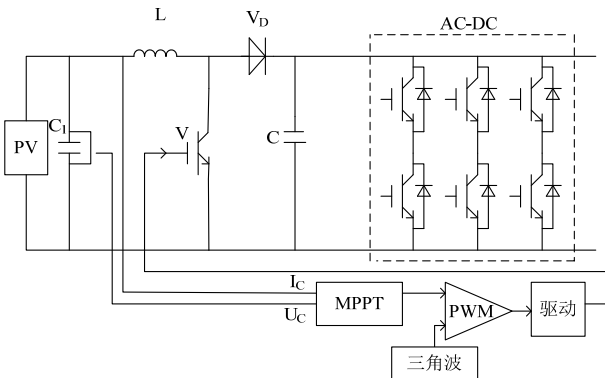


图9 最大功率跟踪原理框图

扰动观察法算法简单，易实现等特点广泛用于最大功率点的跟踪上。扰动观察法的主要思想是通过周期性的给太阳能电池的输出电压 $U$ 加扰动 $\Delta U$ ，比较其输出功率 $P(k)$ 与前一周期的输出功率 $P(k-1)$ 的大小，如果功率增加则在下一个周期以同样方向加扰动，否则 $\Delta U$ 改变扰动的方向。寄存器存放每一周期扰动调整值。首先计算太阳能电池的输出功率 $P(k)$ ，并与上一周期的输出功率比。若只 $P(k)>P(k-1)$ ，则按照相同的方向进行电压调整，从而调整输出电压 $U_{ref}(k)$ 的大小。反之亦然。在实际应用中，也可以通过调节占空比来调节太阳能发电系统输出电压，使系统有最大功率点输出。

图10扰动法的控制流程图采用扰动控制方法实现MPPT，可以动态的跟踪光伏系统的最大功率点输出。

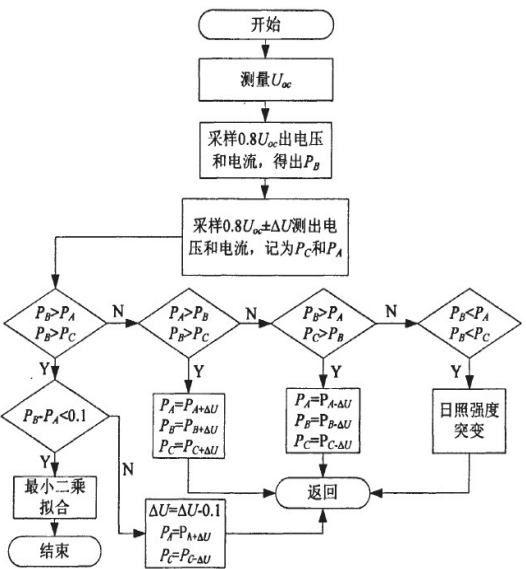


图10 扰动法的控制流程图

1.3.5 逆变器驱动电路

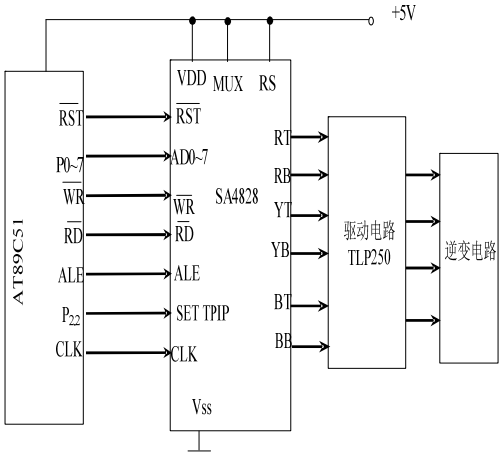


图11 逆变器驱动电路

如图 11 所示，逆变器驱动电路是采用 AT89C51 单片机控制 SA4828 产生 SPWM 调制信号，其中 SA4828 是产生三相 SPWM 信号的专用芯片。驱动电路的主要作用是：当电压不正常时，自动产生 50Hz 两路矩形脉冲电压，这两路矩形脉冲电压相位相差  $180^{\circ}$ ，分别驱动两个 IGBT。

脉宽调制和驱动电路逆变时的电路如图 12 所示，通过改变驱动信号的频率、占空比，就可以改变控制逆变电路的工作情况，实现输出电压的调节。

当电压不正常时，此时 AT89C51 单片机也发控制信号，使得 SA4828 开始工作，发六路脉冲信号控制 IGBT 的开通和关断，同一时刻有三个管子

导通，而同一桥臂的上下两个管子轮流导通 $180^\circ$ ，根据PWM脉宽调制技术，逆变器将输出频率为 $50\text{Hz}$ 的交流电。

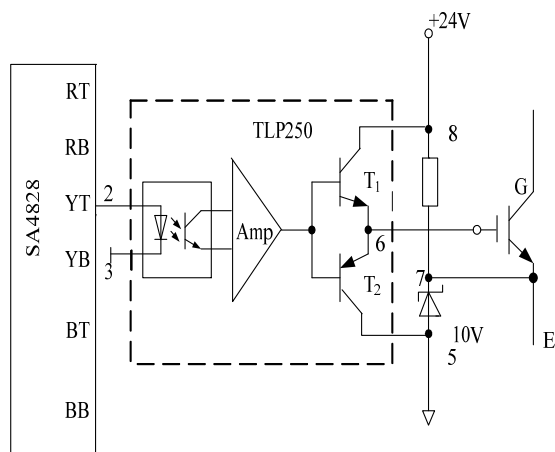


图12 逆变器驱动信号产生电路

## 2 硬件电路

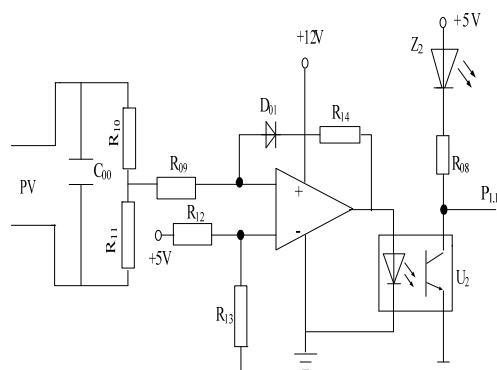


图13 电压检测电路

图13为电压检测的原理图，当太阳能电池板正常工作时，输出电压为 $96\text{V}$ ，加在分压电阻 $R_{10}$ ， $R_{11}$ 上，比较器“+”端电压 $U_+$ 近似为 $2.4\text{V}$ ，“-”端电压近似为 $1.8\text{V}$ ，比较器输出 $+12\text{V}$ 电压，光耦器 $u_2$ 导通，发光二极管 $Z_2$ 承受正向电压，发绿光，输出 $P_{1.1}=0$ ；当太阳能电池板欠压时， $U_+ < 1.8\text{V}$ ，比较器输出为 $0$ ，光耦器 $u_2$ 不通，灯灭，输出 $P_{1.1}=1$ 。

采集Boost电路中电容C两侧的电压值，经电阻接入比较器的“-”端。直流侧电压约为 $240\text{V}$ ，加在管脚2上的电压约为 $2.5\text{V}$ ，而 $+5\text{V}$ 电压加在电阻 $R_{06}$ 上，经 $R_{04}$ ， $R_{05}$ 分压后，加在管脚1上的电压约 $3.0\text{V}$ ，电路设计时，使 $U_1 > U_2$ ，这样管脚3便维持在 $+12\text{V}$ ， $Z_1$ 承受正压，发光，输出 $P_{1.0}=0$ 。

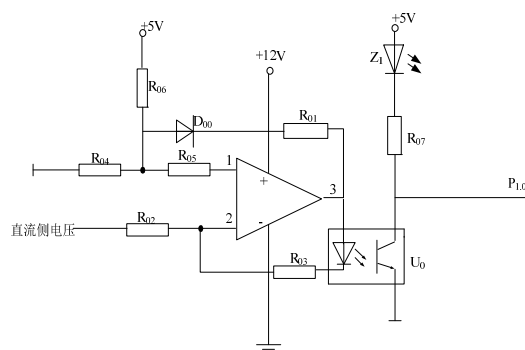


图14 直流侧过电压检测

如图14为直流侧过电压检测电路。当直流侧过压时，管脚2电压也相应的过高，其值比 $3.0\text{V}$ 还有高，此时，管脚3输出电压为 $0\text{V}$ ， $D_{00}$ 导通，发光二极管 $Z_2$ 关断，不发光，输出 $P_{1.0}=1$ 。

当直流侧电压从过压值降到临界电压时，虽然管脚2电压可降到 $3.0\text{V}$ ，但由于管脚1已由 $3.0\text{V}$ 变成了 $2.5\text{V}$ ，因此管脚3仍为 $0\text{V}$ ，只有当交流电压继续下降到一定值的时候，管脚2才降到 $2.5\text{V}$ 以下，3管脚才能从 $0\text{V}$ 上升到 $12\text{V}$ ，此时， $D_{00}$ 截止，1管脚上升到 $3.0\text{V}$ ，准备下一次的过电压检测。

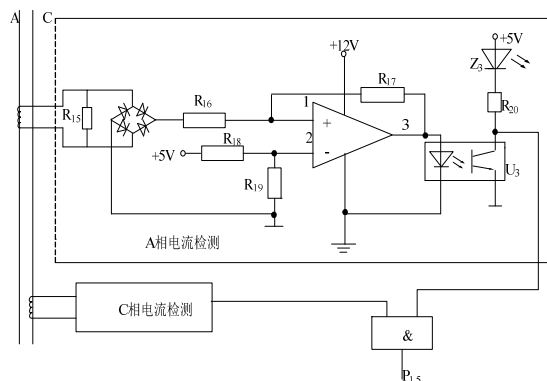


图15 交流侧过电流检测电路

如图15为交流侧过电流检测电路。正常工作状态下，比较器的管脚1点位低于管脚2的点位输出 $0\text{V}$ ，光耦器 $U_3$ 不导通，发光二极管 $Z_3$ 截止，A相输出为“1”的高电平；负载过流时，管脚1电位上升，当高于管脚2的电位，使得“3”端输出 $+12\text{V}$ 电压，光耦器导通，发光二极管 $Z_6$ 发红光，此时A相输出“0”的低电平。

虽然负载是三相电压供电，但由于对称性原理，我们只需要检测其中的两相电流，另外一相电流就很容易获得。为了提高单片机管脚的利用率，

检测电路中加入一个与门, 所检测的A相和C相电流只有在两者都正常工作是才输出 $P_{1.5}=1$ , 只要有任何一相负载过流, 电路中就会亮红灯且 $P_{1.5}=0$ , 输出“0”。

### 3 结论

随着光伏器件价格的不断下降和国家对光伏产业的政策扶持, 光伏发电必将会成为能源结构中的重要组成因素。光伏并网发电系统的研究也必将对光伏产业的发展起到积极的推动作用。因此, 积极的研究和发展太阳能发电技术已成为目前国内外学术界和工业界研究的热点。这种研究的深入也必将为开拓广阔的光伏发电市场和掌握相关领域的先进技术提供更多的理论和现实依据。

#### 参考文献:

- [1] 黄友锐. 单片机原理及应用[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2006.
- [2] 张乃国. UPS 供电系统应用手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 孙哲. 一种实用在线式 UPS 的设计[D]. 大连: 大连理工大学电气专业, 2007.
- [4] 陈静, 何湘宁. 智能 UPS 的研究和发展[J]. 中国电力, 2002: 43-50
- [5] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术(第四版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [6] 王其英, 何春华. UPS 不间断电源剖析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [7] 李成章. 智能化 UPS 供电系统原理与维修[D]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [8] 王其英, 刘秀荣. 新型不停电电源(UPS)的管理和应北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [9] Farrukh Kamran and Thomas G Habetler. A novel n-line UPS with universal filtering capabilities [J]. IEEE, 2002:399-411.
- [10] Dipl-Ing Wilhelm Solter. A new international UPS lassification by IEC 62040-3[J], IEEE, 2001:33-38.
- [11] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [12] R. Cardenas, R. Pena, J.R.S Ruiz, S. Villegas, J. Nahuelquin. An UPS with proper crest factor and ficiency for computer loads [J], IEEE, 2003:1726-1732.
- [13] Dipl-Ing. Stephan Linz, Masterguard KG, Erlangen. Dipl-Ing Stephan Linz, Masterguard KG, Erlangen, A ystem-design for UPS-equipment for long-term backup imes, IEEE, 2003:259-264.
- [14] Sulekhchand, Kusumchawla. EMC evaluation and analysis of UPS [D], 2001:31-38.

#### 作者简介:

沙庭进(1985-), 男, 江苏南京人, 助理工程师, 从事继电保护工作, E-mail: rockknight.sha@hotmail.com。