

# The Research and Discussion of MW-Class Photovoltaic Power Station Design

Jin Xu, Jiayu Yao, Wanli Liu

CSIC Pride (Nan Jing) New Energy Technology Co. Ltd., Nanjing  
Email: [jianyue312@126.com](mailto:jianyue312@126.com)

Received: Oct. 2<sup>nd</sup>, 2014; revised: Oct. 20<sup>th</sup>, 2014; accepted: Nov. 20<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

With the increasing reduction of fossil energy and the serious environmental pollution, the core technology of high-power solar power has become one of the new focuses of energy research. This article mainly aims at introducing the MW-class photovoltaic power generation system and putting forward a feasible design plan. The scheme adopted the monitoring device of RS485 communication mode, monitoring the working environment, operational status and operating parameters in real time, to effectively avoid islanding effect, abnormal voltage and frequency, and other potential risks. In order to verify the feasibility of high-power photovoltaic grid-connected power system, analogue simulation was done using MATLAB/SIMULINK; the simulation and experimental results showed that the MW-class photovoltaic power generation system is not only enlighten and validate the construction of MW-class photovoltaic power station, but also promote the development of photovoltaic power generation system. This paper has studied in detail using MATLAB simulation based on the existing data; the simulation results are of guiding significance for engineering practice.

## Keywords

MW-Class Photovoltaic Power Generation, PV Cell Modules, Grid Inverter Control Equipment, Security Interface, Islanding Detection

---

# MW级光伏电站设计研究及探讨

徐 进, 姚佳雨, 刘婉丽

中船重工鹏力(南京)新能源科技有限公司, 南京  
Email: [jianyue312@126.com](mailto:jianyue312@126.com)

收稿日期：2014年10月2日；修回日期：2014年10月20日；录用日期：2014年11月20日

## 摘要

随着化石能源的日趋减少和环境污染的日趋严重，大功率太阳能发电的核心技术成为新能源研究领域的新热点之一。本文主要针对MW级光伏发电系统进行介绍并且提出一种切实可行的设计方案。该方案采用RS485通讯方式的监控装置，对工作环境、运行状态和运行参数进行实时监控，有效避免了孤岛效应、电压和频率异常等安全隐患。为了验证大功率光伏并网发电系统可行性，运用MATLAB/SIMULINK进行了仿真模拟，仿真与实验结果表明，本MW级光伏发电系统的设计方案不仅对MW级光伏电站的建设起到很好的启示和验证作用，而且对光伏发电系统的发展起到了进一步促进作用。本文研究详细，在已有数据基础上，运用MATLAB进行模拟，模拟结果对工程实践具有指导意义。

## 关键词

MW级光伏发电，PV电池组件，并网逆变控制设备，安全接口，孤岛检测

## 1. 引言

国家“十二五”规划纲要提出坚持把建设资源节约型、环境友好型社会最为加快转变经济发展方式的重要着力点。随着化石能源的日趋减少和环境污染的日趋严重，人类急需一种清洁、可再生的能源替代品。太阳能作为一种取之不尽、用之不竭的清洁能源受到了国际上广大科研技术人员的关注。

现如今，各个国家都在发展太阳能发电技术。中国虽然在这个领域起步较晚，但是由于其有利的地理环境优势和技术人员的努力，发展非常迅速。目前中国已成为全球最大的光伏产业基地，2011年全国太阳能发电总量已达到1.1GW，占全球太阳能发电总量的27.5%。不过在大功率太阳能发电的核心技术上和国外还是有一定的差距。

本文主要针对MW级光伏发电系统进行介绍并且提出一种可行的设计方案。对于MW级的大型太阳能光伏并网电站[1]，一般需要由太阳能电池组件、并网逆变控制设备和安全保护装置三大部分组成。其中，并网逆变控制设备主要包括光伏阵列防雷汇流箱、直流防雷配电柜、并网逆变器和并网监控装置等设备。

## 2. 光伏发电原理

太阳能发电主要有两种方式：光伏发电和光热发电。在发展初期，多是采用光热发电，但随着晶体硅等光伏材料的发展与应用，光伏发电转换效率高、控制方便、安装简单等优势越来越明显，现如今已被广泛使用。

光伏发电系统，常使用以晶体硅为主的光伏材料作太阳能电池组件，然后由汇流箱和逆变器，将直流电逆变成和电网同频同相的交流电，最后由升压变压器将输入电压升至电网电压进行并网。光伏发电原理图[2]见图1。

## 3. 总体设计方案

针对MW级太阳能光伏发电系统，本文采用了分块发电、集中并网的设计方案，即将系统分成10个100KW的并网发电单元，每个100KW的并网发电单元都接入10KV升压站的0.4KV低压配电柜，经过0.4KV/10KV(1250KVA)变压器升压装置，最终实现整个并网发电系统并入10KV中压交流电网。系统设计框图见图2。这样就将MW级大功率的光伏发电系统转换成10个100KW发电系统并联，每个

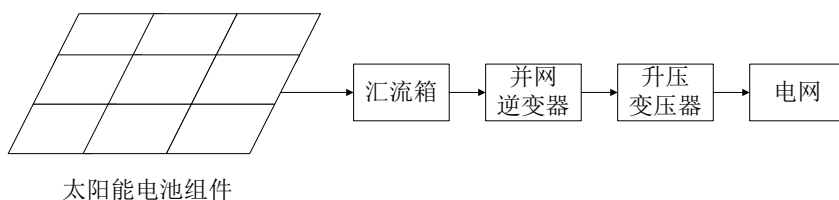


Figure 1. Photovoltaic power generation principle diagram

图 1. 光伏发电原理图

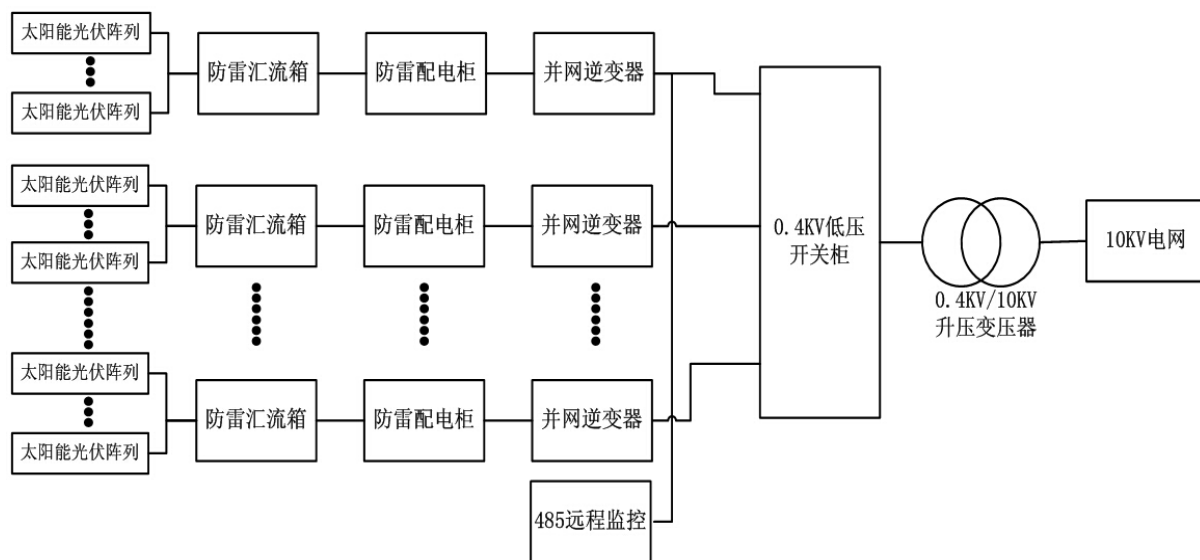


Figure 2. The system design diagram

图 2. 系统设计框图

发电单元都加有防雷配电柜，这样即使有发电单元出现故障时，也不会影响其余发电单元正常工作，保证了系统的工作稳定性和效率。

### 3.1. 太阳能电池板组件

光伏电池板的基本特性和二极管类似，将每一块电池板进行串、并联封装后就成为了电池组件，将电池组件再串、并联封装后就形成了光伏阵列。图 3 为光伏电池等效电路。

图 3 中可以得出流过负载  $R$  的电流为：

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

其中：

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中， $I_0$ ——反向饱和电流(数量级一般为  $10^{-4}$  A)；

$q$ ——电子电荷( $1.6 \times 10^{-19}$  C)；

$R_s$ ——光伏电池串联电阻；

PN 结理想因子;

$K$  ——波尔兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K);

$T$  ——绝对温度;

$R_{sh}$  ——光伏电池并联电阻。

所以综合上式(1)、式(2)和式(3)可知:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

太阳能电池组件以常用的 180 Wp/35 V 多晶硅光伏电池板为例, 每个发电单元为 100 KW, 所以每个发电单元至少需要 560 块多晶硅光伏电池板, 这样以每 14 块电池组件串联作为一个光伏阵列, 则一个发电单元就需要 40 个光伏阵列。经计算整个光伏发电系统供需 400 个光伏阵列, 即 5600 块多晶硅光伏组件, 实际发电功率约为 1.008 MWp。

在 MATLAB/SIMULINK 仿真环境下, 根据光伏电池板特性方程, 共设有了 7 个输入量:  $T$ 、 $Q$ 、 $V$ 、 $V_m$ 、 $I_m$ 、 $V_{oc}$ 、 $I_{sc}$ , 输出量为  $I$ 。以 MATLAB function 模块作为 PV 光伏阵列, 内部以 m 文件编写光伏电池板特性方程程序。PV 电池板模型见图 4, 内部 m 文件程序见下:

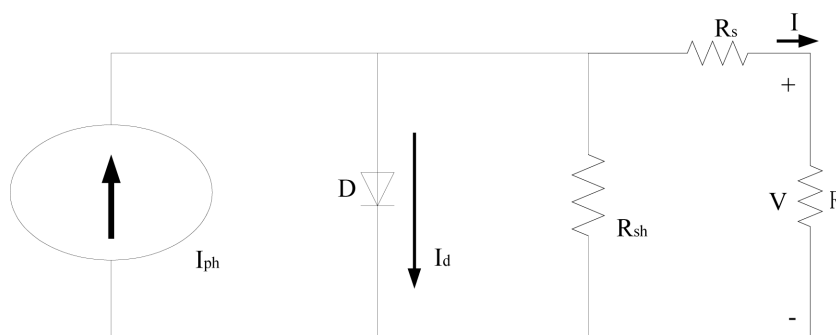


Figure 3. Equivalent circuit of photovoltaic cells  
图 3. 光伏电池等效电路

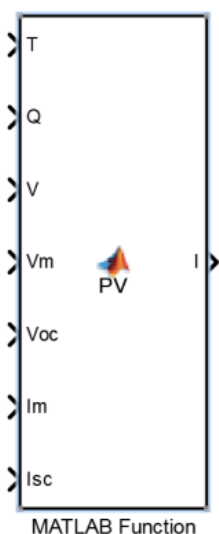


Figure 4. PV battery plate model  
图 4. PV 电池板模型

$$\begin{aligned}
 t &= T - 25; \\
 c2 &= (V_m / V_{oc} - 1) * \ln(1 - I_m / I_{sc}); \\
 c1 &= (1 - I_m / I_{sc}) * \exp(-V_m / (c2 * V_{oc})); \\
 a &= 0.0012 * I_{sc}; \\
 b &= 0.005 * V_{oc}; \\
 i &= a * (Q / 1000)^t + (Q / 1000 - 1) * 7.65; \\
 v &= -b * t - i; \\
 I &= 7.65 * (1 - c1 * (\exp((V - v) / (c2 * V_{oc})) - 1)) + i; \\
 P &= V * I;
 \end{aligned}$$

### 3.2. 最大功率跟踪控制算法 MPPT

由于光伏电池板受到日照强度和温度等因素影响，所以其输出具有明显的非线性，当温度增加时，光伏电池的开路电压下降，短路电流只是稍有增加，最大输出功率增加；当日照强度增加时，光伏电池开路电压变化不大，短路电流增加，最大输出功率增大，所以在一定温度和日照强度下，光伏电池具有唯一的最大功率点。

MPPT 控制算法[3]就是实时跟踪最大功率点的过程，即通过控制光伏电池端电压来控制最大输出功率[4]，图 5 为光伏阵列的输出功率特性曲线。

常见的 MPPT 控制方法有：电压跟踪法、扰动观察法和增量电导法。扰动观察法相对于其他控制方法具有控制方便，涉及参数少，虽然由于控制中有  $\Delta t$  的存在导致部分功率损耗但将  $\Delta t$  设的较小，相应损耗也会较低。扰动观察法程序框图见图 6，SIMULINK 仿真模型见图 7。

### 3.3. 并网逆变器

并网逆变器是本系统的核心，主要作用是将直流电逆变成和电网同频同相的交流电。并网逆变器结构图见图 8，仿真[5]模型见图 9。

逆变控制器使用电压电流双闭环反馈调节控制算法，电压外环采用 PI 调节，电压内环采用 P 调节。其中 PI 调节器控制电容输出电压  $u_{inv}$  跟踪基准正弦波  $u_{ref}$  的变化，器输出作为电流给定  $i_{ref}$ ；P 调节器控制电感电流  $i_L$  跟踪  $i_{ref}$  的变化，提高系统动态响应过程。电压电流双闭环反馈控制框图如图 10。

并网逆变器工作过程[6]如下：

- 1) 首先对直流侧和网侧电压进行电压检测，发现网侧电压满足并网要求(49.5 Hz~50.2 Hz 频率，锁相)，同时直流侧电压也满足并网要求，若不符合并网要求则进行 Boost 升压，逆变器进入待机状态；
- 2) 在待机状态下检测漏电流，绝缘电阻，水冷散热系统运行状态(无故障)，延迟一段时间后，系统进入软启动运行状态；
- 3) 系统进入软启动运行后，逆变器进行逆变软启，数分钟内达到额定功率，到达电池板的大概最大跟踪电压范围后，系统进入 MPPT [7]跟踪稳定运行，并和远程监控终端进行信息交换；
- 4) 系统因各种原因脱网或故障，逆变系统在故障排除后，暂停数分钟，继续返回第 1 步进行并网运行操作。

## 4. 安全保护装置

由逆变器输出的交流电必须和电网同频同相，电压相等，才能进行并网动作。本系统的监控使用 RS485 通讯方式，对于逆变器，其监控软件可实时显示工作状态和运行参数；对于光伏阵列现场的环境

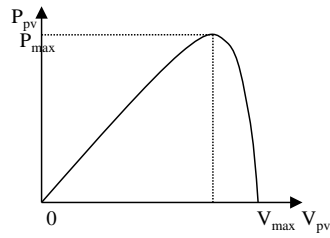


Figure 5. The characteristic curve of outputted power  
图 5. 光伏阵列的输出功率特性曲线

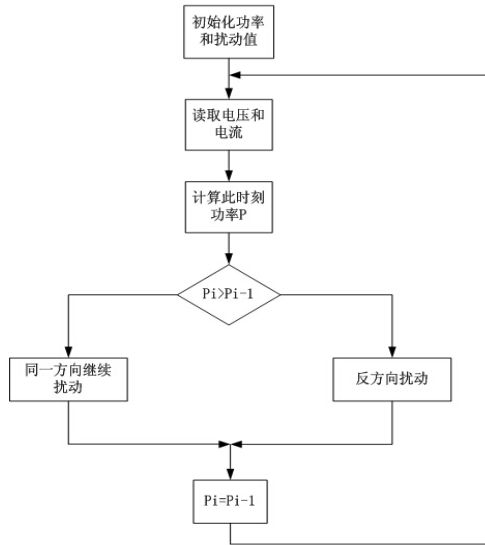


Figure 6. The program chart of disturbance observation method  
图 6. 扰动观察法程序框图

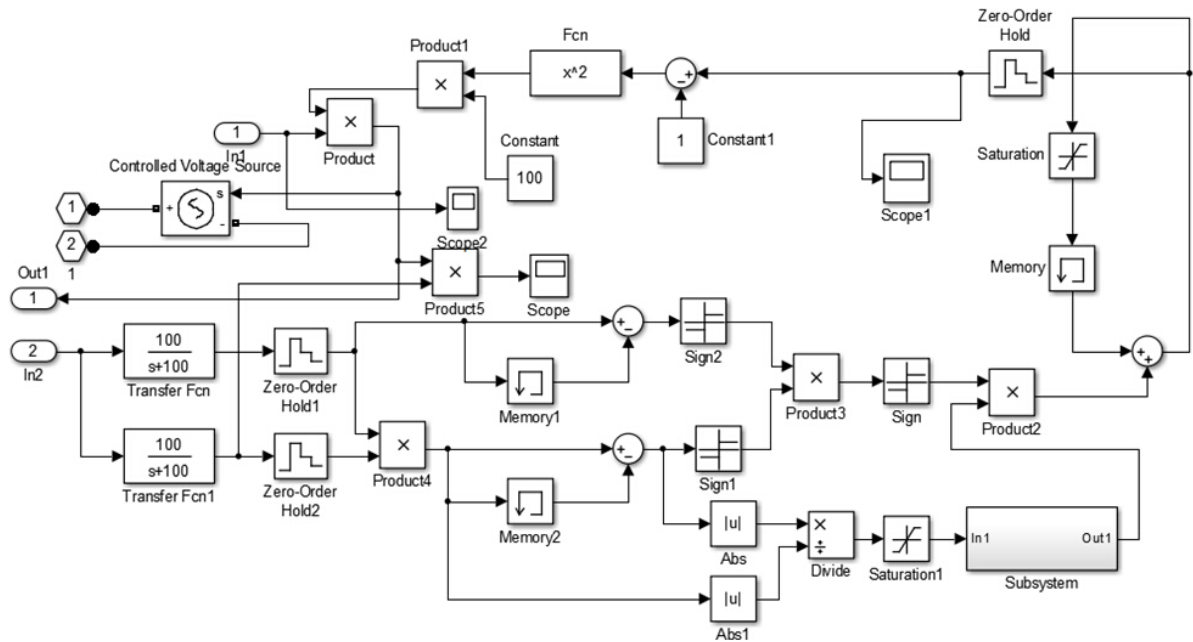


Figure 7. The SIMULINK simulation model of perturbation method  
图 7. 扰动法 SIMULINK 仿真模型

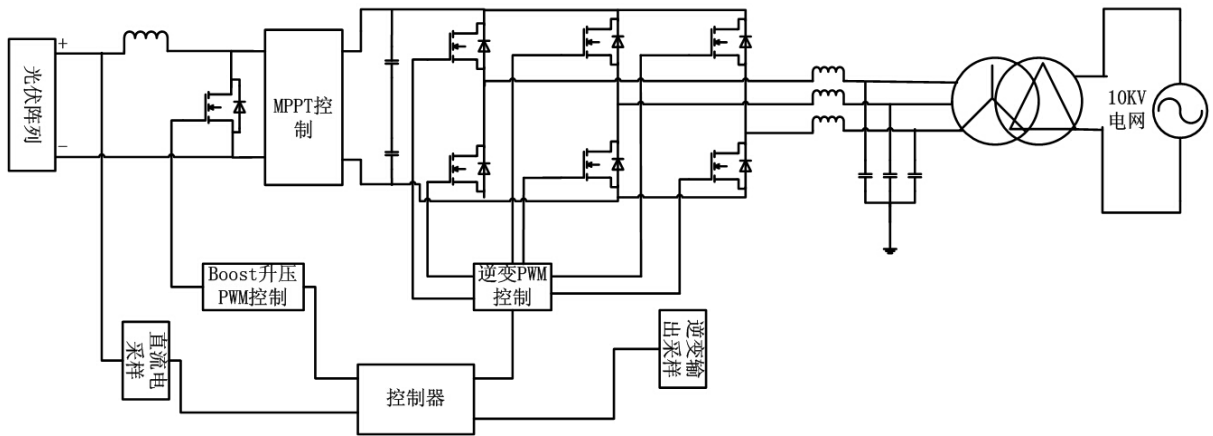


Figure 8. The structure diagram of grid inverter  
图 8. 并网逆变器结构图

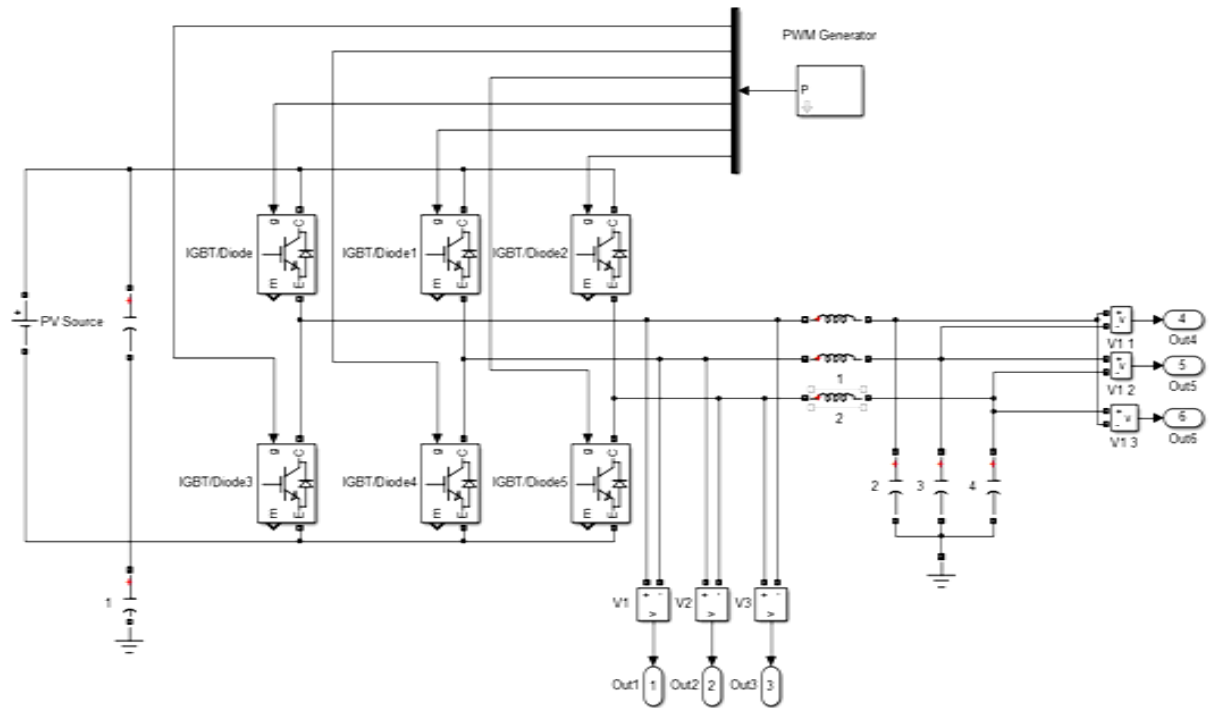


Figure 9. The simulation model of grid inverter  
图 9. 并网逆变器仿真模型

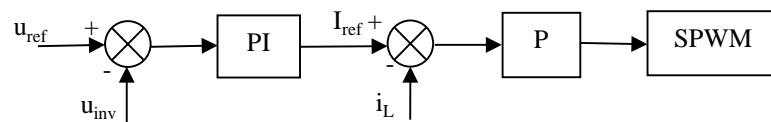


Figure 10. The control block diagram of voltage and current double closed-loop feedback  
图 10. 电压电流双闭环反馈控制框图

参数(含风速、风向、日照强度、环境温度), 可通过选配的环境监测仪采集。监控板采集到的数据可由路由器及光纤转换器最后经 TCP/IP 方式传输给总监控。

光伏并网存在潜在危险[8]——孤岛效应，是指电网由于电气故障或自然因素等原因中断供电时逆变器仍向电网传输电能，和本地负载形成一个公共电网系统无法控制的自给供电孤岛。孤岛效应的发生会危及人身及设备的安全，为了避免这些危害，其检测必须要求准确而且快速，以便保护动作有效的采取。

目前，孤岛检测方法的基本思想为监测公共耦合点的电压、频率、相位等信息是否越过电力系统规定的并网正常范围，一旦超出正常范围之外，认为电网运行发生异常，反孤岛保护动作。本系统采用了以中组合式孤岛检测方法，该方法原理是通过给无功电流给定世家扰动当逆变器离网后，由于失去锁相环控制，导致并网点电压频率发生改变，从而做出判断是否形成孤岛。

## 5. 仿真结果分析

为了验证大功率光伏并网发电系统可行性，现使用 MATLAB/SIMULINK 进行仿真[9]。

### 5.1. PV 光伏电池板仿真结果分析

光伏电池板参数按照型号的光伏电池板设定，温度  $25^{\circ}\text{C}$ ，光照  $1000\text{ W/p}$ ，此时 U-P 仿真结果见图 11。从图中可以看见，结果符合一般光伏电池板的特征方程，且当功率达到最大功率  $P_m$  为  $119.8056\text{ W}$  (理论： $120\text{ W}$ )时，峰值电电流为  $7.6499\text{ A}$  (理论： $7.65\text{ A}$ )。

### 5.2. MPPT 仿真

本系统使用的 MPPT 控制算法为扰动法，由于扰动法是给输入一个扰动从而检测功率变化进而判断系统是否工作在最大功率点附近。扰动法仿真[10]结果见图 12。从图中可以看见功率围绕  $120\text{ W}$  上下浮动，是符合要求的。

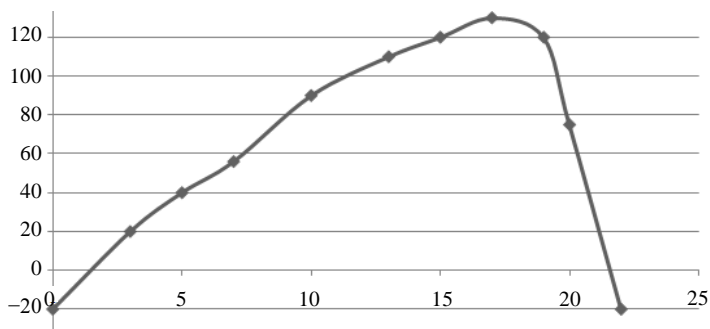


Figure 11. The result of U-P simulation

图 11. U-P 仿真结果

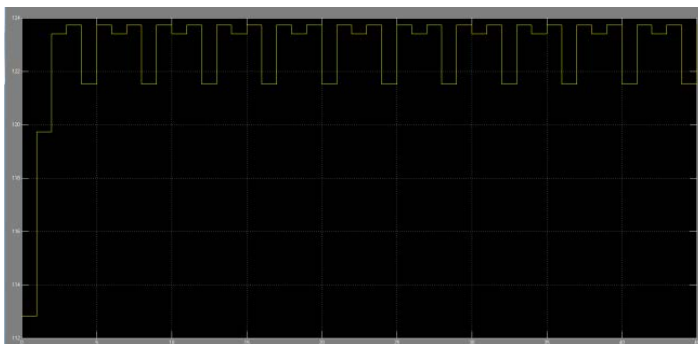


Figure 12. The simulation results of perturbation method

图 12. 扰动法仿真结果



### 5.3. 系统仿真

系统整体仿真是模拟发电站从发电到并网的整体过程，是为了检验该方案的理论可行性，对结果进行分析。仿真结果逆变方波见图 13，仿真结果逆变正弦波见图 14，其中第一幅图为 10 KV 电网波形，第二幅图是发电站输出 0.4 V 波形，第三幅图是逆变输出电压波形。从图中可以看出发电站输出电压与电网电压同频同相。逆变输出电压由于受到滤波器电感影响，在前 4 个周期波形会逐渐上升，然后会有 1~2 个周期的超调，但随后逆变电压会稳定在 400 V 左右，整体效果良好不影响系统正常运行。

### 5.4. 实物平台

通过仿真实验发现，仿真结果良好，效率达到 99% 以上，THD 小于 2%，为了更好地验证设计方案的可行性，我们搭建了一个小型实验平台，实物图见图 15，实物运行结果见图 16。从图中可以发现，在进行实物正常运行时，频率范围在 49.5 Hz~50.5 Hz，最大效率仍然可达 99%，THD 小于 3%，最大功率因数为 0.99，可见该设计方案成功的。

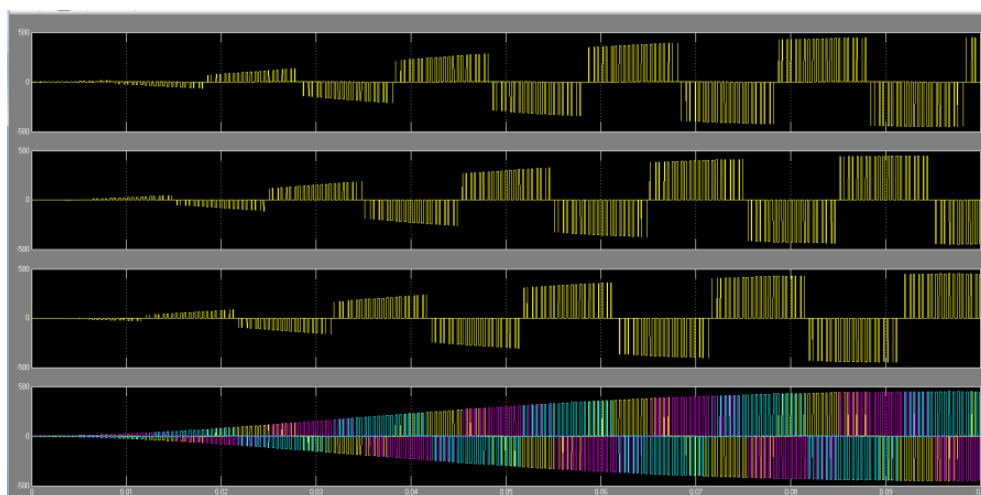


Figure 13. The simulation results inverted square wave

图 13. 仿真结果逆变方波

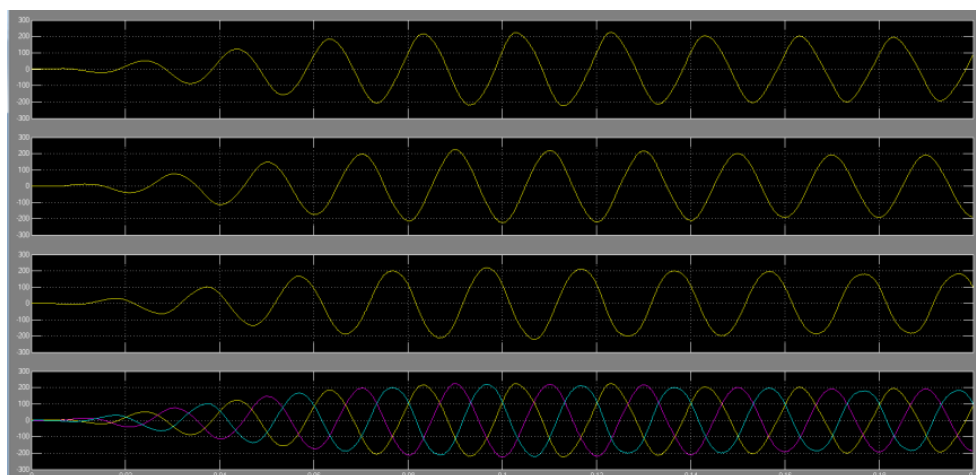


Figure 14. The simulation results inverter sine wave

图 14. 仿真结果逆变正弦波



Figure 15. The real figure  
图 15. 实物图

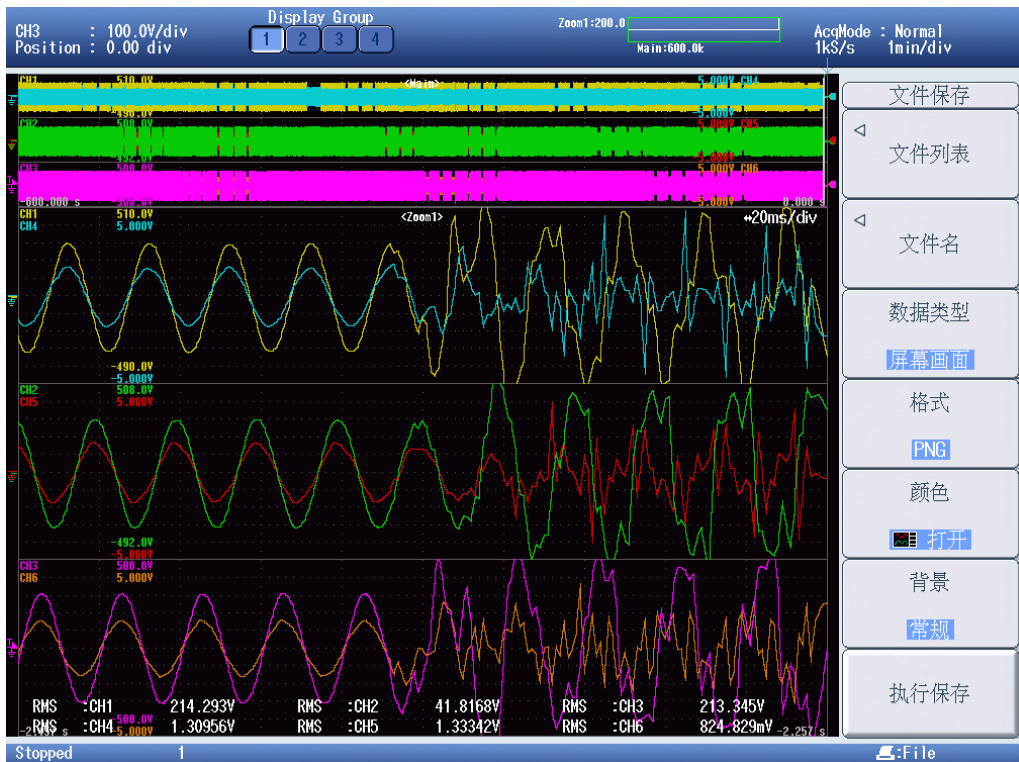


Figure 16. The real operation result  
图 16. 实物运行结果

## 6. 结论

MW 级光伏电站的发展将有助于改善目前能源日趋紧张的现状，是未来很长一段时期内不可忽视的电力能源发展方向。本 MW 级光伏发电系统的设计方案不仅对 MW 级光伏电站的建设起到很好的启示和验证作用，而且对光伏发电系统的发展起到了进一步促进作用。

## 参考文献 (References)

- [1] 战杰, 董存, 张彦, 马梦朝, 赵义术 (2011) MW 级光伏电站建模及其并网对配电网的影响分析. *山东电力高等专科学校学报*, **1**, 1-6.
- [2] Román, E. and Alonso, R. (2006) Intelligent PV module for grid-connected PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **53**, 1066-1073.
- [3] 苏海滨, 卞晶晶, 刘强, 卜自珍 (2010) 基于神经网络的光伏发电最大功率点跟踪算法. *华北水利水电学院学报*, **6**, 80-83.
- [4] Hamrouni, N., Jraidi, M., Cherif, A. and Dhouib, A. (2006) Measurements and simulation of a PV pumping systems parameters using MPPT and PWM control strategies. *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, 16-19 May 2006, 885-888.
- [5] 林少华, 许红华 (2008) 基于电网电压前馈的光伏并网逆变器的仿真与实现. *可再生能源*, **4**, 10-12.
- [6] 叶秋香 (2006) 光伏电池最大功率跟踪器的模糊控制及其应用. 硕士学位论文, 东华大学, 上海.
- [7] 安海云 (2007) 光伏并网发电系统中最大功率跟踪控制方法的研究. 硕士学位论文, 天津大学, 天津.
- [8] Tan, Y.T. (2004) Impact on the power system with a large penetration of photovoltaic generation. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 24-28 June 2007, 1-8.
- [9] 焦阳, 宋强, 刘文华 (2010) 光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真. *电网技术*, **11**, 198-202.
- [10] 姜丰 (2012) 光伏发电系统 MPPT 自适应变步长方法的仿真与研究. 三峡大学, 宜昌.