

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.04.005

# 基于事件驱动的光伏发电系统电压稳定控制

李俊<sup>1</sup>, 刘斌<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对光伏发电系统内由于环境中光能的不稳定性而导致光伏发电系统输出的电能质量波动问题, 提出了一种利用蓄电池作为能量补充的方法, 对光伏电池的输出功率进行削峰填谷, 从而稳定输出的电能质量。该方法基于事件驱动策略, 通过设置电压阈值以驱动蓄电池处于充电、放电、停止3种工作模式。最后, 利用仿真软件建立了光伏电池和蓄电池模型, 并在此基础上设计了事件驱动控制器, 通过模型与控制器的结合, 对所提方案进行了仿真研究。仿真结果表明, 这种方法不仅能稳定电压, 而且能降低蓄电池的充放电次数, 有利于延长蓄电池的使用寿命。

**关键词:** 光伏发电系统; 电压稳定; 事件驱动

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)04-0033-07

## Voltage Stability Control of Event-Driven Photovoltaic System

LI Jun<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of such flaws as the fluctuation of the output of photovoltaic power system due to the instability of the light energy in the photovoltaic system, a proposal has been made of using the battery as the energy supplement. The peaked load shifting of the output power of photovoltaic cells helps to stabilize the output power quality. Based on event-driven strategy, this method sets the voltage threshold to drive the battery to operate in 3 modes: charging, discharging, and stopping. Finally, the model of photovoltaic cell and battery is to be established by using the simulation software, with an event-driven controller designed on this basis as well. A simulation of the proposed scheme has been carried out based on the combination of the model and the controller. The simulation results show that this method helps to stabilize the voltage, and reduce the charge and discharge times of the battery, which is conducive to prolonging the service life of the battery.

**Keywords:** photovoltaic system; voltage stability; event-driven

## 0 引言

随着科学技术的不断进步, 人类对能源的需求量越来越大, 传统的不可再生能源日益枯竭, 在不久的将来, 人类很可能面临能源危机。此外, 传统的

发电方式, 尤其是火力发电, 在一定程度上破坏了人类赖以生存的环境, 存在着不容忽视的污染问题。为了缓解世界能源的匮乏、能源利用与环境保护之间的矛盾, 世界各国都鼓励开发应用新能源, 如太阳能、

收稿日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673165)

作者简介: 李俊(1993-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统及其自动化,

E-mail: 960883033@qq.com

风能等,并取得了突破性进展<sup>[1-2]</sup>。

太阳能是一种可再生、无污染的能源,不仅不会污染环境,而且还具有良好的生态效益。因此,为了提高能源的利用效率、加强对可再生能源的使用,许多国家展开了对太阳能的开发和利用研究。利用太阳能发电的方式有很多,其中最典型的是太阳能热发电和太阳能光伏发电,后者又称为光伏电池<sup>[1]</sup>。利用光伏电池构建的光伏发电系统对环境和社会的可持续发展有着重要意义,但是这一类可再生能源的不稳定性所带来的问题却亟待解决。因此,本文在光伏发电与蓄电池互补的基础上,建立了一种事件驱动机制,即通过设置电压阈值以驱动蓄电池处于充电、放电、停止3种工作模式。并利用仿真软件建立了光伏电池和蓄电池模型,通过模型与事件驱动控制器的结合,对所提方案进行了仿真研究。仿真结果表明,该机制的运用,不仅能稳定光伏发电系统的电能质量,而且能减小蓄电池的充放电压力,有利于延长蓄电池的使用寿命。

## 1 事件驱动策略

### 1.1 事件驱动策略介绍

事件驱动的概念最早出现在计算机领域中,随后在金融、管理、控制等多个领域中得到了不断地发展。所谓事件,是指在这个系统内部或外部一个所关注的事情,它可能代表着一个已经发生或者即将发生的问题、阈值、偏差等<sup>[3]</sup>。据此,本研究拟将事件驱动应用于光伏发电系统中。通过检测母线电压的波动程度形成事件,然后对储能装置(本研究采用蓄电池)发出充放电命令。

根据事件驱动的控制策略构建了整个光伏发电系统结构,如图1所示。

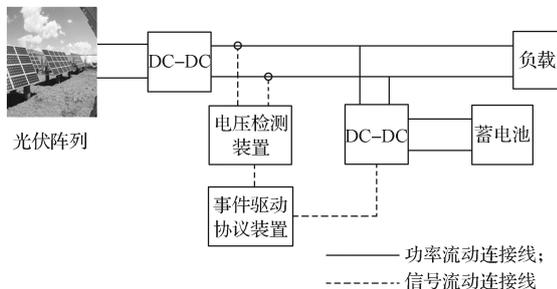


图1 光伏发电系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of photovoltaic power generation system

图1中直流-直流(DC-DC)环节采用升压斩波电路,以达到对光伏电池的最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)目的,同时达到升压效果。

之后,电压检测装置将检测到的电压信号传递给事件驱动协议装置,以判断是否有事件发生以及是哪一个事件发生,进而决定蓄电池的工作状态。

### 1.2 事件驱动协议设计

本文基于光伏发电与蓄电池互补模型,设计了事件驱动协议,如表1所示。且令常数 $\alpha_{\max}>1$ , $\alpha_{\min}<1$ , $U(t)$ 为 $t$ 时刻的系统电压, $U^*(t)=U(t)/U_n$ 为电压标么值, $U_n$ 为系统电压的基准值。

表1 事件驱动协议

Table 1 Event-driven protocol

事件类型	定义	发出命令
电压过高	$U^*(t) > \alpha_{\max}$	电池充电
电压正常	$\alpha_{\min} \leq U^*(t) \leq \alpha_{\max}$	电池停止工作
电压过低	$U^*(t) < \alpha_{\min}$	电池放电

系统电压过高时,蓄电池充电,吸收多余的能量;系统电压正常时,蓄电池停止工作;系统电压过低时,蓄电池放电,补充系统能量的不足。表1中, $\alpha_{\max}>1$ , $\alpha_{\min}<1$ ,可以通过合理设置 $\alpha_{\max}$ 与 $\alpha_{\min}$ 的值来实现对电压的稳定性要求。显然,蓄电池会有一些的时间处于停止工作状态,但因此时系统电压为正常状态,故不会影响电能质量。

## 2 光伏发电系统模型的构建

光伏发电系统是由许多的光伏电池单元组合而成的。因单个的光伏电池输出的电压和电流都很低,以至于其输出的功率也很低,所以需要搭建光伏模块。光伏模块由许多的光伏电池单元通过串并联而构成,从而使模块的输出电压可以达到十几伏至几十伏;光伏模块又可以通过串、并联后得到光伏阵列,它是一种直流电源<sup>[1]</sup>。

### 2.1 光伏电池模型

常用光伏电池的等效电路如图2所示,图中 $U$ 为光伏电池输出电压, $I_{ph}$ 为光生电流源电流, $D$ 为二极管, $R_s$ 为串联电阻, $R_{sh}$ 为并联电阻。不可忽略的是:由于此处的二极管不是标准二极管,其导通和关断状态与电流具有一定的非线性关系。

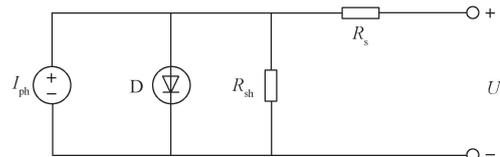


图2 光伏电池等效电路模型

Fig. 2 An equivalent model of the photovoltaic cell

光伏电池的内部电阻损耗可用等效的办法替代,例如,在理想的光伏电池中,可以用串联电阻 $R_s$ 和并联电阻 $R_{sh}$ 来模拟。通过查阅资料,可得相应的伏

安关系<sup>[1]</sup>如下:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (1)$$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 - U_D/R_{sh} - U_D/R_s,$$

并且有

$$U_{oc} = (AKT/q) \cdot \ln(I_{sc}/I_0 + 1)$$

式中:  $I$  为光伏电池输出电流;

$I_0$  为二极管饱和电流;

$q$  为电子电量常量;

$k$  为玻尔兹曼常量;

$T$  为绝对温度;

$A$  为二极管特性拟合系数, 其值一般在 1~2 之间

变化;

$I_{sc}$  为光伏电池的短路电流;

$U_D$  为二极管 D 两端的电压;

$U_{oc}$  为光伏电池的开路电压。

因为光伏电池的工作参数会随着外界环境的变化而改变。即当环境中光照强度和温度等发生变化时, 光伏电池的参数也会随着改变。且环境温度和光照强度的影响经常同时存在, 所以实际应用中使用的数学模型一般采用厂商所提供的如下参数进行搭建:

$U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $U_m$ 、 $I_m$ , 其中  $U_m$  为最大功率点电压,  $I_m$  为最大功率点电流。故式 (1) 可以简化成如下近似的、

比较实用的模型<sup>[4]</sup>:

$$I = I_{sc} \times \left\{ 1 - C_1 \left[ e^{\left( \frac{U}{C_2 U_{oc}} \right)} - 1 \right] \right\}, \quad (2)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$  为系数, 且

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}},$$

$$C_2 = \left( \frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) / \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)$$

由于光伏电池的特殊性, 其电池的参数需要在光照强度和与温度发生变化时重新进行计算, 分别用  $I'_{sc}$ 、 $U'_{oc}$ 、 $I'_m$ 、 $U'_m$  表示, 其公式如下:

$$T' = T - T_{ref},$$

$$S' = S/S_{ref},$$

$$I'_{sc} = I_{sc} (S/S_{ref}) (1 + a * \Delta T),$$

$$U'_{oc} = U_{oc} (1 - c * T') \ln(1 + b * S'),$$

$$I'_m = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + a * \Delta T),$$

$$U'_m = U_m (1 - c * T') \ln(1 + b * S').$$

式中系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  取如下常用值,  $a=0.0025/K$ ,  $b=0.5$ ,  $c=0.0028/K$ 。

根据上述公式, 可以得出如图 3 所示的光伏电池的 Simulink 仿真模型。

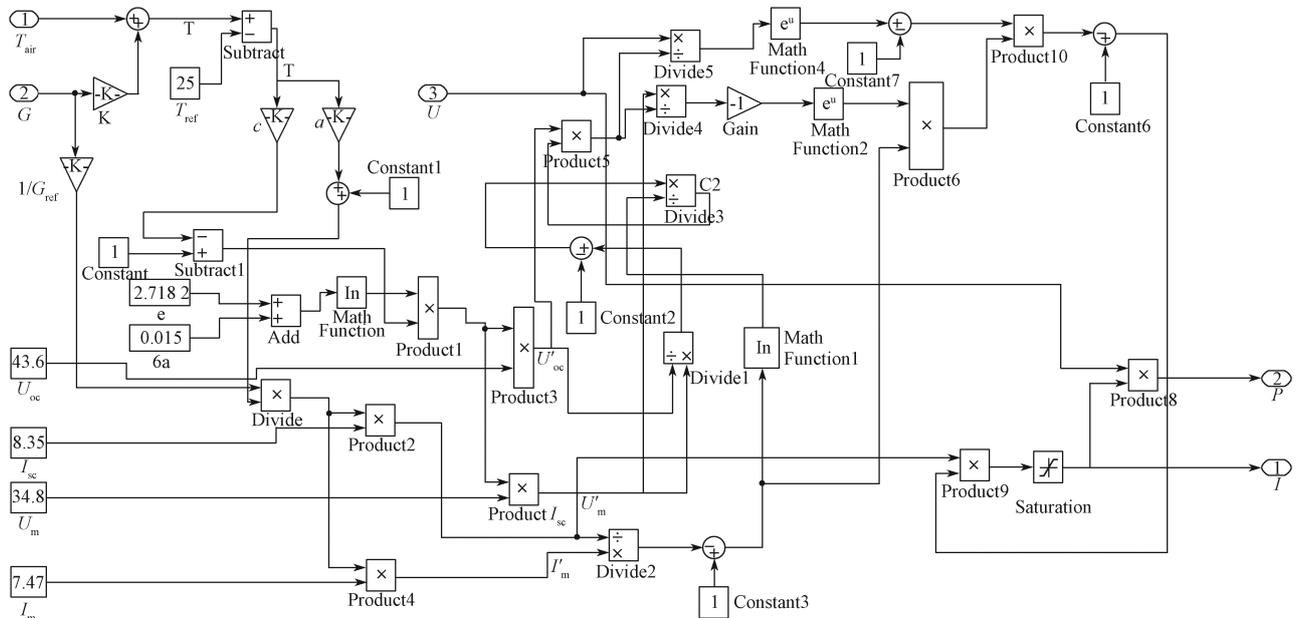


图3 光伏电池 Simulink 模型

Fig. 3 Simulink model of the photovoltaic cell

此处选取  $T_{ref}=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $S_{ref}=1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , 对模型中各个模块进行相应的参数设置, 并进行仿真, 可以得到该环境条件下光伏电池输出的 PV 特性曲线, 如

图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 随着光伏电池输出端电压的不断增大, 光伏电池的输出功率首先随之增加, 一直

增加到一个临界点，即最大功率点；但是超过最大功率点后，继续增大光伏电池输出端的电压，光伏电池输出的功率反而会随之迅速下降。所以，在实际运行的光伏发电系统中，应尽量通过负载匹配以使整个光伏发电系统运行在最大功率点附近，以最大限度地提高系统的运行效率。

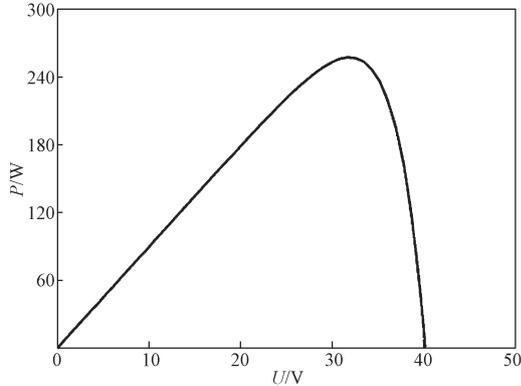


图4 光伏电池的PV特性曲线

Fig. 4 PV characteristic curve of the photovoltaic cell

### 2.2 最大功率点追踪方法

通过上述分析了解到，只有使光伏电池一直工作在最大功率点附近，才能使得光伏电池最大限度地太阳能转换为电能。事实上，关于最大功率点追踪控制，就是通过利用一些有效的控制策略，保证系统一直工作在最大功率输出状态，以便最大限度地利用太阳能。

到目前为止，科研工作者们已经提出了多种最大功率点追踪算法，如增量电导法<sup>[1]</sup>、扰动观测法<sup>[5]</sup>等。本研究拟采用扰动观测法，图5所示为设定的扰动观

测法流程图。

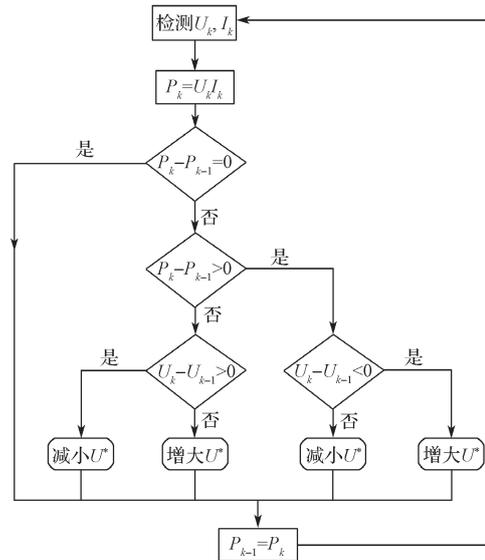


图5 扰动观测法流程图

Fig. 5 Flow chart of the perturbation observation method

扰动观测法的工作原理如下：每过一个周期，向光伏阵列端电压施加一个给定大小的增量或减量；然后，观察光伏电池的输出功率是增加还是减小，进而决定下一步是增加输出端电压还是减小其电压。如果光伏电池的输出功率增加，则继续朝着相同的方向改变工作电压；如果光伏电池输出的功率减小，则朝着相反的方向改变电压。

采用扰动观测算法的 Simulink 仿真模型如图6所示，其中  $C_p$  为扰动的最小步长单位，本研究中其值取 0.01。

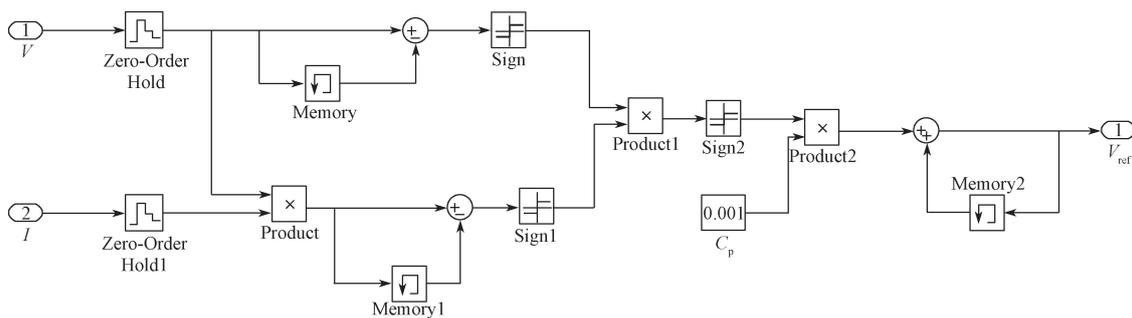


图6 扰动观测法的 Simulink 仿真模型

Fig. 6 Simulink model of the perturbation observation method

### 2.3 斩波电路

用来实现最大功率点追踪的 DC-DC 变换电路主要有 Buck、Boost 以及 Buck-Boost 变换电路等。这些电路通过改变 DC-DC 变换器中功率开关的导通率来调整光伏电池的输出端电压，从而实现最大功率点跟踪<sup>[6-7]</sup>。本文采用了其中的升压斩波电路，该电路结构如图7所示。

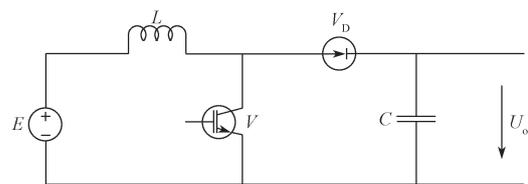


图7 升压斩波电路

Fig. 7 Boost chopper circuit

在升压斩波电路中, 输出电压的平均值  $U_o$  与输入电压  $U_i$  的关系式如下:

$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} U_i = \frac{T}{t_{off}} U_i \quad (3)$$

将升压比的倒数记作  $\beta$ , 即  $\beta = t_{off}/T$ , 则  $\beta$  和占空比  $\alpha$  有如下关系:

$$\alpha + \beta = 1.$$

因此式 (3) 可以表示为

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

根据式 (4) 可知, 可通过调节开关占空比  $\alpha$  来

调节电源输出的电压。

### 3 仿真与分析

#### 3.1 最大功率追踪仿真

为了实现对最大功率点的追踪, 在光伏电池的输出端首先设置 DC-DC 变换环节<sup>[8]</sup>。然后采用上述升压斩波电路, 结合扰动法, 实现最大功率点追踪, 其模型如图 8 所示, 其中封装了光伏电池的数学模型。此处采用的光照强度为  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ , 温度为  $25\ ^\circ\text{C}$ 。运行模型后, 得到如图 9 所示的最大功率追踪电压和功率仿真波形<sup>[9]</sup>。

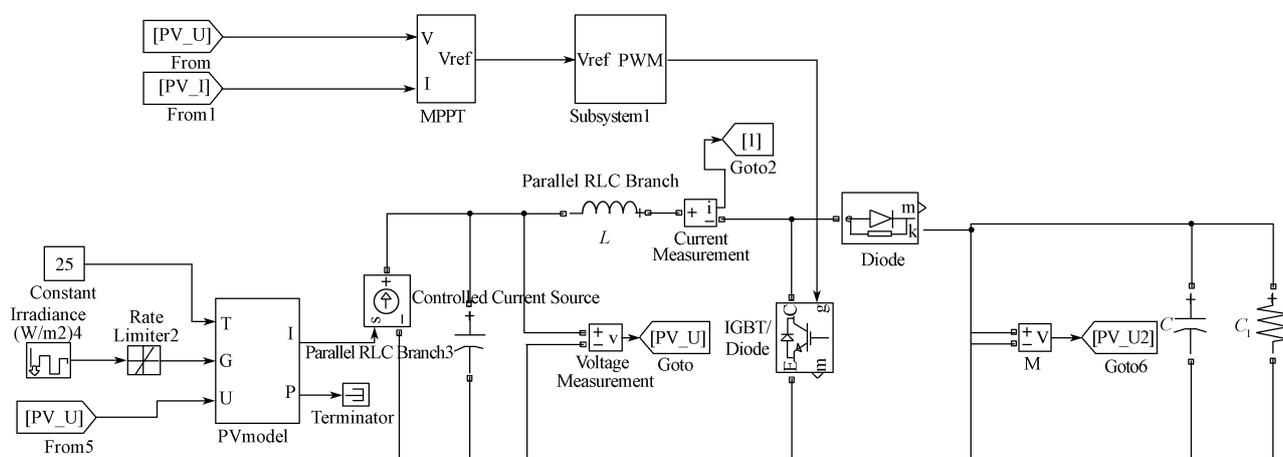


图 8 最大功率点追踪模型

Fig. 8 Maximum power point tracking model

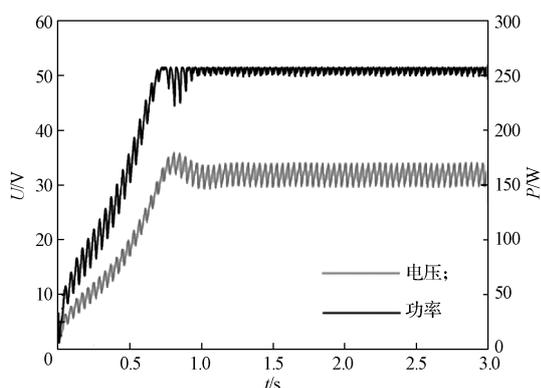


图 9 最大功率追踪电压和功率仿真波形

Fig. 9 Maximum power tracking voltage and power simulation waveforms

由图 9 所示仿真波形可以看出, 通过扰动法搭建的 Simulink 模型在仿真时间为 1 s 前即找到了系统的最大功率点, 并且使得光伏电池一直工作在最大功率点 (252 W) 附近。

#### 3.2 蓄电池互补仿真

根据前文所述的光伏发电系统模型以及事件驱动协议, 搭建了仿真模型, 整个系统的 Simulink 模

型图见图 10<sup>[9-10]</sup>, 其中电池类型采用了充放电速度都很快锂电池。为简化光伏发电系统模型, 设置环境温度为  $25\ ^\circ\text{C}$ , 且只考虑影响较大的光照强度的变化, 具体的系统参数设置见表 2。

表 2 系统参数设置

Table 2 System parameter setting

参 数	取值
光伏电池最大功率 /W	260
光伏电池短路电流 /A	8.35
光伏电池开路电压 /V	43.6
光伏电池最佳工作电流 /A	7.47
光伏电池最佳工作电压 /V	34.8
光伏电池电流温度系数 / (A·K <sup>-1</sup> )	$1.58 \times 10^{-3}$
光伏电池电压温度系数 / (V·K <sup>-1</sup> )	-0.065
蓄电池容量 / (A·h)	50
蓄电池标称电压 /V	35
事件驱动协议 $\alpha_{\max}$	1.1
事件驱动协议 $\alpha_{\min}$	0.9
斩波电路稳压电容 $C_1/\text{F}$	0.02
斩波电路升压电感 $L_1/\text{H}$	0.01
负载电阻 $R/\Omega$	20
负载电感 $L_2/\text{mH}$	12

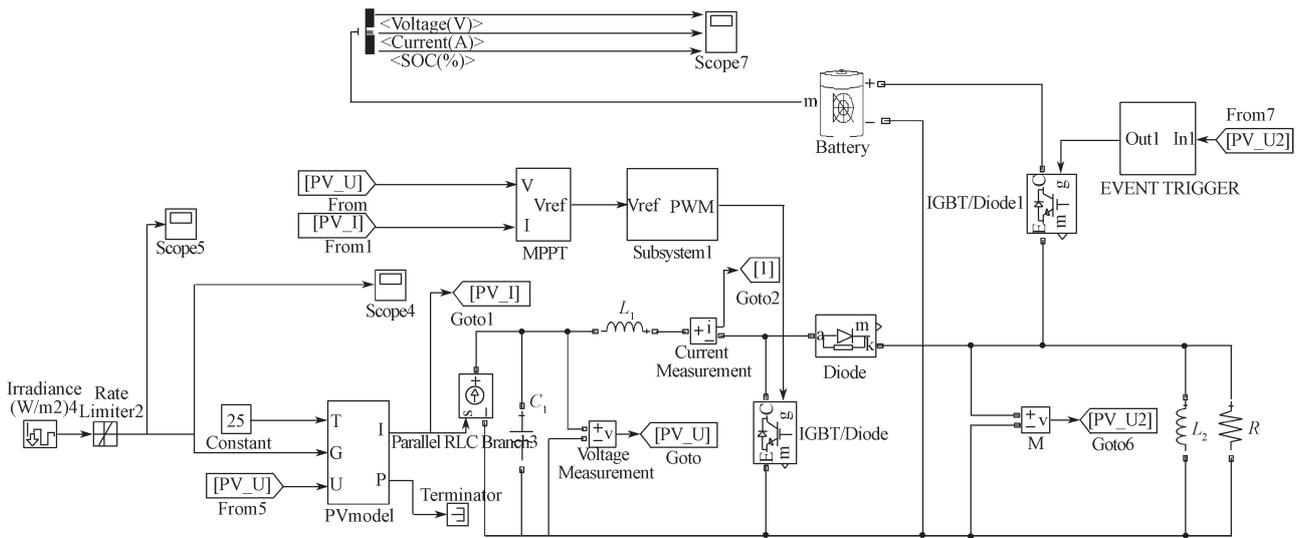


图 10 光伏发电系统的仿真模型

Fig. 10 Simulation model of photovoltaic system

对于输入的光照强度，本模型中设置了一些较大的波动，这是为了验证当光照不稳定引起系统内电压不稳定时，事件驱动策略的时效性。图 11 所示为本文给定的光照强度变化曲线；图 12 为有无蓄电池时的电压变化对比图；图 13 所示为蓄电池的工作状态图，其中 1 表示充电状态，-1 表示放电状态，0 表示停止工作状态。

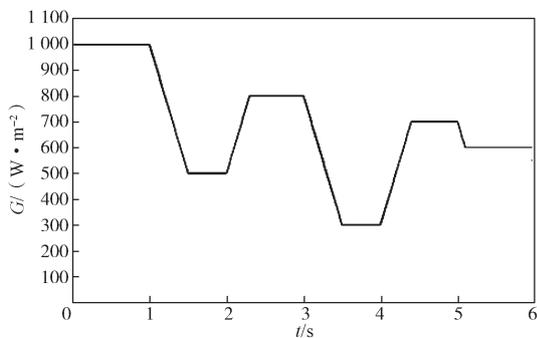


图 11 光照强度变化图

Fig. 11 Diagram of illumination intensity variation

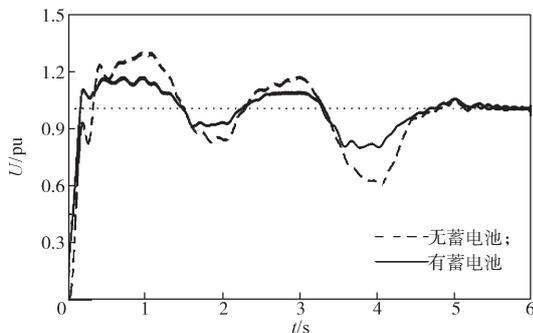


图 12 电压变化对比图

Fig. 12 Voltage variation contrast diagram

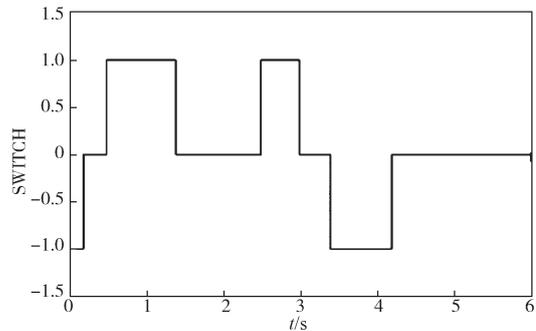


图 13 蓄电池工作状态图

Fig. 13 Working state diagram of batteries

图 11 显示了光照强度从 0~6 s 这段时间内，光照强度有不同程度的波动。

由图 12 可知，在无蓄电池时，随着光照强度的变化，在 1.0~1.5 s、2.0~2.5 s、3.0~3.5 s、4.0~4.5 s 共 4 个时间段内，电压发生了非常明显的变化。而在有蓄电池时，这 4 个时间段内的电压波动幅度明显较无蓄电池时的小。

由图 13 可知，在事件驱动协议的控制下，蓄电池在 0~0.2 s、3.4~4.2 s 两个时间段内，处于放电状态；在 0.5~1.4 s、2.5~3 s 两个时间段内，处于充电状态；在其余时间段内均处于停止工作状态。

以上结果表明，采用事件驱动协议来控制蓄电池的工作状态，在一定程度上稳定了系统的电压。此外，还控制了蓄电池的充放电次数，有利于延长蓄电池的使用寿命。

## 4 结语

本文基于 Matlab/Simulink 仿真平台，搭建了光

光伏发电系统模型, 实现了最大功率追踪的方法, 在保证能源转换效率最高的前提下, 加入了蓄电池模型实现能量互补。通过本文设计的事件驱动策略来控制电池工作状态, 不仅在一定程度上改善了电能质量, 而且有效减少了蓄电池的工作时间, 有利于延长蓄电池的使用寿命。基于这种能量互补的思想, 其它种类的具有不稳定性的可再生能源也能得到充分地开发与利用。

#### 参考文献:

- [1] 王成山. 微电网分析与仿真实理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 14.  
WANG Chengshan. Analysis and Simulation Theory of Microgrids[M]. Beijing: Science Press, 2013: 14.
- [2] 尹静, 张庆范. 浅析风光互补发电系统 [J]. 变频器世界, 2008(8): 43-45.  
YIN Jing, ZHANG Qingfan. Analysis of Wind-Solar Hybrid Generating System[J]. The World of Inverters, 2008(8): 43-45.
- [3] 陆云龙. 基于事件驱动的电动助力转向系统助力电机跟踪控制 [D]. 上海: 同济大学, 2014.  
LU Yunlong. Event-Driven Tracking Control of Assisted Motors for Electric Power Steering Systems[D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [4] 张晶. 小型风光互补供电提水系统建模与仿真研究 [D]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2013.  
ZHANG Jing. Research on Modelling and Simulation of the Small-Sized Water Pumping Systems Relying on Hybrid Power of Wind and Solar[D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2013.
- [5] 苏义鑫, 向炉阳, 张丹红. 基于改进扰动法的光伏电池 MPPT 仿真研究 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2012, 34(2): 135-139.  
SU Yixin, XIANG Luyang, ZHANG Danhang. Simulation on Photovoltaic Cells MPPT Algorithm Based on Improved Perturbation Method[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management Engineering), 2012, 34(2): 135-139.
- [6] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 151-152.  
WANG Zhao'an, HUANG Jun. Power Electronic Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000: 151-152.
- [7] 毛远军, 陈泽涛, 裴勉, 等. 基于 Matlab/Simulin 的光伏组件特性及 MPPT 仿真研究 [J]. 通信电源技术, 2015, 32(3): 47-48, 53.  
MAO Yuanjun, CHEN Zetao, PEI Mian, et al. Study of PV Module's Characteristic and MPPT Based on Matlab/Simulink[J]. Telecom Power Technology, 2015, 32(3): 47-48, 53.
- [8] 王善立, 龙军. 含分布式储能的光伏发电系统建模与仿真 [J]. 电源技术, 2016, 40(10): 1973-1975.  
WANG Shanli, LONG Jun. Modeling and Simulation of a PV System with DESS[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(10): 1973-1975.
- [9] 李琰. 分布式发电系统中光伏发电稳定性仿真研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.  
LI Yan. Stability Simulation and Research of the Photovoltaic Power Generation in Distributed Generation System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [10] 丁菲. 含多种分布式电源和储能的低压微网系统的暂态建模与仿真 [D]. 天津: 天津大学, 2010.  
DING Fei. Transient Modeling and Simulation of the LV Micro-Grid with Multiple Distributed Energy Sources and Energy Storage Elements[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

(责任编辑: 廖友媛)