

# 离网型风光互补系统控制策略探讨

马燕 徐立军

(新疆工程学院 电气与信息工程系 新疆 乌鲁木齐 830023)

**摘要:** 分析了太阳能电池和风力发电机的工作原理和工作特性,建立了太阳能光伏电池和风力发电机的仿真模型,采用扰动观察法,分别对其进行最大功率跟踪控制。针对扰动观察法步长难以选择的问题,分别对太阳能光伏发电系统和风力发电系统设计了相应的模糊控制器。仿真结果表明:所采用的控制策略可以随着条件的变化进行实时地跟踪控制。最后,分析了蓄电池的工作原理及工作特性,探讨采用蓄电池(激活充电、主充电、均充电及浮充电)4阶段充电管理的方法,模拟结果显示了方法的可行性。

**关键词:** 光伏发电; 风力发电; 最大功率跟踪; 扰动观察法; 模糊控制; 蓄电池

中图分类号: TM61; TP277 文献标识码: A  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.01.001

## 引言

近年来,随着能源危机和环境问题的日益突出,人们开始对可再生能源加强关注。在众多的可再生能源中,太阳能和风能具有资源丰富、可循环利用、无污染等显著优点,被世界公认为是最理想的替代能源,成为了当前技术利用最为成熟的2种新能源<sup>[1]</sup>。世界能源消费趋势如图1所示。

太阳能和风能能量密度较低,不易集中,而且也容易受到季节、地形和气候的影响,因此单独使用太阳能或风能发电都存在不稳定问题。利用太阳能和风能在时间和地域上的天然互补特性,组成独立风光互补系统,结合太阳能发电、风力发电及蓄电池充电可以消弱太阳能或风能单独发电时的波动。

目前,风光互补发电系统得到大范围应用,用以满足环境和电力的需求。对于该系统技术的研究也在大量的展开。国内主要有合肥工业大学、内蒙古

大学、中科院电工研究所等科研单位在风光互补发电系统的优化匹配计算和系统控制等方面进行研究。

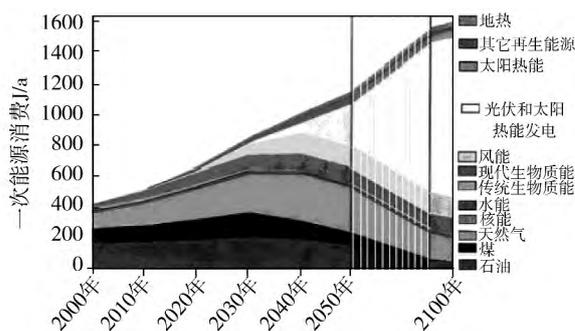


图1 世界能源消费结构

Fig. 1 The world's energy consumption structure

对于没有公共电网供应的偏远地区的小功率负载,带蓄电池的小型风光互补发电系统是最好的选择。本研究以离网的小型风光互补发电系统为探讨对象,分别对光伏电池和风力发电机最大功率以及蓄电池充电管理进行了理论分析。

## 1 风能的利用现状

风能的应用伴随着人类社会发展的整个过程。风能的存储量大,可再生等特点使得风能被广泛应用于发电领域<sup>[2]</sup>。

近年来,我国把加快发展风电作为推动能源生产方式变革、优化能源结构,构建经济、安全、清洁的现代能源产业体系的重大战略举措,制定了鼓励风电发展的一系列政策和措施,我国的风电行业实现了高速度、大规模的发展<sup>[3]</sup>。我国风电装机容量

收稿日期: 2014-05-31; 修订日期: 2015-10-28  
基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2014211A021)  
作者简介: 马燕(1988-),女,甘肃武威人,新疆工程学院讲师。

如图2所示。

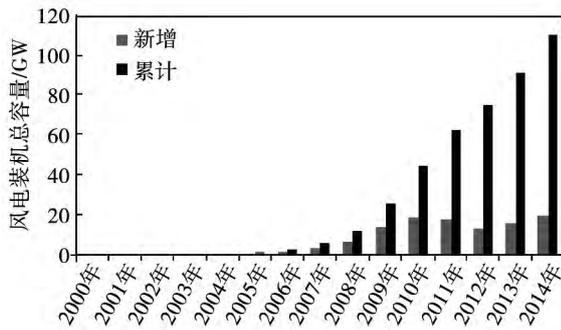


图2 我国风电新增装机容量

Fig. 2 The total wind power installed capacity in China

### 2 光伏利用的现状

光伏发电,是太阳能最重要的一种应用。光伏发电产业,是近几十年来,全球增长最快的高新技术产业之一。

我国的太阳能资源非常丰富,光伏市场潜力很大,光伏技术的发展也非常迅猛。截止到2011年,我国累计光伏发电的装机总容量达到了3 GW,成为了全球最大的光伏组件生产国家。我国光伏装机量统计如图3所示。

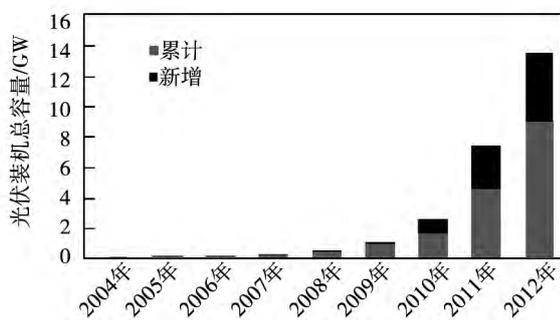


图3 我国光伏装机量

Fig. 3 Photovoltaic installations in China

### 3 风光互补系统的提出

风光互补,简单来说就是将风力发电机与太阳能光伏电池组合起来构成一套发电系统。我国的气

候具有明显的季节特点,冬季时风速较大,太阳光照强度较小;夏季时风速较小,太阳光照强度较大<sup>[3]</sup>。

如果将两者结合起来,既能充分发挥太阳能和风能的优势,又弥补了两者在资源上的不稳定性,提高了供电的可靠性。

### 4 离网型风光互补发电系统的特性

风光互补系统是一种集太阳能、风能及蓄电池等多种能源发电技术为一体的复合可再生能源发电系统<sup>[5]</sup>。风光互补发电系统的结构如图4所示。

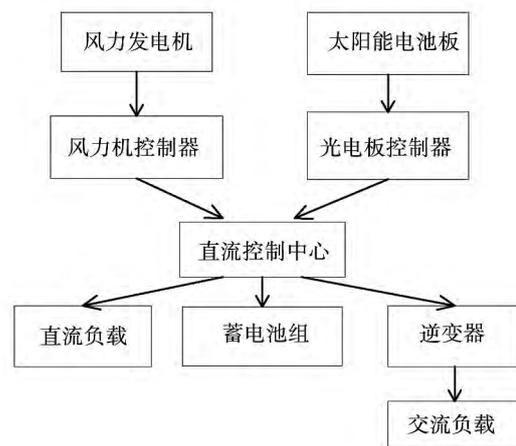


图4 风光互补发电系统结构

Fig. 4 The structure of wind-solar hybrid generation system

#### 4.1 光伏电池的特性

光伏电池的等效电路,如图5所示<sup>[6]</sup>。

根据光伏电池的等效电路,可得到式(1):

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(I \cdot R_s + V)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{I \cdot R_s + V}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中:  $I_L$ —光生电流, A;  $I_0$ —二极管的反向饱和电流, A;  $q$ —单位电荷, C;  $V$ —输出电压, V;  $A$ —二极管的品质因子;  $K$ —波尔兹曼常数, J/K;  $T$ —绝对温度, K,  $T = t + 273$  K;  $R_s$ —串联电阻,  $\Omega$ ;  $R_{sh}$ —并联电阻, 阻值一般较大  $\Omega$ <sup>[7]</sup>。

光伏电池的输出特性曲线,如图6所示。

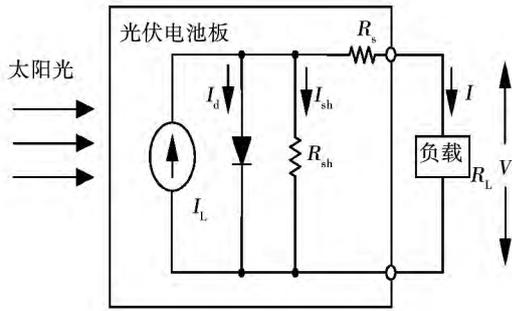


图 5 光伏电池等效电路

Fig. 5 The equivalent circuit of photovoltaic battery

图 6 中, 短路电流  $I_{sc}$ : 外接负载  $R_L = 0$  时对应的电流值, 此时  $V = 0$ ; 开路电压  $V_{oc}$ : 外接负载  $R_L = \infty$  时对应的电压值, 此时  $I = 0$ 。

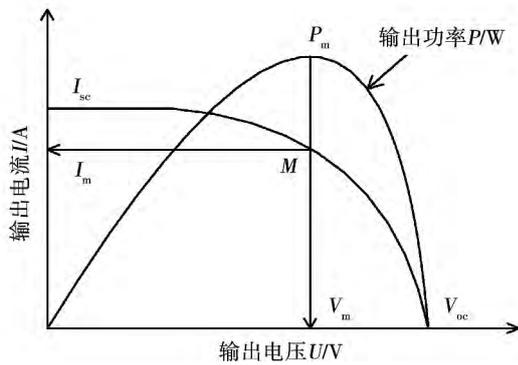


图 6 光伏电池输出特性曲线

Fig. 6 The output characteristic curve of photovoltaic battery

由图 6 可知, 光伏电池是一种非线性直流电源, 不能为负载提供任意大的功率。曲线上的每一点都唯一对应着光伏电池在该点工作电压下的输出功率。

#### 4.2 风力发电机的特性

本研究的对象是离网的小型风力发电系统, 即单机容量一般是在 100 W - 10 kW 之间。系统只为负载提供电能<sup>[8]</sup>。其系统结构如图 7 所示。

根据贝茨理论 (Betz) 可知, 风力机吸收的风能是有限的, 并不是 100% 理想情况下的风力机的风能最大利用率达到 59.3%<sup>[8]</sup>。风力机的空气动力特性一般是用风能利用系数  $C_p$  与叶尖速比  $\lambda$  的变化曲线来表示, 如图 8 所示。

当风速发生变化时, 风力机的最大功率点对应

的转速也各不相同, 把不同风速下的风力机输出的最大功率点相连接, 得到风力机的最大功率曲线<sup>[9]</sup>, 如图 9 所示。

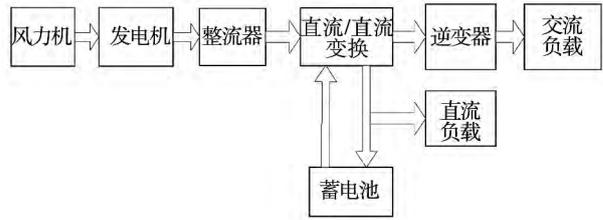


图 7 小型风力发电系统的结构

Fig. 7 The structure of small wind power generation electricity system

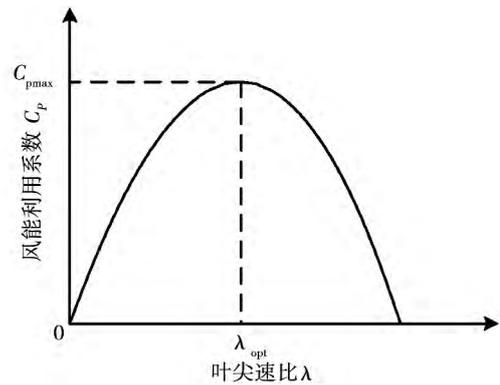


图 8 风力机  $C_p - \lambda$  关系曲线

Fig. 8 The curve of wind turbine

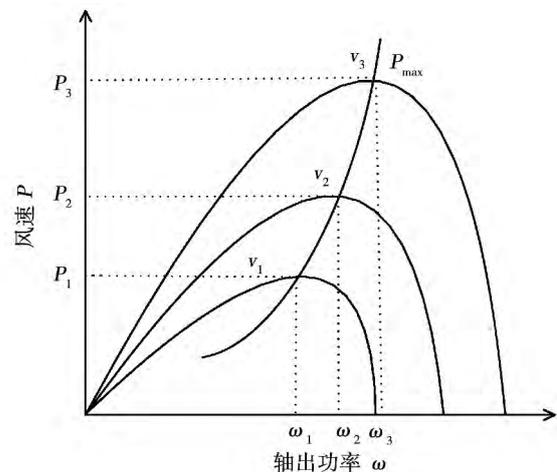


图 9 风力机  $P - V$  关系曲线

Fig. 9 The  $P - V$  changing curve of wind turbine

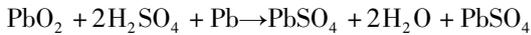
由图 9 可知, 风力发电机的输出功率随着风速的变化而变化, 在某一特定风速下, 输出功率有唯一的最大值。

### 4.3 蓄电池的特性

在离网型的风光互补发电系统中,储能设备一般是由蓄电池组成的,它起到了能量调节和平衡负载的两大重要作用。

铅酸蓄电池的工作原理就是一个氧化还原反应,化学反应方程式为:<sup>[10]</sup>。

放电过程:



充电过程:



在充放电过程中,都会出现一个副反应,就是电解水生成氢气(H<sub>2</sub>)和氧气(O<sub>2</sub>)。两者对极板不断冲击,出现强烈的冒泡现象,所以在充电过程中要对蓄电池进行合理充电。

## 5 最大功率跟踪控制

光伏电池与风力发电机的输出特性相似,都具有明显的非线性,其输出功率都与外界环境的变化密切相关,并且在某一个特定时刻,都有一个最大功率值与之相对应,称之为最大功率点(MPP)。因此,在离网型风光互补发电系统当中,要提高系统的整体效率,一个重要的方法就是实时调整系统的工作点,使之工作在最大功率点附近,实现的这一过程就称之为MPPT(最大功率点跟踪)<sup>[11]</sup>。

### 5.1 基于扰动观察法的光伏电池 MPPT 控制

扰动观察法(P&O)或称爬山法,是目前研究最多、最为常用的一种MPPT控制方法<sup>[12]</sup>。扰动观察法的控制流程如图10所示。

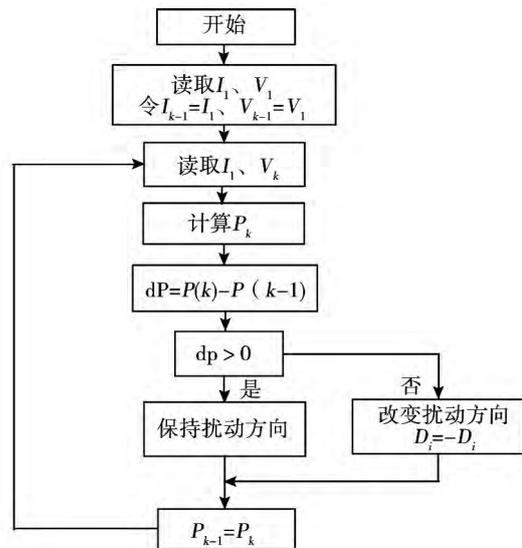


图 10 扰动观察法控制流程图

Fig. 10 The flow chart of perturbation and observation control

在 MATLAB/SIMULINK 中,建立光伏电池的仿真模型,如图 11 所示,基于扰动观察法的光伏电池 MPPT 控制仿真模型,如图 12 所示。

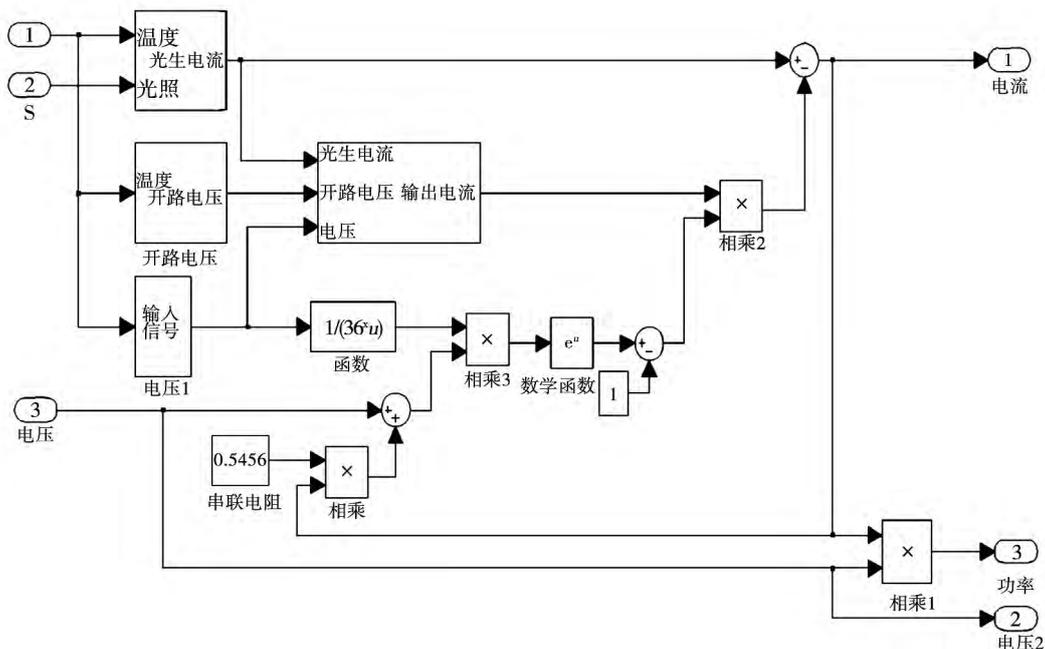


图 11 光伏电池仿真模型

Fig. 11 The simulation model of photovoltaic battery

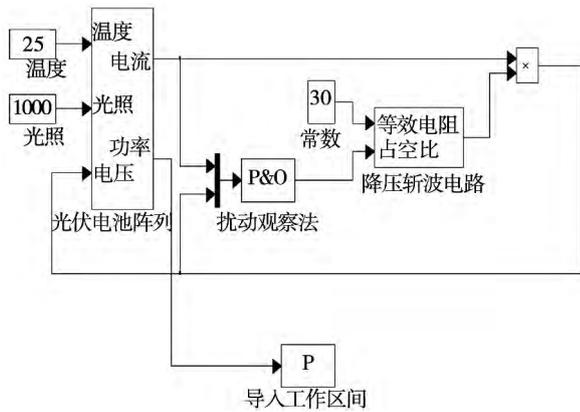


图 12 基于扰动观察法的光伏电池 MPPT 仿真模型

Fig. 12 MPPT control simulation model of photovoltaic cells based on perturbation and observation method

设定参数: 温度 25 °C ,光照强度 1 000 W/m<sup>2</sup> , 仿真时间 2 s ,步长为 0.007 V ,其输出曲线如图 13 (a) 所示; 步长增大至 0.012 V ,其输出曲线如图 13 (b) 所示。

通过图 13( a) 与图 13( b) 对比可知 ,扰动观察法可以实现光伏电池的最大功率跟踪 ,但是步长的选取对其有明显的影 响。当步长选得较小时 ,输出功率在最大点处比较平滑 ,波动小 ,系统的稳态性能较好 ,动态性能较差; 当步长选取得较大时 ,输出功率在最大点处的稳态性能较差 ,而动态性能较好。

设置仿真参数: 仿真时间 6 s ,保持温度 25 °C , 在 3 s 处 ,改变光照强度 ,从 800 W/m<sup>2</sup> 变为 1 000 W/m<sup>2</sup> ,观察其输出功率的曲线如图 14 所示。

保持光照强度为 1 000 W/m<sup>2</sup> ,在 3 s 处 ,改变温度从 20 °C 变为 25 °C ,观察其输出功率曲线 ,如图 15 所示。

由图 14、图 15 可知 ,当光照强度和温度发生突变时 ,采用扰动观察法 ,其控制效果还是比较明显的 ,能够较快地跟踪外界条件的变化 ,使系统的输出功率重新达到稳态。

### 5.2 基于扰动观察法的风力发电 MPPT 控制

风力发电机的输出功率与输出转矩公式分别为<sup>[12]</sup>:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} = \frac{0.5 \rho \pi R^2 v^3 C_p}{\omega} = \frac{\rho \pi v^2 R^3 C_p}{2 \lambda}$$

式中:  $\rho$ —空气密度 ,kg/m<sup>3</sup>;  $A$ —风力机叶片扫掠面积 ,m<sup>2</sup>;  $v$ —风速 ,m/s;  $R$ —叶片半径 ,cm;  $\omega$ —风轮的转速 ,m/s;  $C_p$ —风能利用系数;  $\lambda$ —叶尖速比<sup>[13]</sup>。

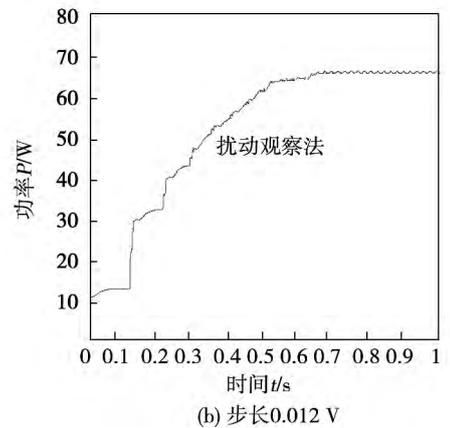
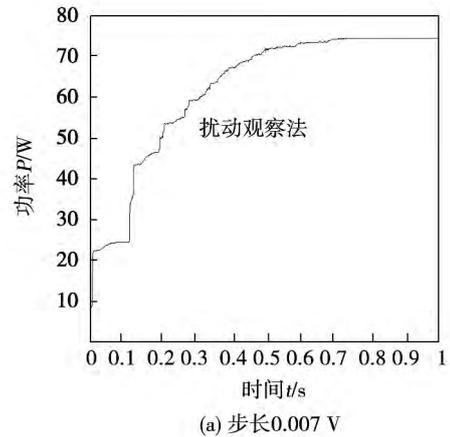


图 13 步长不同时的功率输出曲线

Fig. 13 The output power curve of different steps

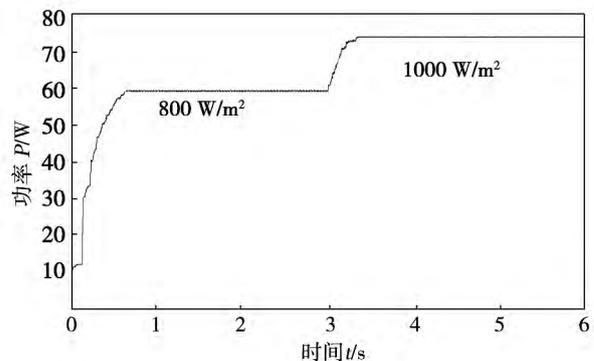


图 14 光照强度不同时的功率曲线

Fig. 14 The power curve of different light intensities

在 MATLAB/SIMULINK 中 ,建立风力机的仿真模型 ,如图 16 所示。基于扰动观察法的风力发电系

统 MPPT 控制仿真模型如图 17 所示。

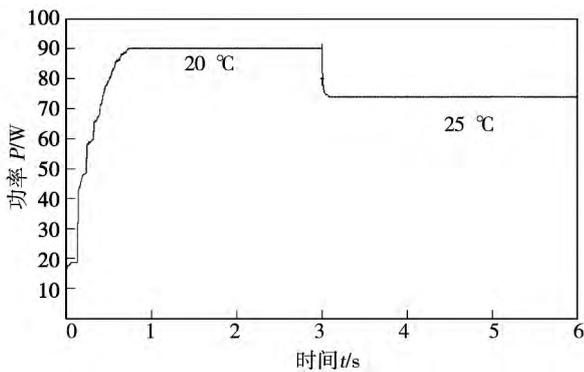


图 15 温度不同时的功率曲线

Fig. 15 The power curve of different temperatures

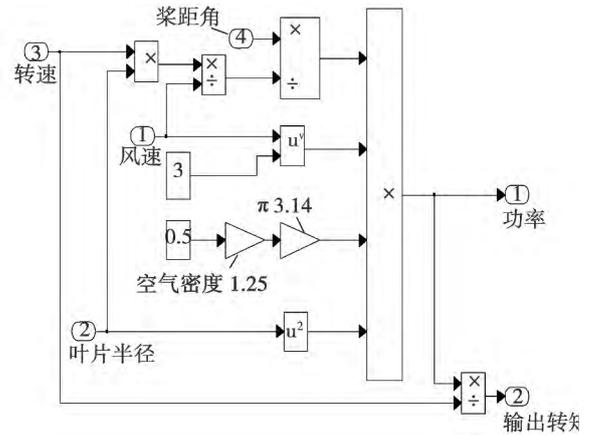


图 16 风力机仿真模型

Fig. 16 The simulation model of wind turbine

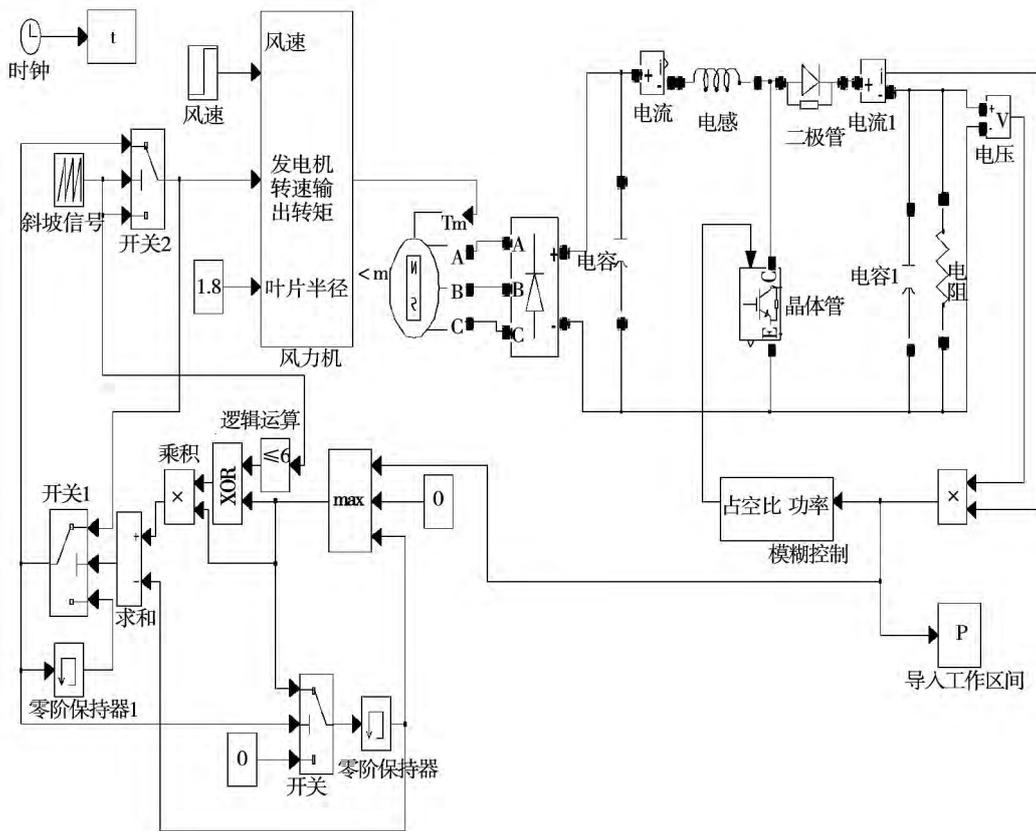


图 17 基于扰动观察法的风力发电系统 MPPT 控制仿真模型

Fig. 17 MPPT control simulation model of wind power generation system based on perturbation and observation method

设定参数; 仿真时间为 2 s, 风速  $v$  为 10 m/s, 仿真步长为 0.006 V, 其输出功率曲线如图 18( a) 所示; 步长增大至 0.013 V, 其输出功率曲线如图 18( b) 所示。

由图 18( b) 可知, 步长增大之后, 系统的动态性能变好, 但稳态性能下降, 出现震荡现象。

设置仿真参数: 仿真时间为 6 s, 在 3 s 处风速从 9 m/s 变为 10 m/s, 观察其输出功率曲线, 如图 19

所示。

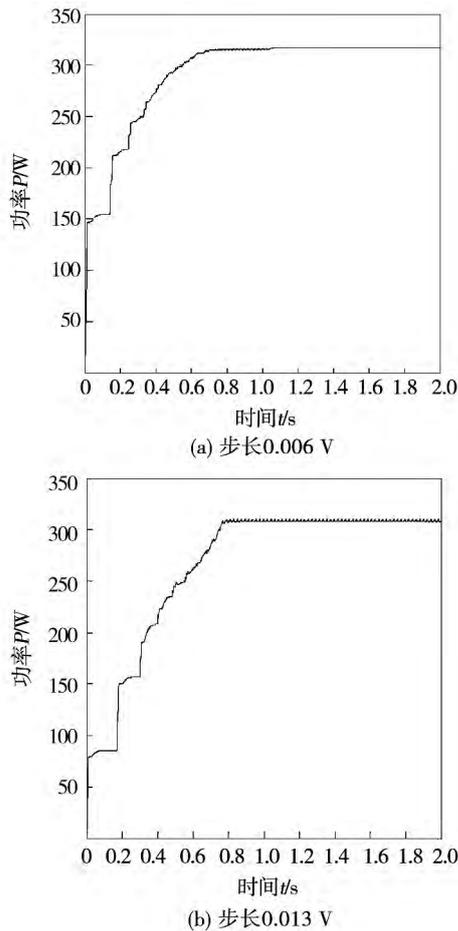


图 18 步长不同时的功率输出曲线

Fig. 18 The output power curve of different steps

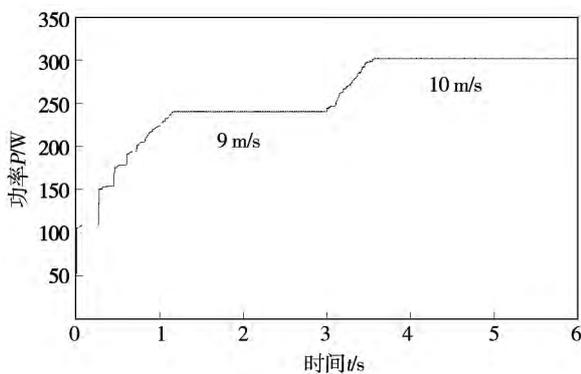


图 19 风速变化时的输出功率曲线

Fig. 19 The output power curve of wind velocity variation

由图 19 可知, 风速发生变化的时候, 采用扰动观察法, 控制效果比较明显, 能够在较短的时间内跟随外界条件的变化, 使系统重新工作在最大功率

点处。

### 6 光伏发电系统的模糊控制

光伏发电系统是一个随外界温度、光照强度等变化而变化的非线性系统, 模糊控制正好能够解决这类控制问题<sup>[14]</sup>。基于模糊控制的光伏发电 MPPT 系统结构如图 20 所示。

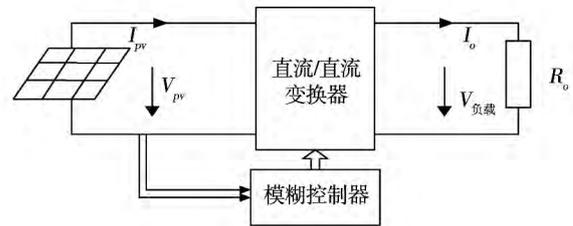


图 20 光伏发电 MPPT 模糊控制结构

Fig. 20 MPPT fuzzy control structure of photovoltaic generation

#### 6.1 光伏发电模糊控制器的设计

本研究选择的是双输入单输出的二维模糊控制器, 系统的输出功率变化量  $\Delta E(n)$ , 前一刻占空比的扰动值  $A(n-1)$  为系统的输入变量, 当前的占空比  $A(n)$  为系统的输出变量<sup>[15]</sup>。

$$\Delta E = \{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\};$$

$$A(n-1) = \{NB, NM, NS, PS, PM, PB\};$$

$$A(n) = \{NB, NM, NS, PS, PM, PB\},$$

它们的论域分别划分为 14、12 和 12 个等级:

$$\Delta E = [-6 \ -5 \ -4 \ -3 \ -2 \ -1 \ -0 \ +0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6]$$

$$A(n-1) = [-6 \ -5 \ -4 \ -3 \ -2 \ -1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6]$$

$$A(n) = [-6 \ -5 \ -4 \ -3 \ -2 \ -1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6].$$

建立模糊控制规则表, 模糊规则语言采用“If... Then”的形式, 共有 48 条规则, 如表 1 所示。

在 MATLAB/SIMULINK 中, 建立光伏电池 MPPT 模糊控制系统仿真模型, 如图 21 所示。

仿真参数: 温度为 25 °C, 光照强度为 1 000 W/m<sup>2</sup> 条件下, 对基于模糊控制的光伏发电 MPPT 控制系统进行了仿真研究, 如图 22 所示。

由图 22 可知, 光伏发电系统中加入了模糊控制器之后, 系统的动态性能与稳态性能均有所改善。

设置仿真参数: 保持温度为 25 °C, 光照强度从 500 W/m<sup>2</sup> 变化到 600 W/m<sup>2</sup> 时, 观察模糊控制器的跟踪效果, 如图 23 (a) 所示。保持光照强度为

1 000 W/m<sup>2</sup> 在 3 s 处温度从 20 ℃ 变为 25 ℃ ,观察输出功率曲线 ,如图 23( b) 所示。

进行比较。仿真时间为 6 s ,温度 25 ℃ 在 3 s 处光照强度从 800 W/m<sup>2</sup> 变为 1 000 W/m<sup>2</sup> ,观察这两种方法的跟踪效果 ,如图 24 所示。

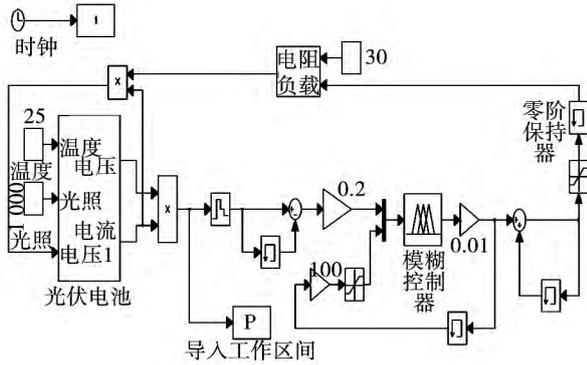


图 21 光伏发电系统的模糊控制仿真模型  
Fig. 21 The fuzzy control simulation model of photovoltaic generation system

表 1 模糊控制规则表

Tab. 1 The fuzzy control rule table

E \ A	A							
	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	PS	NS	NS	NS	NS
NM	PB	PB	PM	PS	NS	NS	NS	NS
NS	PB	PB	PM	PS	NS	NS	PB	NS
PS	NS	NS	NS	NS	PM	PM	PB	PB
PM	NS	NS	NM	NM	PM	PM	PB	PB
PB	NS	NS	NM	NM	PS	PS	PM	PB

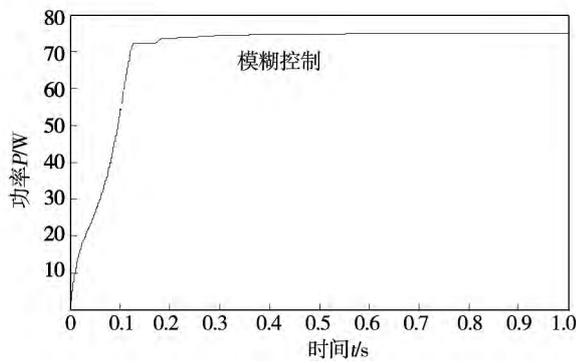


图 22 输出功率曲线  
Fig. 22 The output power curve

由图 23( a) 与 23( b) 可知 ,当光照强度和温度发生突变时 模糊控制器能够较快速地进行跟踪 ,响应速度较快 控制精度也较好 ,具有一定的可行性。

现将扰动观察法与模糊控制法放在同一坐标下

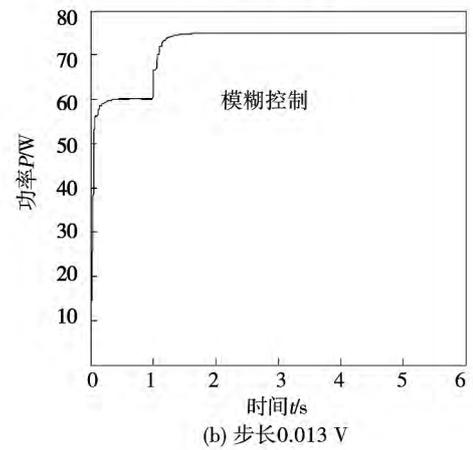
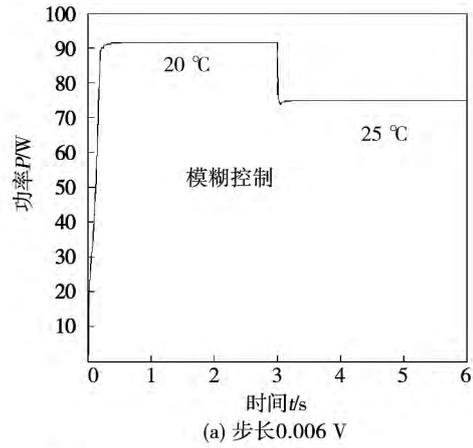


图 23 光照强度和温度不同时的输出功率曲线  
Fig. 23 The output power curve of different light intensity and different temperatures

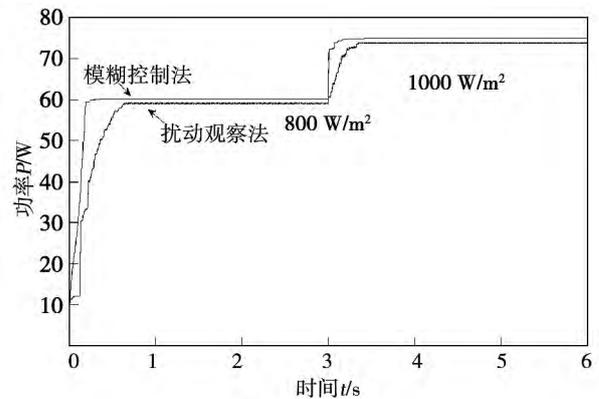


图 24 光照强度变化时的跟踪效果对比  
Fig. 24 The tracking result comparison of various light intensity

扰动观察法与模糊控制法都能跟随外界环境的变化,使系统快速地运行在最大功率点处。但模糊控制法的跟踪速度与反应时间都比较快,控制效果也较好。

### 7 风力发电系统的模糊控制

风力发电模糊控制系统结构如图 25 所示。

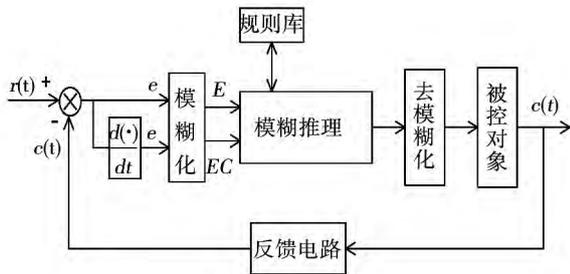


图 25 风力发电模糊控制系统结构

Fig. 25 The fuzzy control system structure of wind power generation

#### 7.1 风力发电系统模糊控制器设计

模糊控制器第  $n$  时刻的输入量为 2 个: 一是第

$n$  时刻的功率变化量  $ep(n)$ , 二是第  $(n-1)$  时刻的占空比步长量  $d(n-1)$ 。模糊控制器第  $n$  时刻的输出量是第  $n$  时刻占空比的步长量  $d(n)$  [16]。

将模糊集合论域  $Ep(n)$ 、 $Ed(n-1)$  及  $Ud(n)$  分别定义为 8 个、6 个及 6 个模糊子集, 为:

$$Ep(n) = \{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\};$$

$$Ed(n-1) = \{NB, NM, NS, PS, PM, PB\};$$

$$Ud(n) = \{NB, NM, NS, PS, PM, PB\}。$$

其中 NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB 分别表示的是负大, 负中, 负小, 负零, 正零, 正小, 正中, 正大等模糊概念。将  $Ep(n)$ 、 $Ed(n-1)$  及  $Ud(n)$  的论域分别划分为 14 个、12 个及 12 个等级, 为:

$$Ep(n) = [-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, 1, 2, 3, 4, 5, 6];$$

$$Ed(n-1) = [-6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6];$$

$$Ud(n) = [-6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6]。$$

采用 “If - then” 的形式, 建立模糊控制规则表, 如表 2 所示。

在 MATLAB/STMULINK 中, 基于模糊控制的风力发电系统 MPPT 控制仿真模型, 如图 26 所示。

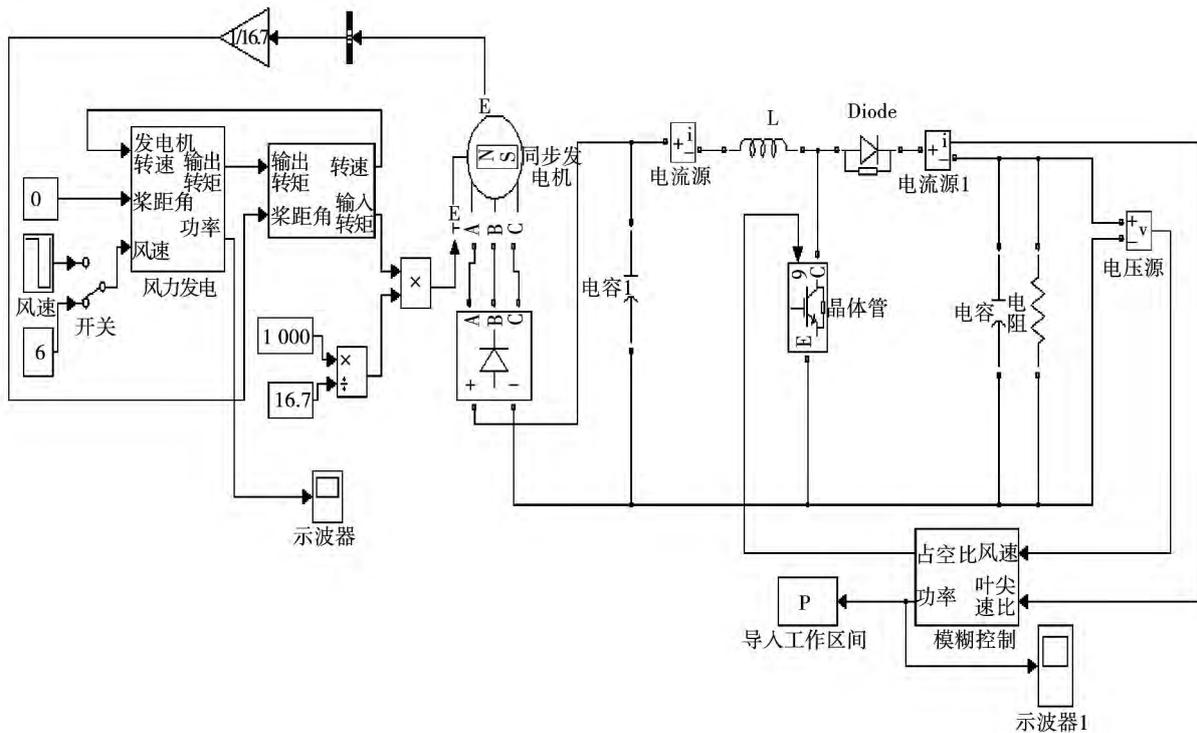


图 26 风力发电系统模糊控制仿真模型

Fig. 26 The fuzzy control simulation model of wind power generation system

设置仿真参数: 仿真时间为 2 s ,风速为 10 m/s , 观察其输出功率曲线 如图 27 所示。

表 2 模糊控制规则表

Tab.2 The fuzzy control rule table

Ed( n - 1) \ Ep( n)	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
	NB	PM	PM	PS	PS	NS	NS	NM
NM	PB	PB	PM	PS	NS	NS	NM	NM
NS	PB	PB	PM	PS	NS	NS	NS	NS
PS	NS	NS	NS	NS	PS	PM	PB	PB
PM	NM	NM	NS	NS	PS	PM	PB	PB
PB	NS	NM	NS	NS	PS	PS	PM	PB

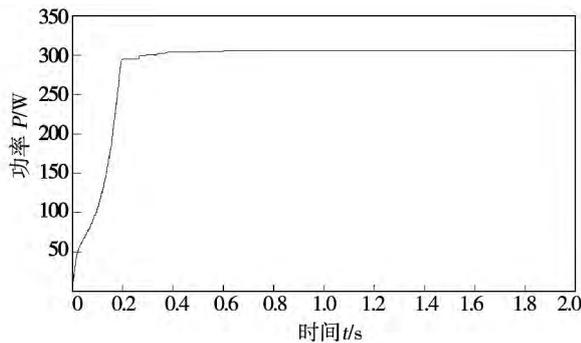


图 27 风速 10 m/s 时的输出功率曲线

Fig. 27 The output power curve when the wind speed is 10 m/s

改变仿真参数: 在 3 s 处, 风速从 8 m/s 变为 10 m/s 观察其输出功率曲线 如图 28 所示。

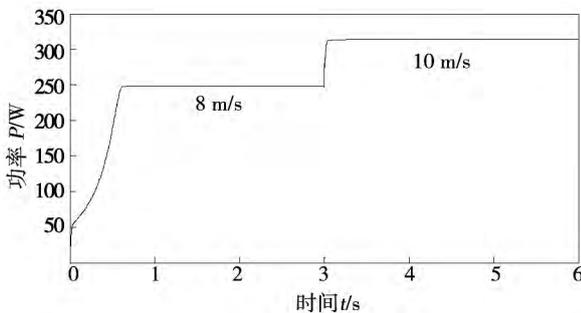


图 28 风速变化时的输出功率曲线

Fig. 28 The output power curve of various wind speed

由图 28 可知 ,当风速发生变化时 模糊控制器能够较快地进行跟踪控制 ,使系统的输出功率能够达到最大 ,系统的性能也得到了改善。

将扰动观察法与模糊控制法放在同一个坐标

下 ,进行比较。设置仿真参数: 仿真时间 6 s ,在 3 s 处风速从 8 m/s 变为 10 m/s ,观察这两种方法的跟踪效果 如图 29 所示。

由图 29 可知 ,当风速突变时 ,模糊控制法的跟踪效果比扰动观察法要好。

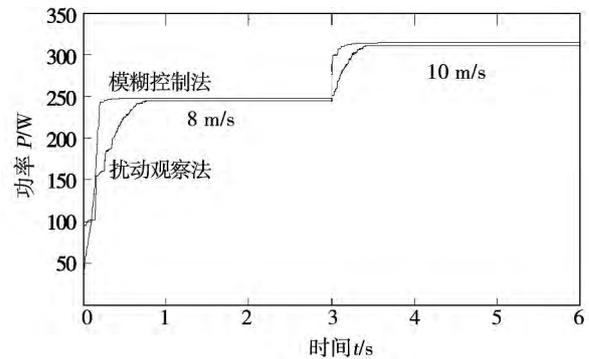


图 29 扰动观察法与模糊控制法的跟踪效果对比

Fig. 29 The tracking result comparison of perturbation and observation method and fuzzy control

### 8 蓄电池充电策略

当风光互补发电系统的最大输出功率与需求功率相匹配时 ,可以实现最大功率的充电。当需求的功率小于系统的最大输出功率时 ,需要通过其它方法对蓄电池充电<sup>[17]</sup>。

结合离网型风光互补发电系统的特点 ,采取了蓄电池四阶段充电控制策略 ,分别为激活充电、主充电、均充电与浮充电 ,其充电过程如图 30 所示。

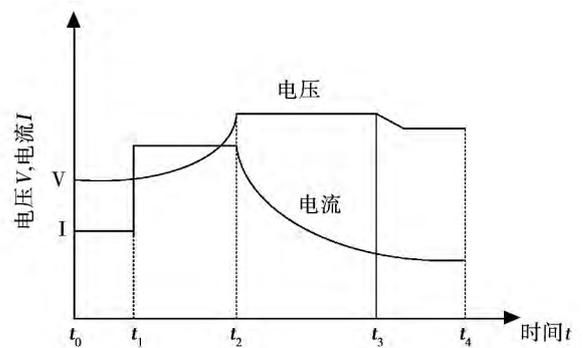


图 30 蓄电池四阶段充电控制

Fig. 30 The four-stage charging control of battery

采用 12 V 的铅酸蓄电池 ,控制过程为:

蓄电池的端电压低于 13 V 时 ,应当启用恒定电

流充电模式对蓄电池进行充电。电流值设定为 3 A。

蓄电池的端电压若不小于 13 V ,再判断充电电流是否小于 0.8 A。

(1) 如果充电电流低于 0.8 A ,采用浮充电压

13.5 V 对蓄电池充电。

(2) 如果充电电流大于 0.8 A ,采用恒压 14 V 对蓄电池充电。

在 MATLAB/SIMULINK 中 ,建立蓄电池充电仿真模型 ,如图 31 所示。

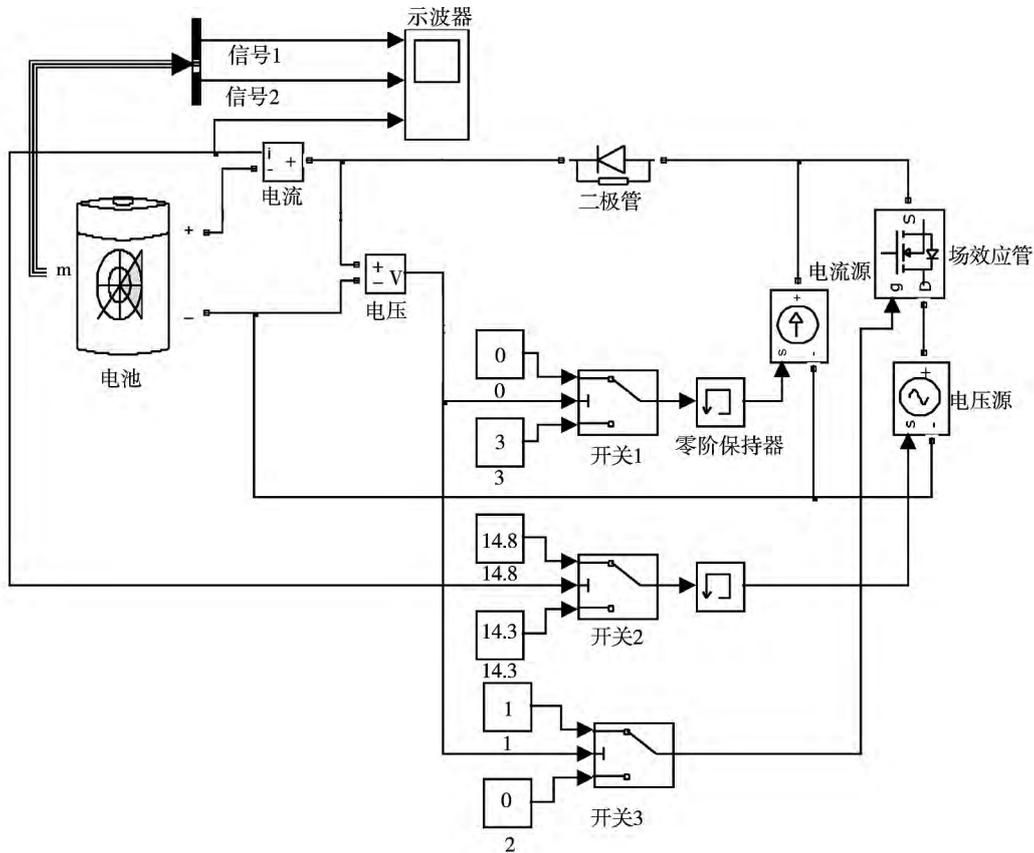


图 31 蓄电池控制仿真模型

Fig. 31 The control simulation model of battery

仿真结果如图 32 所示。

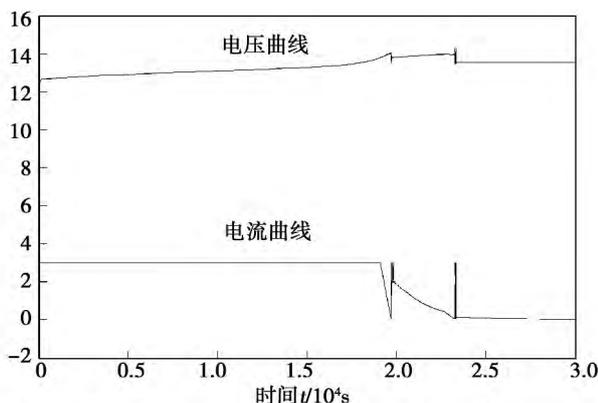


图 32 蓄电池仿真曲线

Fig. 32 The simulation curve of battery

由图 32 可知 ,蓄电池可以按照预先设定好的方式进行充电 ,当达到相应充电阶段的阈值电压时 ,就自动进入到下一阶段。因此 ,本文设计的蓄电池充电控制策略基本上能够保证对蓄电池平稳的充电 ,实现不同阶段的有序切换。

### 9 结 论

以离网型的小型风光互补发电系统为研究对象 ,分析了光伏发电系统和风力发电系统的建模及其最大功率点跟踪( MPPT) 等问题 ,重点讨论了扰动观察法 ,并针对扰动观察法存在的步长问题 ,分别设计出了光伏发电系统和风力发电系统的模糊控制

器,仿真结果表明本文所采用的控制策略可以随着条件的变化进行实时的跟踪控制。对蓄电池充电管理进行了理论分析,采用了四阶段充电控制管理,仿真显示了方法的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 杨敏林,杨晓西,林汝谋,等.太阳能热发电技术与系统[J].热能动力工程,2008,23(3):221-227.  
YANG Min-lin, YANG Xiao-xi, LIN Ru-mou, et al. Solar thermal electric generating technology and system[J]. Journal of Engineering for Thermal, 2008, 23(3): 221-227.
- [2] 刘立群.分布式风光互补系统控制与最大功率跟踪策略研究[D].上海:上海交通大学,2011.  
LIU Li-qun. Study on maximum power track strategies for distributed Wind-Solar energy hybrid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [3] 董永林.离网型风光互补发电系统控制器[D].济南:山东大学,2011.  
DONG Yong-lin. The controller of Off-Grid wind-Solar hybrid[D]. Jinan: Shan Dong University, 2011.
- [4] 何淼.48V风光互补独立电源系统研究与开发[D].合肥:中国科学技术大学,2011.  
HE Miao. Research and development for independent power supply system of 48 V Wind-Solar energy hybrid[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [5] 沈利生.小型风光互补发电系统的建模与仿真研究[D].南昌:南昌大学,2011.  
SHEN Li-sheng. Research on modeling and simulation of small-scale Wind-Solar hybrid generation system[D]. Nanchang: Nan Chang University, 2011.
- [6] 茆美琴,余世杰,苏建徽.带有MPPT功能的光伏阵列MATLAB通用仿真模型[J].系统仿真学报,2005(5):1248-1251.  
MAO Mei-qing, YU Shi-jie, SU Jian-hui. Versatile MATLAB simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005(5): 1248-1251.
- [7] 尤鋈,郑建勇.基于模糊PI调节Boost电路的光伏系统最大功率点跟踪控制[J].电力自动化设备,2012,32(6):94-98.  
YOU Yun, ZHENG Jian-yong. Maximum power tracking control of photovoltaic system based on fuzzy PI regulating the boost circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 94-98.
- [8] 马腾昊.小型风电机组的MPPT控制策略研究[D].北京:北京交通大学,2010.  
MA Teng-hao. Study on maximum power track strategies for small wind turbines[D]. Beijing: Bei Jing Jiao Tong University, 2010.
- [9] 金子轶.独立运行小型风力发电系统的研究[D].大连:大连交通大学,2008.  
JIN Zi-yi. Study on stand-alone small wind power systems[D]. Dalian Jiao Tong University, 2008.
- [10] 黄原.蓄电池光伏充放电控制器的设计[D].武汉:武汉理工大学,2009.  
HUANG Yuan. The design of photovoltaic charging and discharging controller for storage battery[D]. Wuhan: Wu Han University of Technology, 2009.
- [11] 吴大中,王晓伟.一种光伏MPPT模糊控制算法研究[J].太阳能学报,2011,32(6):808-813.  
WU Da-zhong, WANG Xiao-wei. One algorithm research for maximum power track fuzzy control of photovoltaic[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(6): 808-813.
- [12] 肖玉华.离网型风光互补发电系统的研究与设计[D].武汉:武汉理工大学,2010.  
XIAO Yu-hua. Research and design of off-grid[D]. Wuhan: Wu Han University of Technology, 2010.
- [13] 牟善军.600W风力发电系统最大功率跟踪控制器[D].济南:山东建筑大学,2012.  
MOU Shan-jun. The maximum power point tracking controller of the 600 W wind power system[D]. Jinan: Shan Dong Jian Zhu University, 2012.
- [14] 杨菲.风光互补智能控制器的研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2013.  
YANG Fei. The research of Wind-Solar complementary intelligent controller[D]. Urumqi: Xin Jiang University, 2013.
- [15] 胡海峰.基于模糊PID控制的太阳能光伏发电系统的MPPT研究[D].长沙:湖南大学,2011.  
HU Hai-feng. The research on maximum power point tracking in photovoltaic generation system based on fuzzy PID control[D]. Changsha: Hu Nan University, 2011.
- [16] 房泽平,王铁生.小型风电系统变步长扰动MPPT仿真控制研究[J].计算机仿真,2007,24(9):241-244.  
FANG Ze-ping, WANG Tie-sheng. Simulation of variable step perturbation MPPT method for small wind power generation systems[J]. Computer Simulation, 2007, 24(9): 241-244.
- [17] 许傲然,张柳.光蓄互补发电系统控制策略的研究[J].蓄电池,2012(2):66-70.  
XU Ao-ran, ZHANG Liu. Research on control strategy of photovoltaic/Battery hybrid generation system[J]. Chinese Labat Man, 2012(2): 66-70.

(陈滨 编辑)

离网型风光互补系统控制策略探讨 = **Exploratory Investigation of the Tactics for Controlling an Off-grid Type Wind-power-photovoltaic Complementary System** [刊 汉] MA Yan , XU Li-jun ( Department of Electrical and Information Engineering ,Xinjiang Engineering College ,Urumqi ,China ,Post Code: 830023) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 1) . -1 -12

Analyzed were the working principles and characteristics of solar power cells and wind power generator units and established was a model for simulating solar energy photovoltaic cells and wind power generators. The perturbation observation method was used to perform a tracking and control of their maximum powers. In the light of the problem that it is difficult to choose the step length for the perturbation observation method ,corresponding fuzzy controllers were designed for a solar energy photovoltaic power generation system and a wind power generation system respectively. The simulation results show that the control tactics adopted can exercise a real-time tracking and control with changes in operating conditions. Finally ,the working principles and characteristics of an accumulator battery was analyzed and the four-phase charging management of the accumulator battery was adopted ,i. e. activated charging , main charging ,average charging and floating charging. The simulation results indicate that the method in question is feasible. **Key words:** photovoltaic power generation ,wind power generation ,maximum power tracking ,perturbation observation method ,fuzzy control ,accumulator battery

矩形小翼和三角形小翼纵向涡发生器流动换热的研究 = **Study of the Flow and Heat Exchange in a Longitudinal Vortex Generator Installed with Rectangular and Triangular Winglets** [刊 汉] ZENG Zuo-xiong ,LIU Jian-quan ,WANG Zhang-jun ( College of Energy Source and Mechanical Engineering ,Shanghai University of Electric Power ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) ,WEI Jia-jia ( College of Aircraft Engineering ,Nanchang University of Aeronautics ,Nanchang ,China ,Post Code: 330063) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 1) . -13 -19

By making use of the SIMPLE algorithm and the  $k - \varepsilon$  turbulent flow model ,the heat exchange performance of a H-shaped finned tube installed with a rectangular winglet or a triangular winglet was numerically simulated. It has been found that when the Reynolds number is kept unchanged ,with an increase of the attack angle ,the temperature difference and pressure loss between the inlet and outlet of a H-shaped finned tube installed with a rectangular winglet and its Nusselt number ,Euler number and heat exchange factor as well as comprehensive performance evaluation criterion JF are all greater than those of the H-shaped finned tube installed with a triangular winglet. In the