一种自适应变步长扰动观察法的研究

首先对光伏电池建立了数学与仿真模型，并依据仿真结果分析了光伏电池的输出特性与外部环境的关系。由仿真输出特性得出不加控制方法的光伏电池板不能实现最大功率的输出，为此研究了一种能跟随外部环境变化的最大功率点跟踪方法。对现有的最大功率点跟踪方法进行比较论证，设计了定步长扰动观察法和变步长扰动观察法两种控制方法，理论分析了它们各自的优缺点。由此设计了一种自适应变步长扰动观察法，进一步通过Matlab/Simulink搭建了两种方法电路仿真模型，验证了算法可行性，证明了自适应变步长扰动观察法在系统稳定方面的优越性。

王春宁[1] 王 剑[2] 杨 艳[1] 廖红华[3]/1.青岛大学自动化与电气工程学院
2.国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司 3.湖北民族学院信息工程学院

王春宁/硕士研究生

关键词/Keywords
最大功率点跟踪·
Simulink·
变步长扰动观察法·
光照强度·

0 引言

光伏发电作为清洁能源，在电力发展中是不可或缺的一员，已知光伏电池的输出功率受到外部环境（如光照强度、温度等）的影响[1]。在不同外部环境下，光伏板存在不同但唯一的最大功率点（Maximum Power Point，MPP）[2]，目前现有的MPPT技术存在各自的缺陷，因此寻求一种更优质的MPPT技术尤为重要。

1 光伏电池的数学模型与分析

1.1 数学模型

光伏电池的等效电路如图1所示。

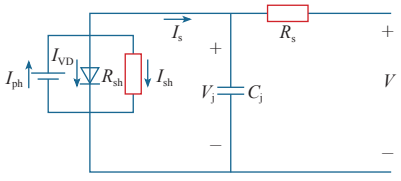


图1 光伏电池等效电路

国家自然科学基金项目（61263030）。

根据图1，忽略结电容C_j，可以得到光伏电池的$I-V$特性曲线方程[3]为

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

式中，I_L为光电流，A；I_0为为反向饱和电流，A；q为电子电荷，取值1.6×10^{-19} C；K为玻尔兹曼常数，取值1.38×10^{-23} J/K；T为热力学温度，K；A为二极管因子；R_s为串联电阻，Ω；R_{sh}为并联电阻，Ω。

实际工程应用中，由于式（1）中各参数确定困难，文献[4-6]提出了光伏电池的实用数学模型以及仿真模型，具体如下

$$I=I_{sc}[1-C_1(e^{U/(C_2U_{oc})}-1)] \quad (2)$$

$$C_1=(1-I_m/I_{sc})e^{-U_m/(C_2U_{oc})} \quad (3)$$

$$C_2=(U_m/U_{oc}-1)[\ln(1-I_m/I_{sc})]^{-1} \quad (4)$$

$$\Delta I=\frac{S}{S_{ref}}[1+a(T-T_{ref})] \quad (5)$$

$$\Delta U=[1-c(T-T_{ref})]\ln[e+b(S-S_{ref})] \quad (6)$$

$$\begin{cases}I'_{sc}=I_{sc}\Delta I\\I'_m=I_m\Delta I\end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases}U'_{oc}=U_{oc}\Delta U\\U'_m=U_m\Delta U\end{cases} \quad (8)$$

将厂家提供的参数U_{oc}、I_{sc}、U_m和I_m代入式（3）、式（4）中，将式（7）、式（8）代入式（2）即可得到光伏电池输出特性，其中a和c为温度补偿系数，取值为$a=0.002\ 5$，$c=0.002\ 88$；b为光强补偿系数，取$b=0.000\ 5$。

1.2 模型输出特性分析

在Simulink仿真环境中搭建光伏电池模型，如图2所示，以验证和探究光伏电池的输出特性，对比了环境温度恒定、

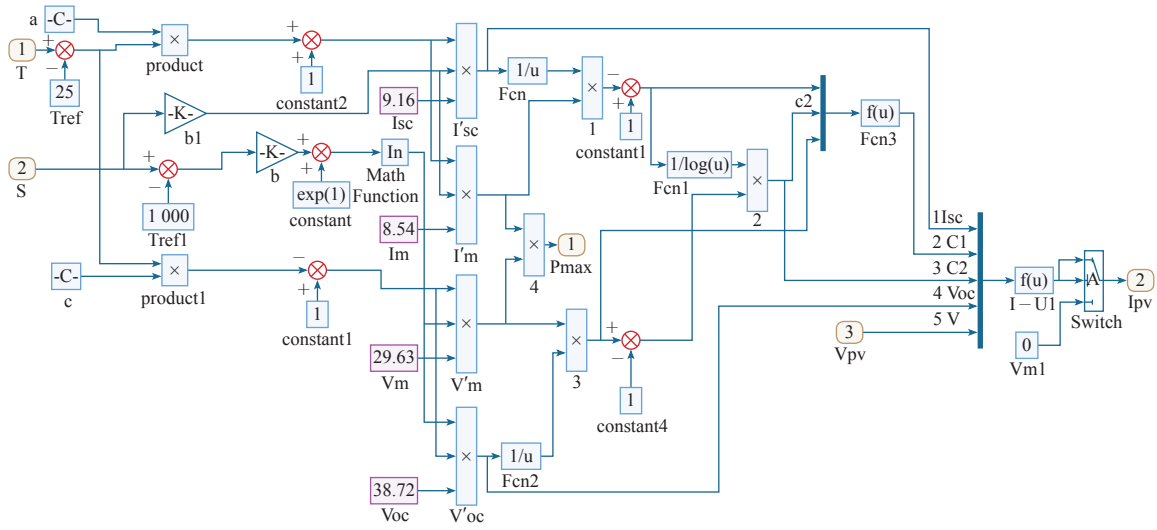
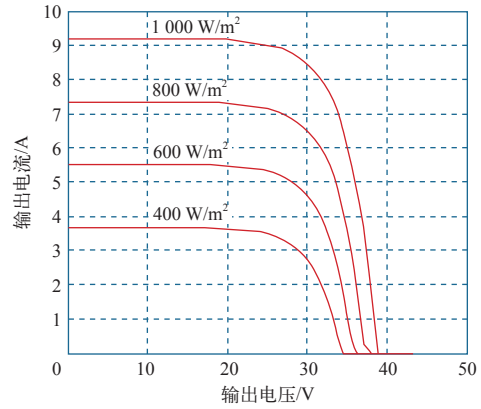
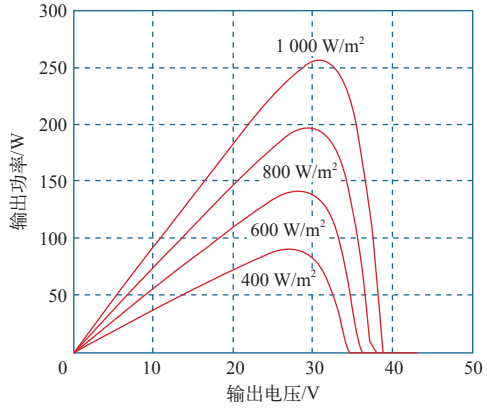


图2　光伏电池模型

光照强度变化输出特性并得到了仿真曲线，图3为不同光照环境下光伏电池的输出特性曲线。



（a）不同光照$I-U$曲线



（b）不同光照$P-U$曲线

图3　不同光照环境下光伏电池的输出特性曲线

光伏电池外特性实质就是电流随电压变化的曲线，当改变其端电压时，其输出电流随即也会相应变化，因此功率也会随电压相应变化，由图3b可知，在确定环境下存在唯一的最大功率点，因此设计优质的最大功率点跟踪控制方法即可跟踪到这一工作状态。

2　最大功率点跟踪控制

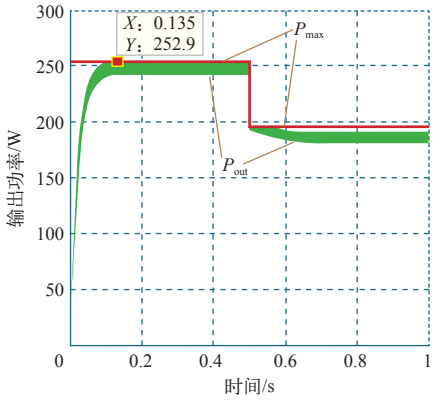
MPPT控制方法实质是通过改变电池外部的负载特性使其工作在最大功率点处，现有的最大功率点跟踪方法有恒定电压跟踪法、扰动观察法、电导增量法和人工智能法等。恒电压跟踪法存在较大的稳态误差，电导增量法在数字信号处理器中会有大量的微分计算[7]，扰动观察法具有较好的应用前景。其中，扰动观察法扰动和占空比扰动机理基本相同，也会存在扰动步长大小的问题。因此本文设计了基于Matlab/Simulink的两种电压扰动观察法：一种是定步长扰动观察法；另一种是（自适应）变步长扰动观察法。

2.1　定步长扰动观察法分析

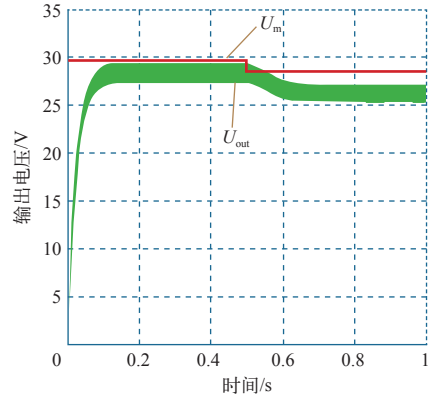
本文利用Boost电路实现最大功率点跟踪，通过改变Boost电路的占空比改变等效负载大小。定步长扰动观察法是以固定步长ΔU（$\Delta U>0$）为扰动量，其中U_k为第k次的电压采样值，U_{ref}为第$k+1$次的电压参考值，算法如下

$$\begin{cases} U_{ref}=U_k+\Delta U & \Delta P>0 \\ U_{ref}=U_k-\Delta U & \Delta P<0 \end{cases} \tag{9}$$

本文取$\Delta U=0.5$ V，功率、电压随时间变化的输出波形如图4所示，最大功率点（$P_{max}=253.06$ W）在$t=0.135$ s时，$P=252.6$ W被跟踪到，并逐渐稳定在MPP附近，存在较大稳态误差且不断振荡，而当外部光照强度变化时，控制算法并不能使系统很好地跟踪最大功率点的变化。



（a）定步长输出$P-t$图像



（b）定步长输出$U-t$图像

图4　功率、电压随时间变化的输出波形

2.2　自适应变步长扰动观察法分析

由于定步长扰动观察法是以固定的扰动步长施加的电压扰动，因此步长的大小决定了在最大功率点处振荡的幅度，步长过大会产生较大幅度振荡[8]，增加功率损失；步长过小，会使系统达到稳态的时间较长。

针对定步长扰动观察法存在的在最大功率点附近振荡的问题，提出了一种自适应变步长扰动观察法[9]。变步长扰动观察法的迭代公式为

$$U_{ref}=U_k+\Delta U_k \tag{10}$$

式中，U_k为第k次的光伏电池电压输出值。

要解决对$P-U$曲线关于U_m点左右不对称的问题，就要使每次迭代扰动步长ΔU_k跟随曲线斜率变化，因此本文提出了如下算法

$$\Delta U_k=\begin{cases}\alpha\left(\dfrac{\Delta P}{\Delta U}\right)^2 & \dfrac{\Delta P}{\Delta U}>0\\ \alpha\dfrac{\Delta P}{\Delta U} & \dfrac{\Delta P}{\Delta U}<0\end{cases} \tag{11}$$

式中，α为步长调节因子，仿真中取$\alpha=0.55$。

由$P-U$输出特性可知，当工作点靠近MPP时，曲线斜率绝对值减小，即$|\Delta P/\Delta U|$减小，这时要求减小扰动步长以寻求更接近最大功率点的工作状态，因此扰动步长ΔU_k就应该是关于此斜率的函数关系式，因此提出的式（11）恰好满足了以上要求，图5为此算法的程序流程。

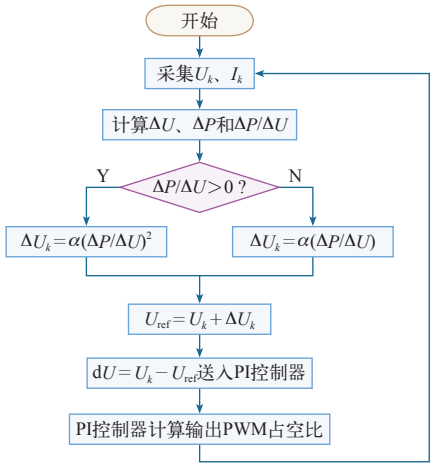
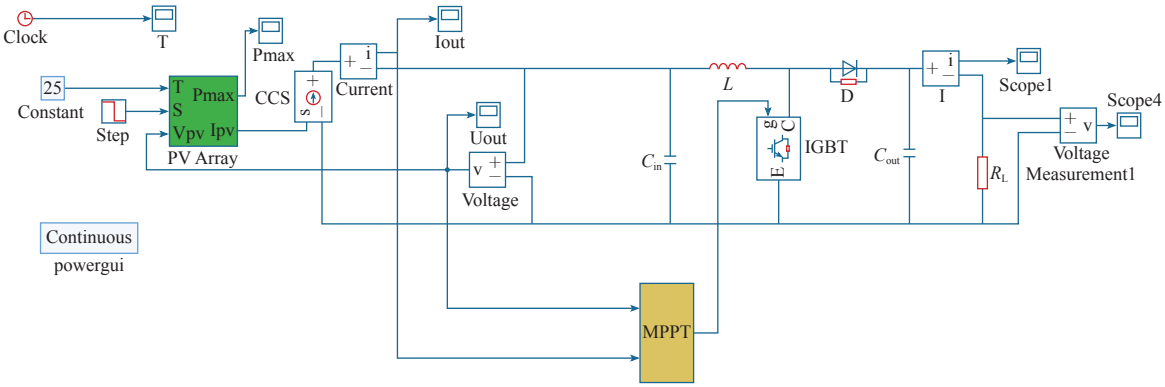


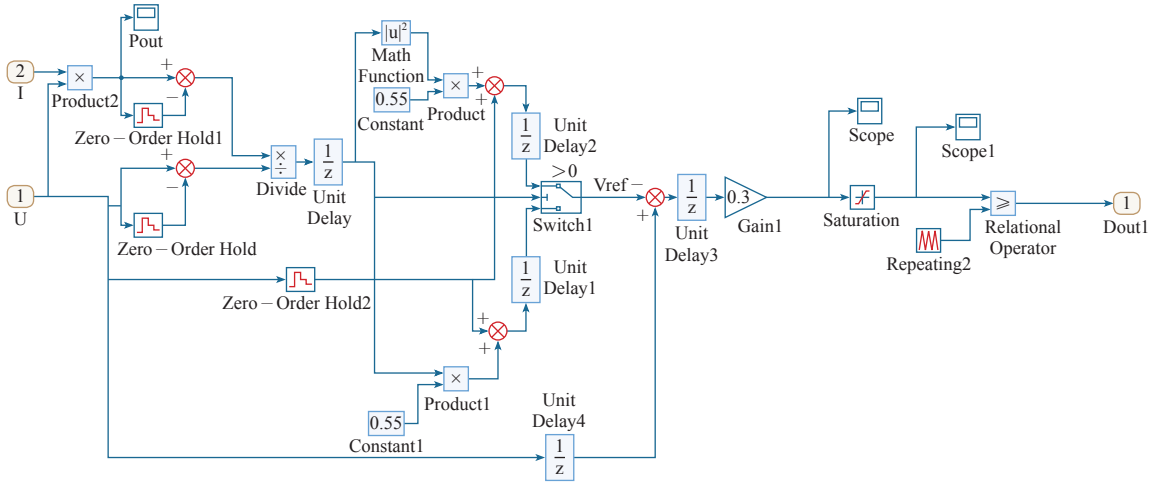
图5　自适应扰动观察法程序流程

程序开始后，采集第k次的电压、电流值，而后计算前后两次采样的电压差值ΔU、ΔP，再计算$\Delta P/\Delta U$的数值及符号，根据符号计算第k次的电压扰动量ΔU_k，再求得第$k+1$次的电压参考量U_{ref}，并将实际值与参考值的差值dU送入PI控制器，由PI控制器计算占空比，控制电容两端电压，从而控制了光伏电池的输出电压。利用Matlab/Simulink搭建主电路及MPPT控制电路仿真模型，如图6所示。

部分物理参数如下表所示，设置光伏电池板的各参数值为：$U_{oc}=38.72$ V，$I_{sc}=9.16$ A，$U_m=29.63$ V，$I_m=8.54$ A。计算得到在环境温度$T=25$ ℃、光照强度$S=1\ 000$ W/m^{2}时，最大功率$P_{max}=U_mI_m=253.06$ W。



（a）系统主电路仿真



（b）MPPT控制电路仿真

图6　主电路及MPPT控制电路仿真模型

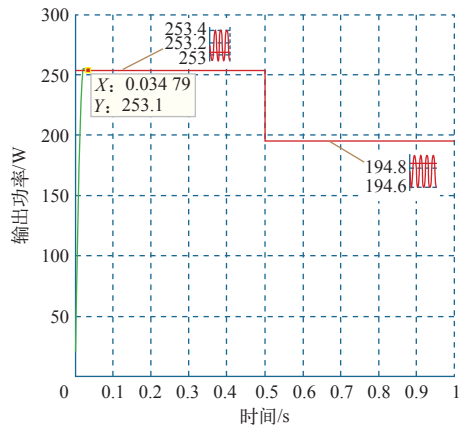
表　部分物理参数

电气参数	数值
最大功率P_{max}/W	253.06
最大功率点电压U_m/V	29.63
最大功率点电流I_m/A	8.54
开路电压U_{oc}/V	38.72
短路电流I_{sc}/A	9.16
电感L/mH	0.1
电容C_{in}/μF	4 700
电容C_{out}/μF	1 000

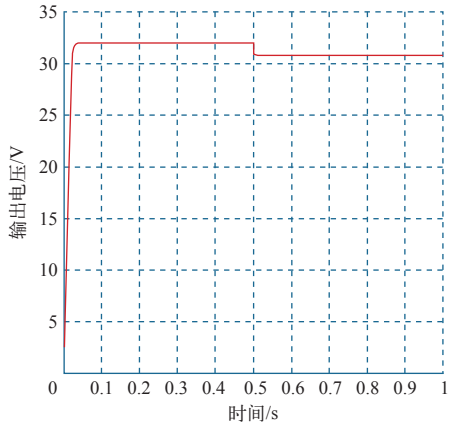
2.3　结果分析

变步长扰动观察法输出功率、电压随时间变化图像如图7所示。由图7a可见，在自适应扰动观察法控制下，系统在0.03 s时跟踪到最大功率点P_{max}且存在很小稳态误差，功率误差为－0.12～＋0.35 W，误差率为0.19%，达到了预期效果。

在t＝0.5 s时，温度保持25 ℃不变，将光照强度从1 000 W/m^{2}降到800 W/m^2，可见所设计的MPPT控制算法使得系统在短时间内即可稳定在新的最大功率点处，并且暂态过程很短。还可见最大功率点处电压U_m随光照强度改变变化不大，而MPP



（a）变步长扰动观察法输出$P-t$图像



（b）变步长扰动观察法输出$U-t$图像

图7　变步长扰动观察法输出功率、电压随时间变化图像

处电流I_m变化较大。

3　结束语

综上所述，通过对两种扰动观察法的仿真分析比较可以看出，定步长扰动观察法控制简单，计算量小且易于实现，但跟踪准确度差，且会在MPP附近发生振荡。其功率振荡范围为242.1～251.9 W，功率误差为4.20%，调节时间（t_{s1}=0.12 s）为变步长扰动观察法调节时间（t_{s2}=0.012 s）的10倍，并且稳态功率较P_{max}存在较大误差。本文提出一种自适应变步长扰动观察法，由仿真实验证明变步长扰动观察法可以克服在最大功率点两侧$P-U$曲线斜率不对称问题，可以在极短时间（t_r=0.045 s）追踪到最大功率点P_{max}且稳定于此工作点，并且功率误差为0.19%，因此大大减少了定步长跟踪法的振荡功率损耗；并且在外部环境发生变化时，系统可以快速、准确地跟踪光伏电池最大功率点的变化。

由于光伏电池板会存在突然被遮挡等影响因素，光照强度会发生突变。因此本文重点研究了光伏电池输出功率随光照强度变化的稳定性，证明本控制算法是一种性能较好且实用的MPPT控制方法。

参考文献

[1] 朱铭炼，李臣松，陈新，等．一种应用于光伏系统MPPT的变步长扰动观察法 [J]．电力电子技术，2010，44 (1)：20-22．

[2] 王丽萍，张建成．光伏电池最大功率点跟踪控制方法的对比研究及改进 [J]．电网与清洁能源，2011，27 (2)：52-55．

[3] 韩富佳，王淳．基于Matlab的分布式光伏并网发电系统对配电网电能质量的影响 [J]．电测与仪表，2015，52 (14)：16-21．

[4] 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．

[5] 苏建徽，余世杰，赵为，等．硅太阳电池工程用数学模型 [J]．太阳能学报，2001，22 (4)：409-412．

[6] 焦阳，宋强，刘文华．光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真 [J]．电网技术，2010，34 (11)：198-202．

[7] Premrudeepr S，Patanapirom N．Solar-array modeling and maximum power point tracking using neural networks [C]．2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings，Bologna：IEEE，2003．

[8] 邱革非，张春刚，仲泽坤，等．基于扰动观察法和电导增量法的光伏发电系统MPPT算法研究综述 [J]．中国电力，2017，50 (3)：154-160．

[9] Wang Y，Ding L，Li N．The application of fuzzy parameters self-tuning PID controller in MPPT of photovoltaic power system [C]．International Conference on Transportation，Mechanical，and Electrical Engineering．Changchun，China：IEEE，2011：1129-1132．

（收稿日期：2018－02－10）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告