基于光伏并网系统的变步长最大功率追踪研究

李文志[1]，马承芳[2]，罗　威[2]，湛　顶[2]，杨文星[1]，姚　平[1]

（1. 长江大学物理与光电工程学院，湖北 荆州 434023；

2. 国网湖北省电力有限公司荆州供电公司，湖北 荆州 434000）

摘要：针对定步长电导增量法小步长追踪响应速度慢、大步长易出现振荡的缺点，提出了一种改进型变步长电导增量算法。同时分析了光伏三相并网发电系统的控制策略，利用 PSCAD 仿真软件搭建了光伏三相并网发电系统的仿真模型。在该模型中，通过改变光照和温度条件，对改进型变步长电导增量算法进行了仿真验证，相同条件下对定步长电导增量法进行了仿真，并与变步长算法进行了对比。仿真结果对比表明，改进型变步长电导增量算法不仅兼顾了对最大功率的快速响应追踪和最大功率保持稳定的优点，同时还改善了光照强度或温度下降的情况下产生的功率过冲现象，有效地提高了光伏并网系统的效率和稳定性。

关键词：变步长；电导增量法；光伏并网；PSCAD

Research on maximum power tracking with variable step size based on photovoltaic grid-connected system

LI Wenzhi[1], MA Chengfang[2], LUO Wei[2], ZHAN Ding[2], YANG Wenxing[1], YAO Ping[1]

(1. Yangtze University School of Physics and optoelectronic Engineering, Jingzhou 434023, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Company, Jingzhou Power Supply Company, Jingzhou 434000, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the constant step conductance increment method, such as slow response speed and easy oscillation of the large step conductance increment method, an improved variable step conductance increment algorithm was proposed. At the same time, the control strategy of photovoltaic three-phase grid-connected power generation system is analyzed, and the simulation model of photovoltaic three-phase grid-connected power generation system is built by using PSCAD simulation software. In this model, the improved variable step conductance increment algorithm is simulated and verified by changing the lighting and temperature conditions. Under the same conditions, the constant step conductance increment method is simulated and compared with the variable step method. The simulation results show that the improved variable step conductance increment algorithm not only takes into account the advantages of fast response tracking to the maximum power and keeping the maximum power stable, but also improves the power overshooting phenomenon under the condition of light intensity or temperature drop, which effectively improves the efficiency and stability of the photovoltaic grid-connected system.

Key words: variable step size; incremental conductivity method; photovoltaic grid-connected; PSCAD

国网湖北省电力有限公司科技项目资助 (B315J4221610)

0 引言

光伏电池的输出功率曲线表现出复杂的非线性，并且受到环境温度、太阳辐照度等因素的影响。当太阳辐照度和环境温度一定时，光伏电池可以工作在不同的输出电压下，但是只有在某一特定的输出电压值时，其输出功率才能达到最大值，此时光伏电池阵列的工作点称为最大功率点。当太阳辐照度和环境温度发生改变时，最大功率点的位置也会发生改变，使实际工作点与最大功率点产生偏移，造成发电功率损失。因此，在光伏发电系统中，要想提高系统效率，就需要实时调整光伏电池的工作点，使其始终跟随最大功率点，这个过程称为最大功率追踪[1-2]。研究人员提出了多种最大功率点追踪技术（MPPT），常见的最大功率追踪方法有：恒定电压法（CVT）、扰动观察法（P&O）和电导增量法（INC）等。普通的电导增量法具有能够快速适应日照变化、跟踪准确度较高等优点，采用恒定的步长进行功率追踪。当步长设置过小时，跟踪速度较慢；当步长设置过大时，产生较大的振荡[3-5]。同时，一些针对电导增量法的研究仅对光伏阵列与MPPT控制器的模型进行了仿真分析，未对并网情况下的光伏发电系统进行仿真研究。本文针对定步长电导增量法的缺点设计了一种变步长的电导增量法，搭建了光伏并网发电系统，实现了光伏并网发电系统的最大功率追踪。

1 光伏电池理论模型

1.1 光伏电池模型

光伏电池用于把太阳的光能直接转化为电能，其理论电路模型如图1所示[6]。

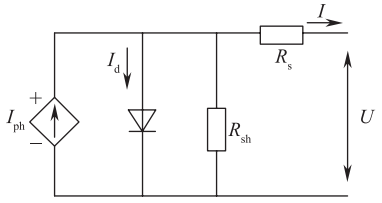


图 1 光伏电池理论电路模型图

Fig. 1 Theoretical circuit model of photovoltaic cell

本文使用一个较为实用的光伏电池的数学模型为

$$I_{pv}=I_{scp}\left\{1-C_1\left[\exp\left(\frac{V_{pv}}{C_2V_{ocp}}\right)-1\right]\right\} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases}C_1=\left(1-\dfrac{I_{mp}}{I_{scp}}\right)\exp\left(-\dfrac{V_{mp}}{C_2V_{ocp}}\right)\\ C_2=\left(\dfrac{V_{mp}}{V_{ocp}}-1\right)\left[\ln\left(1-\dfrac{I_{mp}}{I_{scp}}\right)\right]^{-1}\end{cases} \tag{2}$$

为得到各温度、光照环境下的模型参数，引入补偿系数，对任意光照S和温度T下的I_{sp}、V_{ocp}、I_{mp}和V_{mp}四个参数进行修正，即

$$\begin{cases}I_{sp}=I_{scpref}\left(1+a\mathrm{DT}\right)\mathrm{SPS}\\ V_{ocp}=V_{ocpref}\ln\left(e+b\mathrm{DS}\right)\left(1-c\mathrm{DT}\right)\\ I_{mp}=I_{mpref}\left(1+a\mathrm{DT}\right)\mathrm{SPS}\\ V_{mp}=V_{mpref}\ln\left(e+b\mathrm{DS}\right)\left(1-c\mathrm{DT}\right)\end{cases} \tag{3}$$

式中，$\mathrm{SPS}=S/S_{ref}$；$\mathrm{DS}=S-S_{ref}$；$\mathrm{DT}=T-T_{ref}$；S_{ref}为参考光照辐射强度；T_{ref}为参考光伏电池温度；e为自然对数；a、b、c为常数。

1.2 光伏电池输出特性

通过对某光伏电池模型进行仿真，得到了相同温度、不同光照条件下光伏电池的I-U曲线和P-U曲线。I-U曲线如图2所示，P-U曲线如图3所示，其中I为短路电流，U为开路电压，P为输出功率。从图2可以看出，光照强度变化对短路电流影响较大，对开路电压影响较小。从图3可以看出，光照强度发生变化时，输出功率发生较大变化，但最大功率点偏移量并不大，随着光照度的增大，最大功率点向右偏移[7-8]。

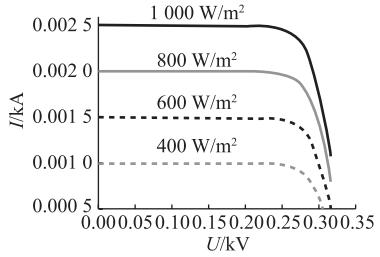


图 2 光伏电池 *I-U* 曲线

Fig.2 *I-U* curve of photovoltaic cells

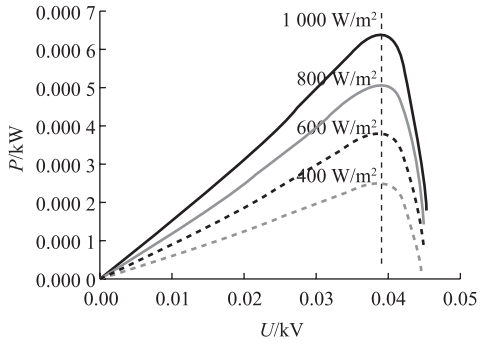


图 3　光伏电池 *P-U* 曲线

Fig.3 PV cell *P-U* curve

2　最大功率追踪算法设计

2.1　电导增量法基本原理

电导增量法是一种常用的MPPT控制算法，其原理是光伏电池工作状态点处于最大功率点处时，光伏输出功率对电压的微分为零；而工作状态点处在最大功率点左侧和右侧时，光伏输出功率对电压的微分分别为大于零和小于零。对输出电压进行扰动，同时对光伏电池的工作状态点进行判断，以确定正确的扰动方向，最终找到最大功率点。

光伏电池的输出功率$P=UI$，两边同时对U进行微分，并使功率对电压的微分为零，即

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}=\frac{\mathrm{d}(UI)}{\mathrm{d}U}=I+U\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}=0 \tag{4}$$

在最大功率点处应满足

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U}=-\frac{I}{U} \tag{5}$$

通过式（5）可以确定下一次电压扰动的正确方向，可分成三种情况[9]：

1）当$\mathrm{d}I/\mathrm{d}U>-I/U$时，说明此时光伏电池工作状态点处于最大功率点的左侧，应当增大电压。

2）当$\mathrm{d}I/\mathrm{d}U<-I/U$时，说明此时光伏电池工作状态点处于最大功率点的右侧，应当减小电压。

3）当$\mathrm{d}I/\mathrm{d}U=-I/U$时，说明此时光伏电池工作状态点正好处于最大功率点处，此时应保持电压不变。

传统的电导增量法的电压扰动步长采用定步长的方式，而这种方式要求步长ΔU大小的选取必须适当。若步长ΔU较小，能够减小工作在最大功率点附近时的电压振荡，但寻找最大功率点的速度较慢；若步长ΔU较大，能够提升寻找最大功率点的速度，但工作在最大功率点附近时的电压振荡较大。同时由于在不同温度、光照条件的环境中，光伏电池的P-U曲线各不相同，在某一温度、光照条件下确定的合适步长ΔU在其他温度、光照条件下不一定适合，这将影响光伏发电的效率和质量。

2.2　变步长电导增量法设计

针对传统的电导增量法的定步长的缺点，需要采用变步长的方式进行改进。在远离最大功率点时选用较大步长的扰动电压，靠近最大功率点时选用较小步长的扰动电压，既能兼顾追踪速度，又能减小振荡。

光伏电池的P-U曲线变步长示意图如图4所示。从图4中可以看出输出功率对电压的导数，即图4中曲线的斜率在最大功率点的左侧大于零、右侧小于零，且越靠近最大功率点，曲线斜率的绝对值越小，最终趋近于零。根据此特性提出变步长的基本思想，以输出功率对电压的导数$\mathrm{d}P/\mathrm{d}U$作为调节因子，得到实时的步长值为

$$\Delta V=K\left|\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}\right| \tag{6}$$

式中，K为一个步长比例系数。

从式（6）可以看出，当P-U曲线斜率的绝对值越小，实时的步长值越小，即越靠近最大功率点，调整的步长值越小。这就使得快速追踪到最大功率点后输出功率能够保持相对稳定。

在上述变步长的基础算法中，比例系数K的取值仍然比较重要。在光照、温度条件相同的情况下，P-U曲线左侧斜率绝对值较小，距最大功率点较远；右侧斜率绝对值较大，距最大功率点较近。若K值较小，则左侧设定的步长较小，影响追踪效率；若K值较大，则右侧设定的步长较大，影响静态的振荡幅度。在光照、温度条件发

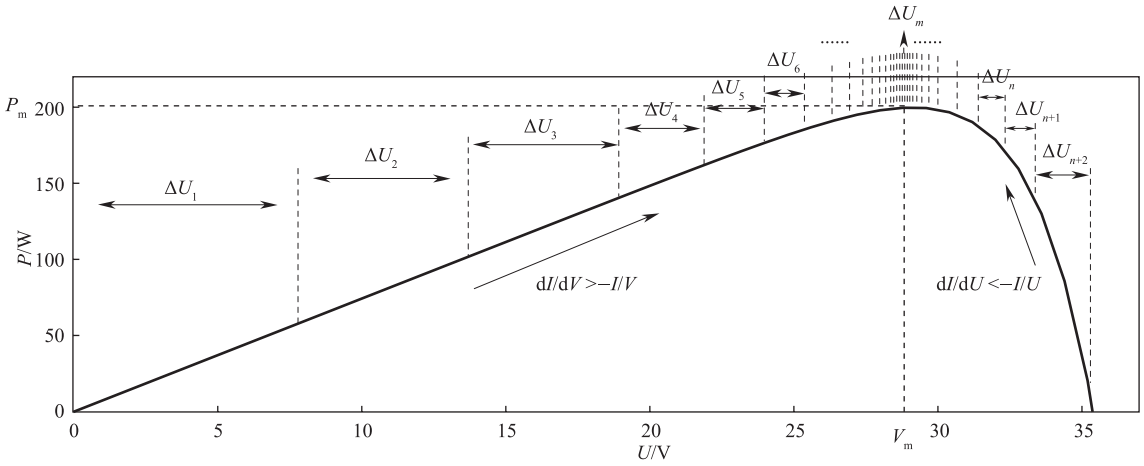


图 4　*P-U* 曲线变步长示意图

Fig. 4 Schematic diagram of *P-U* curve changing step size

生变化时，*P-U*曲线左右侧斜率绝对值同时变大或减小，而最大功率点附近斜率变化的缓冲区域较小，此时光照、温度的变化可能引起步长设定的错误，导致在最大功率点附近的步长过大引起输出功率产生较大的振荡现象[10-11]。

上述的基础变步长算法不能适应各种环境情况所带来的影响，为减小这些不良影响，对原算法进行修正改进。采用分区设置比例系数的方法，在最大功率点左侧，设置步长比例系数为K_1；在最大功率点右侧，设置步长比例系数为K_2，且$K_1>K_2$。为了减小光照、温度的变化引起最大功率点附近的步长过大，引入指数衰减，得到改进后的实时的步长值为

$$\begin{cases}\Delta U=K_1 a^{\left(\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}-1\right)} & \mathrm{d}P/\mathrm{d}U>0\\ \Delta U=K_2 a^{\left(-\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U}-1\right)} & \mathrm{d}P/\mathrm{d}U<0\end{cases} \tag{7}$$

式中，a为指数系数，且$a>0$。

引入指数衰减，使得在远离最大功率点时，步长较大；在靠近最大功率点时，步长提前产生指数衰减，避免在最大功率点附近产生大步长而导致过冲振荡。同时，由式（7）可知，在远离最大功率点时，dP/dU较大，有可能产生超大步长ΔU，因此还需引入一个步长阈值$U_{\max}$，使所有的步长$\Delta U<U_{\max}$。改进后的变步长增量电导法程序流程图如图5所示。

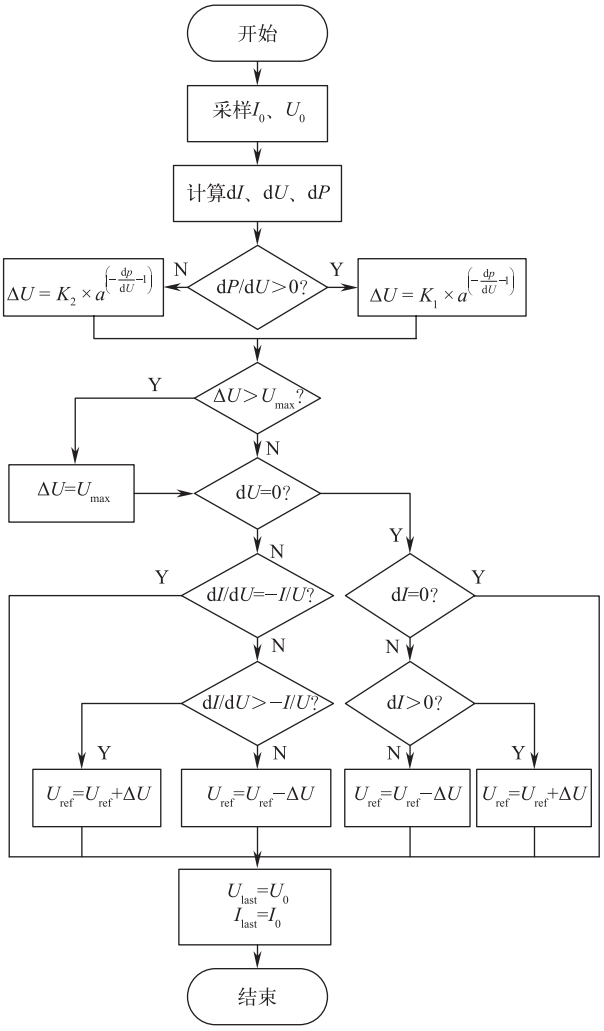


图 5　改进的变步长增量电导法程序流程图

Fig. 5 Procedure flow chart of improved variable step size incremental conductance method

3 光伏并网系统控制原理及仿真模型搭建

本文在PSCAD软件环境下搭建光伏三相并网发电系统模型，对改进型的变步长电导增量法进行验证。系统的并网控制原理图如图6所示。此系统为单极式三相光伏逆变系统，系统的控制策略为功率外环控制和电流内环控制。

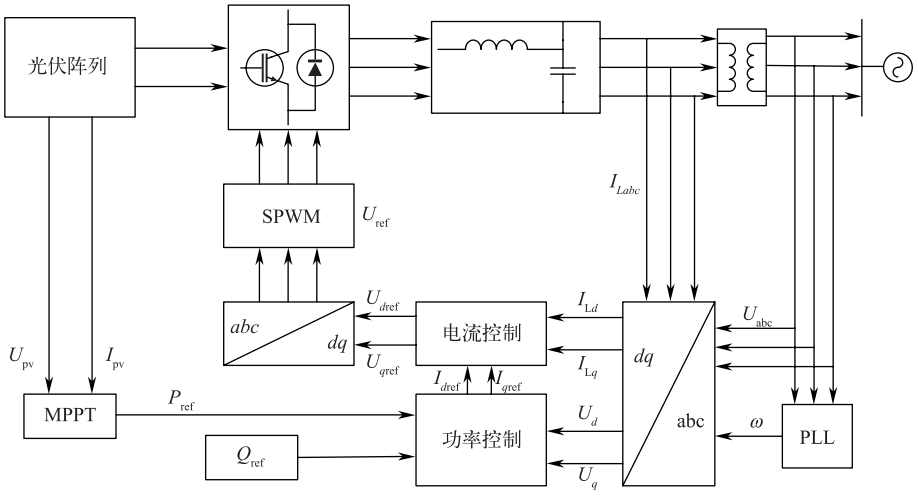


图 6 系统的并网控制原理图

Fig. 6 Schematic diagram of grid-connected control system

光伏并网的控制目标是对输出功率进行控制，光伏三相并网系统在并网点的三相电压为电网电压，可认为并网点的三相电压是恒定的，因此对并网系统的控制间接地转换成了对三相电流的控制。由于对三相电流分别进行单独的控制会使系统变得复杂，因此引入了派克变换，将*abc*坐标系下的三相交流量转换成*dq*坐标系下的两相直流量进行计算、控制，简化了控制系统的设计[12-13]。

功率外环控制是通过将最大功率追踪模块（MPPT）得到的输出参考功率与并网点三相电压经过派克变换，得到的*dq*轴电压进行处理，得到*dq*坐标系下的参考电流的过程。

电流内环控制是通过将并网点三相电流进行派克变换，得到*dq*轴电流，与功率外环控制得到的*dq*轴参考电流做PI运算，得到*dq*轴参考电压，对*dq*轴参考电压做派克反变换，得到*abc*坐标系下的三相参考电压，作为SPWM的输入信号对逆变电路开关管进行控制，进而调节并网点三相电流。

在PSCAD软件中搭建了单极式光伏三相并网发电系统的仿真模型，仿真模型的主电路图如图7所示，主要包括光伏阵列、DC-AC逆变控制电路、变压器和电网电源等[14-17]。光伏阵列由式（1）～式（3）所述数学模型搭建，其中S_{ref}=1 000 W/m^2，T_{ref}=25℃，e=2.71 828 183，取a=0.002 5/℃、b=0.000 5/（W/m^2）、c=0.002 88/℃，所得到的光伏阵列的开路电压U_{oc}=810 V，短路电流I_{sc}=178.5 A。DC-AC逆变控制电路的直流侧采用30 000 μF的电容起到滤波以及储存能量的作用，三相逆变部分由6个IGBT组成，对系统进行最大功率追踪后，产生PWM脉冲信号驱动6个IGBT，完成逆变以及调整工作点对最大功率点进行追踪，逆变电路的开关频率为7 500 Hz。逆变后的交流电通过变压器后并入50 Hz电网电源，交流侧每一相都并联一个100 μF电容进行滤波。

4 仿真结果及分析

在PSCAD搭建的仿真模型中，首先对定步长电导增量法在不同的步长大小下分别进行仿真，设定光伏阵列的温度恒定为26℃，光照均匀，初始光照强度为1 000 W/m^2，在第15 s时光照强度突变为800 W/m^2，在第23 s时光照强度突

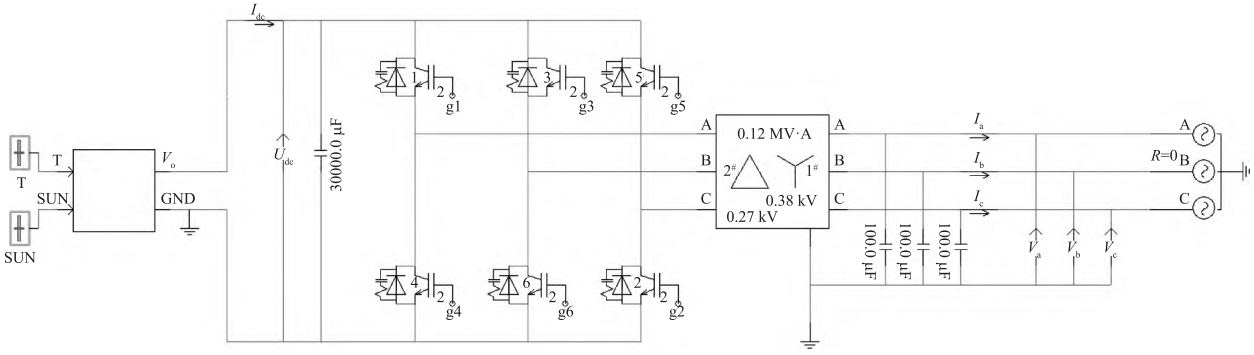


图 7　单极式光伏三相并网发电系统仿真模型主电路图

Fig. 7 Main circuit diagram of simulation model of monopole photovoltaic three-phase grid-connected power generation system

变为1 000 W/m^2。对两组不同步长的模型进行仿真对比，第一组的定步长设定为ΔU=0.05 kV，第二组的定步长设定为ΔU=0.01 kV，仿真结果得到的两组不同步长的并网功率P-U曲线如图8所示。从图8中可以看出，两者在光照条件突变的情况下均能成功追踪到最大功率点，且能够使并网功率保持在最大功率附近。当ΔU=0.05 kV时，步长相对较大，对最大功率点的追踪速度较快，但在最大功率附近产生了明显的振荡现象。当ΔU=0.01 kV时，步长相对较小，在最大功率附近能够保持良好的稳定性，但对最大功率点的追踪速度较慢。由于定步长电导增量法难以选取合适的步长，导致不能同时兼顾对最大功率点的追踪速度和在最大功率附近的稳定性。

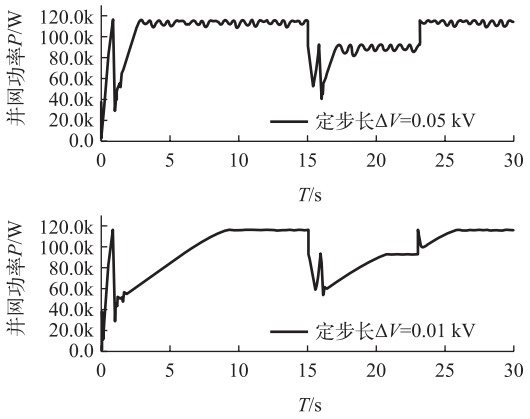


图 8　不同步长的并网功率 *P-U* 曲线图

Fig. 8 *P-U* curve of grid-connected power with asynchronous length

在仿真模型中，对所设计的变步长电导增量算法进行仿真验证。假定光照均匀，设定变步长算法的参数K_1=2、K_2=1，指数系数a=1.1，步长阈值V_{max}=0.05 kV。在仿真中，设定温度和光照强度的状态变化如图9所示。前段时间每6 s进行一次光照强度的突变，每次突变量为100 W/m^2，后段时间每6 s进行一次温度的突变，每次突变量为0.5 ℃，以观察变步长电导增量算法在光照强度和温度发生变化时，是否能够进行快速追踪以及追踪后的稳定情况。其中定步长算法，同时在相同的温度和光照强度状态变化条件下，对定步长的电导增量算法进行一次仿真作为对照，且定步长设定为ΔU=0.03 kV。

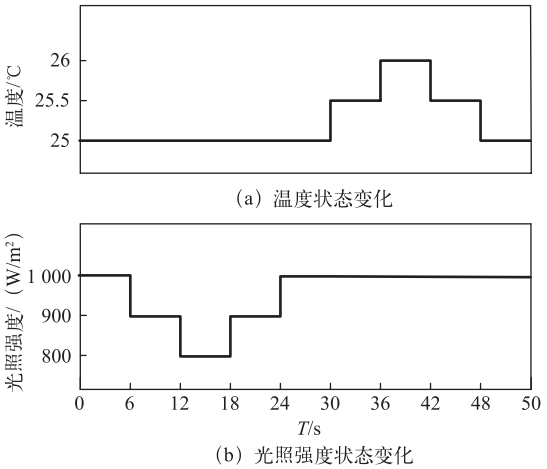


图 9　温度和光照强度状态变化设定图

Fig. 9 Setting diagram of temperature and light intensity state changes

进行仿真后得到变步长和定步长算法的并网功率P-U曲线如图10所示。对比图9、图10可以看出并网功率的变化与温度、光照强度的状态变化密切相关。在0～5 s内，温度、光照强度均未发生改变，此时，系统达到初始最大功率。此

后，每次温度或光照强度发生突变时，变步长和定步长算法下的并网功率均能够及时响应，完成最大功率的追踪。

根据图10中的定步长算法的变化曲线可以看出，ΔV=0.03 kV时的定步长算法的跟踪速度及响应速度都较快，但从图10中的两个放大的局部位置可以看到定步长算法在最大功率附近产生了明显的振荡，且这两处振荡的幅度差异较大。特别是当光照强度或温度下降时，并网功率出现了较为明显的过冲现象，说明光照或温度发生变化时，定步长算法不能很好地适应这种环境变化。从图10中的变步长算法的曲线可以看出，变步长算法在最大功率点追踪速度、环境变化的响应速度和最大功率附近的稳定性上均有较好的表现，特别是在最大功率附近的振荡非常小，明显优于定步长算法，说明该算法的变步长能够同时具有大步长和小步长调节的优点。并且，变步长算法在光照强度或温度下降时，并网功率变化时产生的过冲现象较定步长算法有明显的改善。这是因为所设计的变步长算法中采用了指数衰减的和步长限幅的方式，使在靠近最大功率点之前，步长就已经得到了明显的衰减，减小了产生过大步长的可能，使振荡和过冲现象都得到了明显的抑制。因此与传统的定步长电导增量法相比，本文提出的改进的变步长电导增量法对光伏三相并网系统最大并网功率的追踪和保持均具有良好的表现。

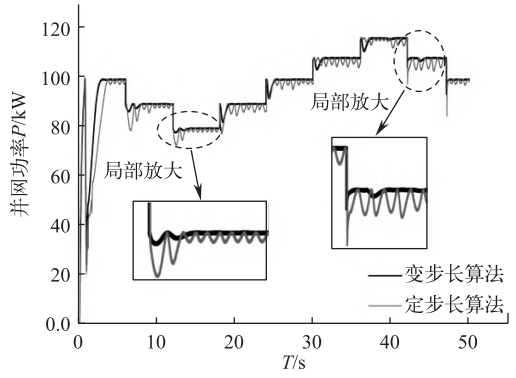


图 10　变步长和定步长算法的并网功率 *P-U* 曲线

Fig. 10 *P-U* curve of grid-connected power of variable step size and constant step size algorithm

5　结束语

本文针对定步长电导增量法小步长追踪响应速度慢、大步长易振荡的缺点，提出了一种指数衰减型的变步长电导增量法，并在PSCAD软件中搭建光伏三相并网发电系统的模型。在该模型中，对设计的变步长电导增量法进行了仿真验证，并在相同情况下做了定步长电导增量法的对比仿真实验。从最后的结果可以看出，本文设计的变步长电导增量法不仅实现了光伏三相并网发电系统稳定的功率输出，同时相比于定步长电导增量法，本算法追踪响应速度和稳定性均有所改善。

参考文献

[1] 靳肖林，文尚胜，倪浩智，等．光伏发电系统最大功率点跟踪技术综述[J]．电源技术，2019，43(3)：532-535．

[2] 童建林，周有为，钟雨哲，等．基于自适应MPPT算法的光伏发电系统低压穿越的控制策略研究[J]．电气应用，2022，41(6)：39-47．

[3] 刘聘凭，程若发，许立斌，等．基于光伏MPPT采样电流的自适应变步长INC算法[J/OL]．电源学报，2022(10)：1-14．

[4] 葛传九，武鹏，董祥祥，等．基于布谷鸟算法的光伏MPPT改进[J]．太阳能学报，2022，43(10)：59-64．

[5] 张忠，杨宝峰，李志伟，等．基于新型变步长电导增量法的MPPT算法研究[J]．电力电容器与无功补偿，2020，41(5)：187-191．

[6] 李禹生，李伟令，李晓辉，等．基于PSCAD的太阳能电池模型与MPPT算法的仿真与实现[J]．电气应用，2019，38(10)：17-21．

[7] 李宏俊，刘薇，胡开明．太阳能光伏并网发电中最大功率点追踪的仿真研究[J]．南方农机，2022，53(11)：20-23．

[8] 李勇，程汉湘，陈杏灿，等．光伏电池输出特性及其最大功率跟踪研究[J]．华北电力大学学报(自然科学版)，2017，44(1)：70-75．

[9] 赵晓亮．一种变步长电导增量法在光伏系统最大功率跟踪中的应用研究[J]．中国设备工程，2022(3)：213-215．

[10] 魏立明，吴扬昀．基于改进电导增量法的光伏MPPT策略研究[J]．电源技术，2021，45(6)：791-796．

[11] 闫志威，王志和，李靖．基于双指数函数变步长电导增量法改进的光伏最大功率跟踪控制策略[J]．科学技术与工程，2020，20(24)：9904-9910．

[12] 周东宝，陈渊睿．基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]．电网技术，2015，39(6)：1491-1498．

[13] 吴芳柱，陆柳敏．低压分布式光伏接入对台区电能质量影响分析[J]．电工电气，2022(7)：22-27．

[14] 孙佳．单相光伏并网发电系统的仿真与控制研究[D]．北京：华北电力大学，2014．

[15] 姚致清，张茜，刘喜梅．基于PSCAD/EMTDC的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]．电力系统保护与控制，2010，38(17)：76-81．

[16] 李艳，邵文权，程远，等．基于PSCAD/EMTDC的单相光伏发电系统并网仿真研究[J]．电气时代，2018(3)：67-72．

[17] 闫根弟．微网光伏双模式逆变器双环控制策略研究[J]．电气应用，2020，39(3)：55-59．

作者简介

李文志（2001—），男，硕士研究生，研究方向为电力电子技术。

马承芳（1977—），女，通信作者，工程师，从事电网规划、工程管理工作。

（收稿日期：2023-01-12）