

[光伏发电]

基于变步长电导增量法的光伏最大功率点跟踪策略

文/江苏师范大学电气工程及自动化学院 邢梦晴 白春艳 闫淑婷 陆雨婷 侯金林

针对传统电导增量法跟踪准确度和速度不能兼顾的问题,通过研究光伏电池在不同光照强度和温度下的 $P-U$ 输出特性,提出了一种变步长的电导增量法。在Matlab/Simulink环境下搭建模型并进行仿真比较,结果表明变步长电导增量法可以显著改善振荡,提高跟踪速度。

太阳能作为一种新能源,具有清洁、无污染且资源丰富等特点,因此成为缓解全球能源危机、环境污染的首选能源。光伏发电是将太阳能转换为电能的技术,由于太阳能是取之不尽用之不竭的可再生能源,因此从中长期的观点来看,光伏发电技术对改善我国能源结构具有相当重要的影响。在光伏发电系统中,最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)的研究对于提高系统的整体效率具有重要意义。

目前国内外研究者已经提出了多种MPPT控制算法,较为典型的有:扰动观察(P&O)法、电导增量(INC)法、固定电压(CV)法和固定电流(CC)法等。其中,电导增量法响应速度快,控制准确度高,应用广泛;但传统的电导增量法对于追踪速度与稳态准确度难以兼顾,因此在步长的选择上存在一些问题。本文通过分析光伏电池的工作特性,提出一种变步长电导增量法,并在Matlab/Simulink环境下对传统电导增量法和变步长电导增量法进行了仿真对比,验证了改进后的算法在光照强度变化时,能够快速准确地跟踪到最大功率点。

光伏电池的输出特性

光伏电池是基于光生伏特效应将太阳能转化

为电能输出的半导体器件,光伏电池的等效电路如图1所示。

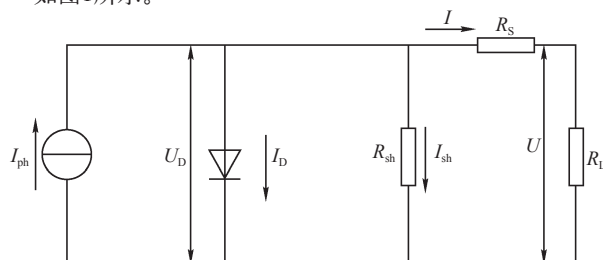


图1 光伏电池等效电路

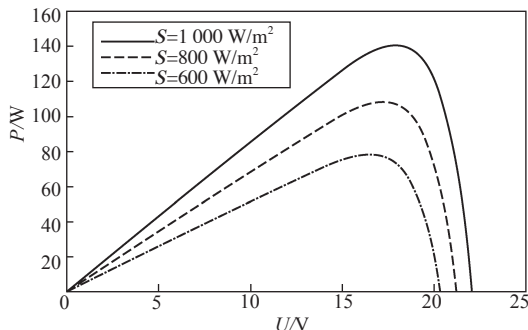
光伏电池的输出伏安特性表达式为

$$I = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

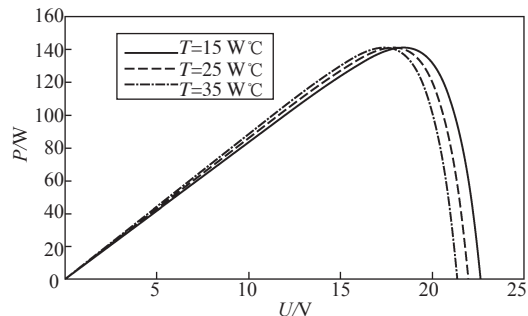
式中, I 为光伏电池输出电流; I_{ph} 为光生电流; I_o 为流过二极管的反向饱和电流; q 为电子电荷; k 为玻尔兹曼常数; A 为PN结理想因子; U 为光伏电池输出电压; T 为光伏电池绝对温度; R_s 为光伏电池内部等效串联电阻; R_{sh} 为内部等效并联电阻。

根据光伏电池的数学模型,运用Matlab/Simulink对光伏电池在不同光照强度、温度下的 $P-U$ 特性进行仿真,结果如图2所示。由图2可以看出,光伏电池的 $P-U$ 输出特性具有非线性,且当光照强度、温度等外界环境发生变化时,其输

出的最大功率点随之改变, 光伏系统的输出效率也会因此受到影响。因此, 需要在光伏系统中采用MPPT控制策略来快速准确地跟踪最大功率点, 从而使得光伏电池电能转化效率最大化。



(a) 25℃, 不同光照强度下P-U特性曲线



(b) 1000 W/m², 不同温度下P-U特性曲线

图2 光伏电池输出特性曲线

电导增量法

1. 传统电导增量法

由图2可知, 在某一固定光照强度下, 光伏电池工作在最大功率点时P-U特性曲线的斜率为零。由于光伏电池输出功率 $P=UI$, 两边对输出电压 U 求导, 可得

$$\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (2)$$

由于在最大功率点处 $\frac{dP}{dU} = 0$, 故式(2)整理后可得

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (3)$$

传统电导增量法是一种常用的MPPT控制算法, 该算法的基本原理是根据式(3)判断光伏电池的电导增量 dI/dU 与瞬时电导 I/U 的关系来控制输出电压的变化方向, 从而对最大功率点进行跟踪。根据式(3), 可得

$$\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U}$$

输出功率位于最大功率点左侧, 应增大当前工作点电压。

$$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}$$

输出功率位于最大功率点右侧, 应减小当前工作点电压。

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}$$

输出功率位于最大功率点处, 应维持当前工作点电压不变。

传统电导增量法的流程如图3所示, 图3中 U_r 为当前时刻的控制电压, ΔU 为控制电压的调整步长。由图3可知, 在最大功率点跟踪的过程中, 通过比较相邻时刻的电压 U 和电流 I 得到 dU 和 dI 。光伏系统通过比较光伏电池的电导增量 dI/dU 和瞬时电导 I/U 的负值两者大小关系来判定系统输出功率是否位于MPP, 如不在, 施加相应的控制电压使输出功率逼近最大功率点。当系统已经工作于MPP, 若外界环境不发生改变, 系统会稳定工作于MPP; 当外界环境发生改变时, 系统通过比较此刻 dI 与0的大小关系判定MPP的变化方向并调节控制电压逼近新的最大功率点。

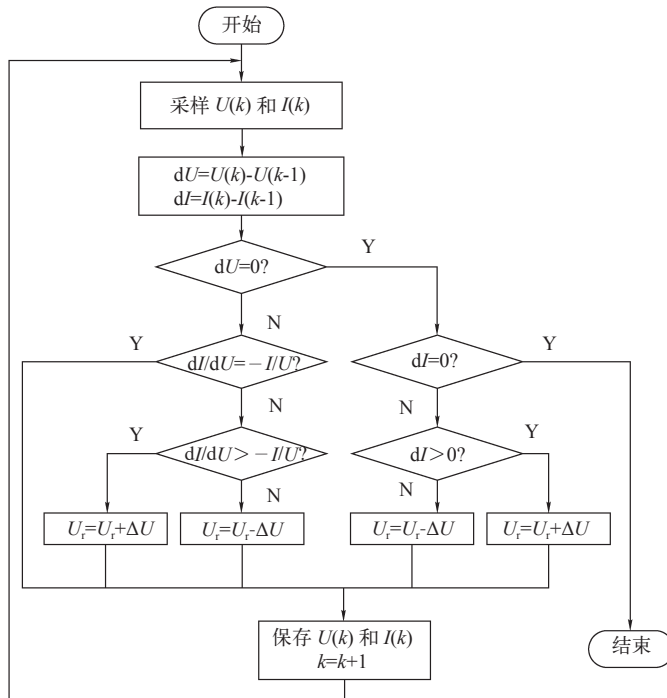


图3 传统电导增量法流程图

传统电导增量法在控制电压步长的选择上存在困难, 步长的大小直接影响系统的跟踪速度和稳态准确度。若步长过小, 跟踪准确度得以提高, 但会导致跟踪速度较慢, 并且在光照强度发生突变时, 无法立即做出相应的改变; 若步长过

大,跟踪速度得以提升,但会降低跟踪准确度,增加输出功率损耗。

2. 变步长电导增量法

为了解决传统电导增量法步长选择的问题,本文提出一种变步长电导增量法,其基本原理是设置阈值判断当前功率点与最大功率点的位置,当远离最大功率点时采用大步长进行跟踪,在靠近最大功率点时采用小步长跟踪,而在最大功率点处则保持光伏电池输出电压不变。

由图2可知,最大功率点左右两侧的 dP/dU 数值变化规律不同。在相同功率的情况下,MPP左侧曲线的 $|dP/dU|$ 比右侧的数值小、变化缓,而且越接近MPP, $|dP/dU|$ 越小;越远离MPP, $|dP/dU|$ 越大。因此,变步长电导增量法选取 $|dP/dU|$ 为步长因子,并根据当前功率点与最大功率点的位置和距离,选择向最大功率点趋近的方式和比例系数。

变步长电导增量法的流程如图4所示。首先计算 dU 、 dI 和 dP ,并根据 dU 和 dI 的数值判断当前功

率点与最大功率点的位置和距离。当 $dU \neq 0$ 且 $dI/dU \neq -I/U$ 时,在判断当前功率点在MPP左侧或右侧后,引入 $|dP/dU| > K_1$ 或 $|dP/dU| > K_2$ 的判据来确定步长,其中 K_1 、 K_2 为控制步长的阈值。当前功率点如在MPP左侧且 $|dP/dU| > K_1$ 时,以 $N_{11}|dP/dU|$ 为步长趋向最大功率点;若 $|dP/dU| \leq K_1$ 时,以 $N_{12}|dP/dU|$ 为步长趋向最大功率点。当前功率点如在MPP右侧,且 $|dP/dU| > K_2$ 时,以 $-N_{21}|dP/dU|$ 为步长趋向最大功率点;若 $|dP/dU| \leq K_2$ 时,以 $-N_{22}|dP/dU|$ 为步长趋向最大功率点。在 $dU = 0$ 的情况下,若 $dI > 0$,以 $N_{31}\Delta U$ 为步长趋向最大功率点;若 $dI \leq 0$,以 $-N_{32}\Delta U$ 为步长趋向最大功率点。其中 N_{11} 、 N_{12} 、 N_{21} 、 N_{22} 、 N_{31} 和 N_{32} 为最大功率点左右两侧调整步长的比例系数, ΔU 为固定步长。由于在功率相同的情况下,光伏电池 $P-U$ 曲线在最大功率点右侧的 $|dP/dU|$ 比左侧的数值大,所以 N_{21} 、 N_{22} 的取值要分别比 N_{11} 、 N_{12} 小,以保证步长变化均匀,减小稳态振荡。当 $dU = 0$, $dI = 0$ 时,则可认为达到最大功率点区域。

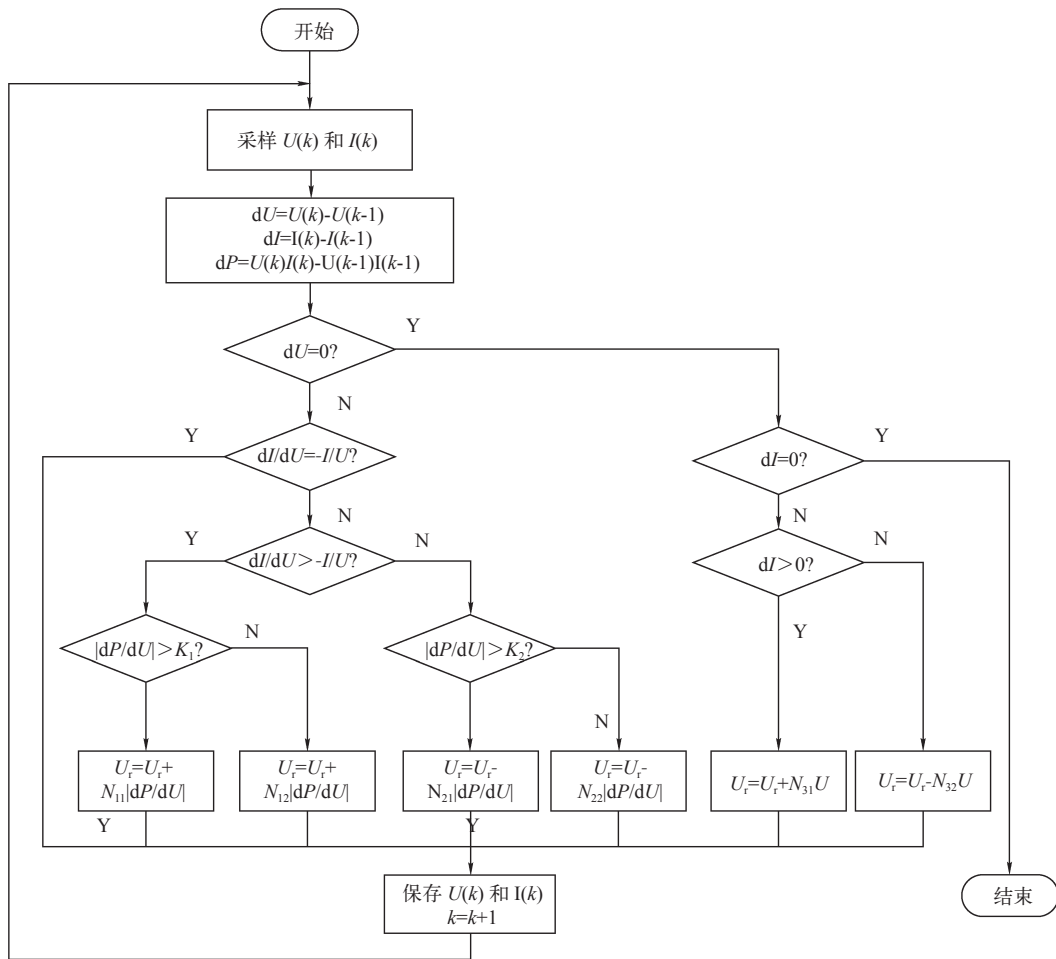


图4 变步长电导增量法流程图

仿真实验

为了验证本文提出的变步长电导增量法的有效性,在Matlab/Simulink软件环境下对传统电导增量法和变步长电导增量法进行仿真对比。搭建的仿真模型如图5所示,其中主电路采用Boost升压斩波电路,参数设置如下: $C_1=100\mu\text{F}$, $C_2=500\mu\text{F}$, $L=5\text{mH}$, $R=20\Omega$ 。光伏电池的参

数设置为:开路电压 $U_{oc}=44.2\text{V}$,短路电流 $I_{sc}=5.2\text{A}$,最大功率点电压 $U_m=35.2\text{V}$,最大功率点电流 $I_m=4.95\text{A}$ 。光伏电池温度设置为 $T=25\text{℃}$,光照强度设定为在1s时刻从 $800\text{W}/\text{m}^2$ 跃变为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。仿真总时间设置为2s,仿真算法设置为ode23tb (stiff/TR-BDF2)。

传统电导增量法的固定步长设置为 $\Delta U=$

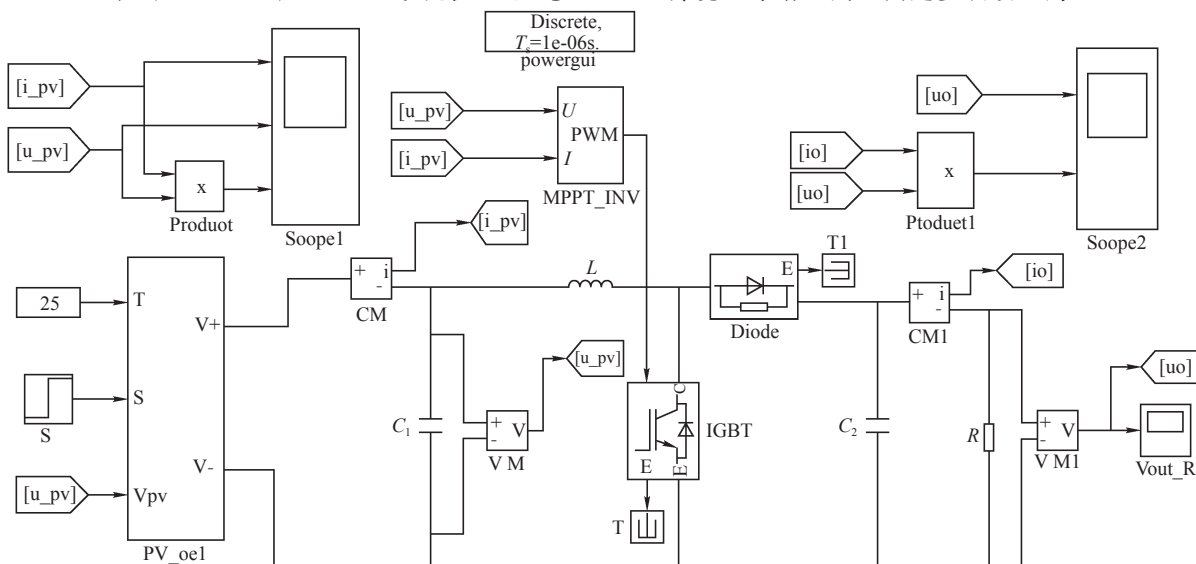


图5 光伏发电系统仿真模型

0.1 V, 仿真结果如图6所示。由图6可见,在温度为 25℃ ,光照强度为 $800\text{W}/\text{m}^2$ 的环境条件下,起始阶段光伏系统输出功率在0.165s时稳定至最大功率133.8 W,波形振荡较大,稳定性较差;当光照强度在1s由 $800\text{W}/\text{m}^2$ 变到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时,系统经过0.125s再次稳定至新的最大功率175.5 W,过渡过程中振荡幅度为15.1 W。

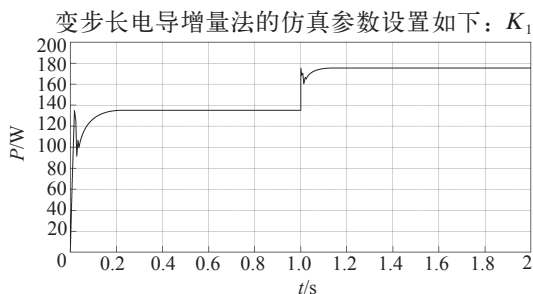


图6 传统电导增量法仿真波形

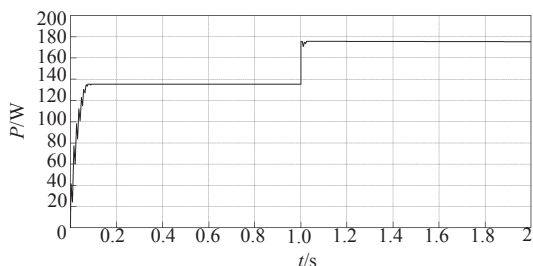


图7 改进电导增量法仿真波形

$=2$, $K_2=4$, $N_{11}=0.02$, $N_{12}=0.002$, $N_{21}=0.01$, $N_{22}=0.001$, $N_{31}=0.01$, $N_{32}=0.02$ 。仿真结果如图7所示,起始阶段系统用时0.132s将输出功率稳定在135.1 W,波形振荡较小;当光照强度发生跃变时,二次跟踪到新最大功率点用时0.06 s,最大输出功率稳定在最大功率175.5 W,过渡过程中振荡幅度为7.6 W。在光照强度变化的情况下,系统采用变步长电导增量法跟踪新的最大功率点所需的时间,相较于传统电导增量法缩短了52%,振荡幅度降低了49.7%。由此可见,改进后的算法能够快速稳定地跟踪最大功率点。

结束语

在传统电导增量法的基础上,通过对光伏电池输出特性进行仿真分析,针对传统电导增量法步长难以选择的问题,本文提出了一种变步长的电导增量法。通过建立Matlab/Simulink模型进行仿真对比,可以验证变步长电导增量法比传统电导增量法跟踪到达光伏系统最大功率点的速度更快,最大功率点邻域内的稳态振荡更小,跟踪准确度更高。EA

(收稿日期:2019.09.07)

(编辑:朱金凤)