

针对光照强度快速变化的改进 INC 算法

许立斌, 程若发, 杨嘉静, 刘聘凭
(南昌航空大学信息工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 在光照强度快速变化下,传统 MPPT 算法跟踪效果差,并具有跟踪精度低、稳态振荡率大、响应速度慢以及跟踪过程中功率损失大的缺点。本文提出一种改进 INC 算法,在光照强度快速上升时,利用能够避免误判的变步长 INC 算法跟踪最大功率点;在光照强度快速下降时,利用负载曲线与 $I-V$ 特性曲线,快速跟踪最大功率点。仿真结果表明,此算法在光强快速变化下响应速度快,是传统 INC 算法的 9 倍;跟踪精度高达 99.593%,比传统 INC 算法提高了 9.113%。

关键词: MPPT;响应速度;跟踪精度;Buck-Boost 电路;改进 INC 算法

DOI: 10.12067/ATEEE1910032 **文章编号:** 1003-3076(2020)08-0056-10 **中图分类号:** TM615

1 引言

近几年,随着生态问题的日益突出,石油、煤炭资源的过度消耗,作为可再生新能源产业的光伏产业得到了快速发展^[1]。由于光伏阵列的输出特性曲线是非线性的,为了确保光伏阵列能以最大功率输出,必须使用最大功率跟踪技术(Maximum Power Point Tracking,MPPT)。目前存在的 MPPT 算法可分为传统 MPPT 方法与先进 MPPT 方法。传统 MPPT 方法包含了扰动观察法(Perturb and Observe,P&O)^[2]、电导增量法(Incremental Conductance,INC)^[3]等。而先进 MPPT 方法包含了基于智能算法的 MPPT 方法^[4-6]、数学模型方法^[7]等。其中,P&O 与 INC 算法由于结构简单且易实现,使得它们被广泛使用。

P&O 与 INC 算法是基于扰动的自寻优法^[7],并且有个严重的缺点,就是稳态时功率存在大幅度的振荡,导致功率损耗大^[8]。传统的 P&O 与 INC 算法均是使用固定步长进行扰动,导致它们在光照强度快速变化下,跟踪速度慢、跟踪过程中功率损失大以及跟踪精度低。文献[9,10]利用变步长 P&O 与 INC 算法,在一定程度上提高响应速度、稳态精度,但跟踪精度与跟踪过程的功率损失依然不理想。而且它们还存在一个缺点,就是光强上升的瞬间存在

着误判^[11]。光强上升瞬间的电压变化量 ΔV 与功率变化量 ΔP 均大于零,使得 P&O 与 INC 算法执行减小占空比命令,导致工作点远离最大功率点,造成跟踪过程的功率损失严重。文献[12]提出一种可消除上升误判的改进 INC 方法,此方法能有效地提高稳态精度与响应速度。

文献[13]对光强快速变化情况,提出了改进 INC 算法,利用三个不同的扰动步长分别在光强上升瞬间、光强下降瞬间以及跟踪最大功率点过程对占空比进行调整。虽然该算法能在一定程度上减少功率损失,并提高跟踪精度,但响应速度慢。

文献[14]根据负载曲线与 $I-V$ 曲线之间的关系提出了一种跟踪速度较快的改进 INC 算法,但在光照强度上升时,其跟踪速度显得稍慢,而且跟踪过程的功率损失大,造成跟踪精度下降。

为了使光伏系统在光照强度快速变化时具有较高的跟踪精度、较快的响应速度与较低的稳态振荡率,本文提出改进 INC 算法。在光照强度上升时,使用能够避免误判的 INC 算法跟踪最大功率点,从而减少跟踪过程中功率的损失,并提高跟踪精度;在光照强度下降时,利用负载曲线和 $I-V$ 特性曲线,快速调整占空比,加快响应速度。

本文首先分析光伏阵列 $I-V$ 、 $P-V$ 特性曲线,然后阐述了基于 Buck-Boost 电路的光伏 MPPT 控制系

收稿日期: 2019-10-23
基金项目: 江西省科技支撑计划项目(20142BBE50002)、江西省教育厅科学技术项目(GJJ150757)
作者简介: 许立斌(1995-),男,广东籍,硕士研究生,研究方向为光伏发电控制仿真;
程若发(1971-),男,安徽籍,副教授,博士,研究方向为微电网运行与控制技术。

统工作原理,再对改进 INC 算法进行详细说明,最终利用 Matlab/Simulink 搭建光伏系统,并将改进 INC 算法与其他 MPPT 算法进行仿真对比。经仿真结果表明,本文所提出的改进 INC 算法对于光强快速变化的跟踪效果较其他 MPPT 算法好。

2 光伏电池理论模型与输出特性

2.1 光伏电池理论模型

光伏电池是利用光生伏特效应把太阳能转变为电能的装置,其单二极管模型如图 1 所示^[15]。

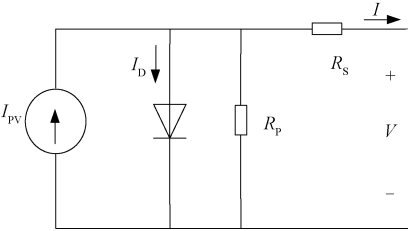


图 1 光伏电池的单二极管模型
Fig.1 Single diode model of solar cells

由图 1 可知,光伏电池输出伏安特性为:

$$I = I_{pv} - I_D \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{\alpha KT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p}$$
(1)

式中, V 为负载两端电压; I 为通过负载的电流; I_{pv} 为光生电流; I_D 为二极管反向饱和电流; α 为二极管影响因子; R_s 为电池串联电阻; R_p 为电池并联电阻; T 为电池的绝对温度; K 为波尔兹曼常数($1.38e-23$ J/K); q 为电荷常数($1.6e-19$ C)。

为了提高光伏电池的精确性,双二极管光伏电池模型被提出,模型如图 2 所示^[16]。

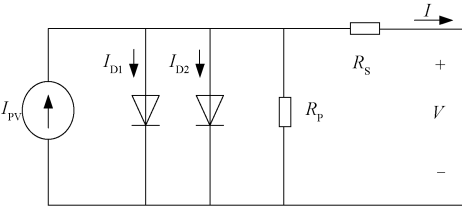


图 2 光伏电池的双二极管模型
Fig.2 Two-diode model of solar cells

其中光伏电池输出伏安特性为:

$$I = I_{pv} - I_{D1} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{\alpha_1 KT} \right] - 1 \right\} - I_{D2} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{\alpha_2 KT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p}$$
(2)

式中, α_1 、 α_2 分别为二极管 D_1 与 D_2 影响因子; I_{D1} 、 I_{D2} 分别为二极管 D_1 与 D_2 反向饱和电流,其计算式如下^[16]:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{sc_STC} + K_1 \Delta T}{\exp \left[\frac{q(V_{oc_STC} + K_V \Delta T)}{KT} - 1 \right]}$$
(3)

式中, I_{sc_STC} 、 V_{oc_STC} 分别为光伏组件在标准测试条件(Standard Testing Conditions, STC)下的短路电流与开路电压; K_1 、 K_V 分别为电流温度系数与电压温度系数,其参数见表 1 光伏组件 MSX-64 规格^[17]。

表 1 光伏组件 MSX-64 规格

Tab.1 Specifications of PV module MSX-64

参 数	数 值
短路电流 I_{sc} / A	4.0
开路电压 V_{oc} / V	21.3
最大功率点电流 I_{mpp} / A	3.66
最大功率点电压 V_{mpp} / V	17.5
最大功率 P_{mpp} / W	64
开路电压温度系数 $K_V / (V/^{\circ}C)$	-0.08
短路电流温度系数 $K_I / (A/^{\circ}C)$	0.003
电池个数 N_s	36

2.2 输出特性

本文的光伏阵列,是由双二极管光伏电池模型与表 1 参数组成的光伏组件构成的。

在外界环境温度为 $T = 25^{\circ}C$ 不变,光照强度 S 分别取 300 W/m^2 、 500 W/m^2 、 600 W/m^2 、 800 W/m^2 、 900 W/m^2 以及 $1\,000\text{ W/m}^2$ 时的 I - V 特性曲线与 P - V 特性曲线如图 3、图 4 所示。图 3 与图 4 中所标 * 号为各光照强度下的最大功率点。

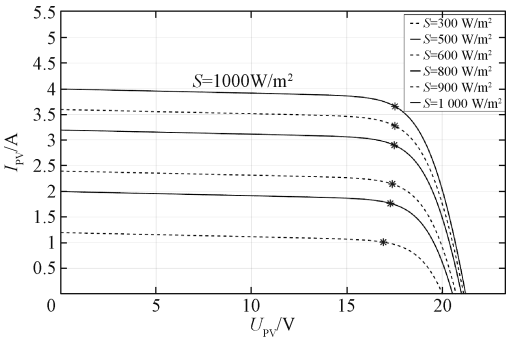


图 3 光伏阵列的 I - V 特性曲线
Fig.3 I - V characteristics curves of PV array

从图 3 与图 4 可知,光伏阵列中的短路电流 I_{sc} 会随着光照强度 S 的增强有明显的上升,同时开路电压 V_{oc} 也有一定上升^[18]。光伏阵列的最大功率点电压随着光照强度 S 的变化并未有明显变化,可以

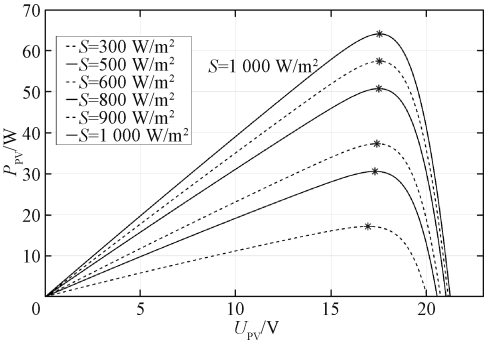


图 4 光伏阵列的 P - V 特性曲线

Fig.4 P - V characteristics curves of PV array

构成一条直线^[19];而最大功率点电流随着光照强度 S 的上升有明显的上升。

3 光伏 MPPT 控制系统及原理

MPPT 控制装置的使用是为了提高光伏的发电效率,使光伏阵列尽可能以最大功率输出。常用的 DC-DC 变换电路一般有 Buck、Boost、Buck-Boost 以及 Sepic 电路。由于 Sepic 电路、Buck-Boost 电路没有跟踪死区^[20],使得它们成为 MPPT 应用中的理想 DC-DC 变换电路。本文决定使用 Buck-Boost 变换电路,基于 Buck-Boost 的 MPPT 控制系统原理图如图 5 所示。

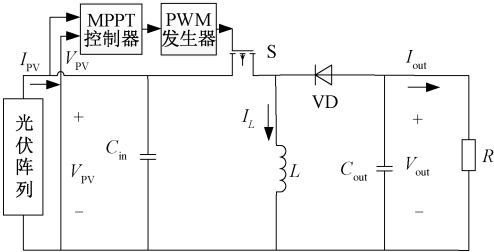


图 5 基于 Buck-Boost 的 MPPT 控制系统原理图

Fig.5 Principle of MPPT control system based on Buck-Boost converter

Buck-Boost 电路的输出电压与输入电压的关系如下^[21]:

$$V_{out} = V_{PV} \frac{-D}{1-D} \tag{4}$$

$$I_{out} = I_{PV} \frac{1-D}{-D} \tag{5}$$

$$R_{load} = R_{eq} \left(\frac{-D}{1-D} \right)^2 \tag{6}$$

式中, $R_{eq} = V_{PV}/I_{PV}$ 。

Buck-Boost 电路中的输入电容 C_{in} 、输出电容

C_{out} 的电压纹波以及电感 L 的电流纹波计算式如下^[12, 22]。

$$\Delta V_{C_{in}} = \frac{D^2 V_{PV}}{(1-D)RC_{in}f_s} \tag{7}$$

$$\Delta V_{C_{out}} = \frac{DV_{out}}{RC_{out}f_s} \tag{8}$$

$$\Delta I_L = \frac{(1-D)V_{out}}{2Lf_s} \tag{9}$$

式中, f_s 为开关管的开关频率。

为了使 Buck-Boost 变换电路续流,有:

$$L \geq \frac{R}{2f_s}(1-D)^2 \tag{10}$$

电容的电压纹波需要满足 $\Delta V_{C_{in}} \leq 1\%V_{PV}$ 以及 $\Delta V_{C_{out}} \leq 2\%V_{out}$ ^[12],有:

$$C_{in} \geq \frac{D^2}{0.01(1-D)Rf_s} \tag{11}$$

$$C_{out} \geq \frac{D}{0.02Rf_s} \tag{12}$$

4 改进 INC 算法

INC 算法是根据光伏 P - V 特性曲线的斜率 (dP/dV) 正负去调整 DC-DC 变换电路占空比,进而改变光伏电压与电流。

对于传统 INC 算法而言,若使用较大的扰动步长可提高响应速度,但稳态时功率存在大幅的振荡,并造成稳态精度下降;使用较小的扰动步长可减小稳态振荡率,但响应速度会变慢。

为了在稳态精度与响应速度上有更好的权衡,文献[10]提出了变步长 INC 算法,其流程图如图 6 所示。

图 6 中的步长 $Step$ 是由式(13)决定。

$$Step = N \left| \frac{dP}{dV} \right| \tag{13}$$

式中, N 为调整步长的速度因子,其必须满足^[10]:

$$N < \Delta D_{max} \left| \frac{dV}{dP} \right| \tag{14}$$

式中, ΔD_{max} 为最大占空比扰动步长值; $|dV/dP|$ 为系统以扰动步长 ΔD_{max} 工作时的 dV/dP 绝对值。当变步长 INC 算法满足式(14)时,系统就工作在变步长模式;否则,系统以扰动步长 ΔD_{max} 工作在定步长模式。

变步长 INC 算法通过 $\Delta I/\Delta V + I/V$ 值即 dP/dV 值调整占空比。 $dP/dV > 0$ 表明工作点在最大功率

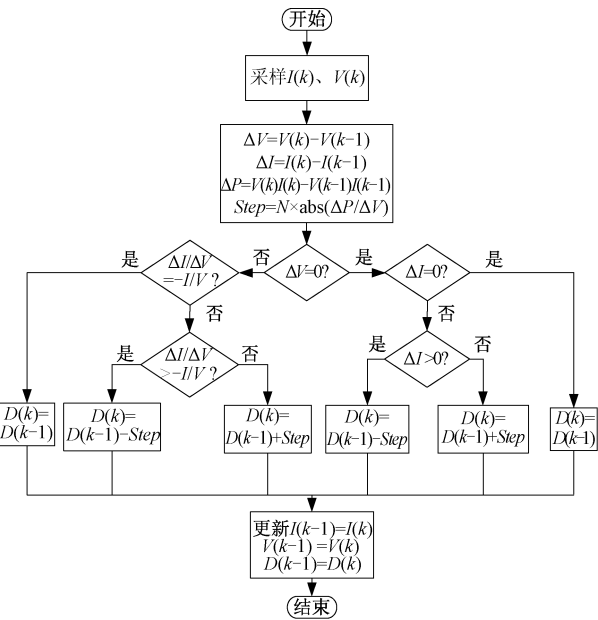


图6 变步长 INC 流程图

Fig.6 Flowchart for variable step INC algorithm

点的左侧,此时要减小占空比;相反, $dP/dV < 0$ 表明工作点在最大功率点的右侧,要增大占空比。

对变步长 INC 算法而言,速度因子 N 的选择要非常慎重,设置合适的 N 值,可在一定程度上提高响应速度、稳态精度以及跟踪精度。

为了获得更高的稳态精度与跟踪精度、更快的响应速度,本文提出了改进 INC 算法。该算法在光照强度上升时,利用能够避免误判的变步长 INC 算法跟踪最大功率点;在光照强度下降时,利用负载曲线与 I - V 特性曲线的特点,快速跟踪最大功率点。

同时为了提高稳态精度,该算法使用一定的允许误差去限制占空比的频繁改变,如式(15)^[11]所示。

$$\left| \frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} \right| < 0.06 \tag{15}$$

4.1 光照强度上升情况

图7为外界环境温度为 $T=25^{\circ}\text{C}$,光照强度 S 为 500 W/m^2 与 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的 I - V 特性曲线。其中 A 点与 B 点分别为 500 W/m^2 与 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的最大功率率点。

当光伏系统在 A 点运行时,光照强度突然上升到 $1\,000\text{ W/m}^2$ 时。由于占空比没来得及发生改变,则工作点将会沿着负载曲线 1 从 A 点变化到 A_1 点。由图7可知, $I_{a1} > I_a, V_{a1} > V_a$ 。而且 $\Delta P/\Delta V > 0$ 即 $\Delta I/\Delta V > -I/V$, 据图6流程图可知,占空比会减小,而工作点将从 A_1 点切换到 A_2 点,使得工作点远离 B 点,造成误判。误判造成跟踪过程功率损失大、跟踪精度下降,同时减慢了响应速度。为了避免误判,改进 INC 算法会在光照强度上升的瞬间,增大占空比,使得工作点从 A_1 点变化到 A_3 点。同时为了加快响应速度,该算法使用变步长对占空比进行扰动,直到工作点满足式(15)为止。

4.2 光照强度下降情况

当光伏系统在 B 点运行时,光照强度突然下降到 500 W/m^2 ,工作从 B 点变化到 B_1 点。从图7可知 $I_{b1} < I_b, V_{b1} < V_b$ 。对于这种情况,改进 INC 算法会利用负载曲线与 I - V 特性曲线的特点,快速跟踪最大功率点。

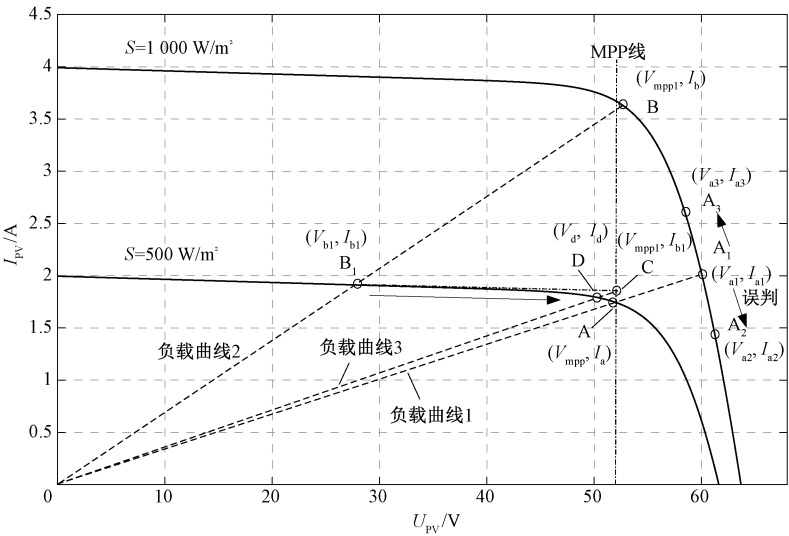


图7 光强为 500 W/m^2 与 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的 I - V 特性曲线

Fig.7 I - V characteristic curves under 500 W/m^2 and $1\,000\text{ W/m}^2$ solar irradiation

将式(6)改写成:

$$R_{\text{load}} = (\frac{-D}{1-D})^2 \frac{V_{\text{PV}}}{I_{\text{PV}}} \tag{16}$$

$$a = \frac{R_{\text{load}} I_{\text{PV}}}{V_{\text{PV}}} \tag{17}$$

$$D = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{a} + 1} \tag{18}$$

式(16)所使用的 I_{PV} 、 V_{PV} 与 D 若均为最大功率点的参数,则求出的 R_{load} 就为最大功率点的负载电阻,并将 R_{load} 代入式(17)。当式(17)的 I_{PV} 、 V_{PV} 也为最大功率点的参数时,式(18)所求出的 D 就为最大功率点的占空比。需注意的是,式(16)与式(17)所使用的最大功率点参数并非一致,如对于光强下降情况而言,式(16)使用的最大功率点参数是光强为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的参数,而式(17)使用的最大功率点参数是光强为 500 W/m^2 的参数。对于光强 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的最大功率点参数,可在判断出已达到最大功率点时,将电压、电流与占空比分别记录为 V_{mpp} 、 I_{mpp} 与 D_{mpp} 。对于光强 500 W/m^2 的最大功率点参数,电压与电流均是未知的。根据最大功率点可构成直线^[19],那么式(17)的 V_{PV} 可使用前次最大功率点的电压即光强为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 的最大功率点电压替换,如图7的 V_{mpp1} ;由图7可知 $I_{\text{bl}} \approx I_{\text{a}}$,则可使用 I_{bl} 代替 I_{a} ,即式(18)的 I_{PV} 替代量为 I_{bl} ,同时 I_{bl} 就是此时工作点的电流 I_{PV} 。则式(16)、式(17)可写成:

$$R_{\text{load}} = (\frac{-D_{\text{mpp}}}{1-D_{\text{mpp}}})^2 \frac{V_{\text{mpp}}}{I_{\text{mpp}}} \tag{19}$$

$$a = \frac{R_{\text{load}} I_{\text{PV}}}{V_{\text{mpp}}} \tag{20}$$

式中, D_{mpp} 为前次跟踪到的最大功率点占空比; V_{mpp} 与 I_{mpp} 分别为前次跟踪到的最大功率点电压与电流。

使用式(18)~式(20)更新占空比后,负载曲线将从图7的负载曲线2变为负载曲线3。同时工作点将从 B_1 点变化到 D 点,从而靠近最大功率点即 A 点。此操作只耗时一个周期,确保了该算法的快速性。若 D 点工作点满足式(15),将不再调整占空比;否则,利用变步长调整占空比,直到工作点满足式(15)为止。

光照强度变化对光伏工作点电压、电流以及功率的影响见表2。

改进 INC 算法流程图如图8所示。该算法会记录光伏系统跟踪到的最大功率点电压、电流与占空比,即将满足式(15)的工作点电压、电流与占空比

表 2 光照强度对电压、电流与功率的影响

Tab.2 Change in PV voltage, current and power during change in solar irradiation

变化量	光照强度	
	上升	下降
电压变化(ΔV)	正	负
电流变化(ΔI)	正	负
功率变化(ΔP)	正	负

分别记录为 V_{mpp} 、 I_{mpp} 与 D_{mpp} ,并将变量 *Flag* 置1。在检测出工作点不满足式(15)时,将变量 *Flag* 清零,并利用表2判断光照强度发生何种变化。若检测出光照强度上升,则在上升瞬间,利用变步长增大占空比,避免误判,并使用变步长对占空比进行调整,直到工作点满足式(15)后,再将变量 *Flag* 置1;若检测出光照强度下降,将使用式(18)~式(20)对占空比进行更新,若此时工作点满足式(15),就将变量 *Flag* 置1,并不调整占空比;否则,使用变步长调整占空比。

5 仿真结果比较与分析

本文在 Matlab/Simulink 上搭建了如图9所示的光伏发电 MPPT 仿真模型。

此仿真模型包含了基于双二极管光伏模型的光伏阵列、Buck-Boost 变换电路以及 MPPT 控制器。MPPT 系统模型的负载电阻为 $14\,\Omega$,IGBT 的开关频率为 10 kHz ,根据式(10)~式(12),可知 $L \geq 87\,\mu\text{H}$ 、 $C_{\text{in}} \geq 829\,\mu\text{F}$ 、 $C_{\text{out}} \geq 274\,\mu\text{F}$ 。此仿真模型电感与电容参数选取如下, $L = 178\,\mu\text{H}$ 、 $C_{\text{in}} = 9\,000\,\mu\text{F}$ 、 $C_{\text{out}} = 3\,000\,\mu\text{F}$ 。其中 MPPT 控制器的采样时间为 0.05 s ,占空比步长为 0.005 ,占空比初值为 0.53 。传统 INC 算法与文献[14] INC 算法的扰动步长为 0.005 ;变步长 INC 算法与本文改进 INC 算法的最大占空比扰动步长 ΔD_{max} 为 0.05 ,经式(15)求出速度因子 N 为 0.004 。

总仿真时间为 5.5 s ,共划分成区域Ⅰ、区域Ⅱ、区域Ⅲ,同时仿真过程中只改变光照强度,其中环境温度与负载电阻分别保持为 25°C 、 $14\,\Omega$ 。 $0 \sim 1.58\text{ s}$,光照强度为 500 W/m^2 ,记为区域Ⅰ; $1.58 \sim 3.48\text{ s}$,光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$,记为区域Ⅱ; $3.48 \sim 5.5\text{ s}$,光照强度为 500 W/m^2 ,记为区域Ⅲ。其中区域Ⅰ为光照强度快速变化前的初始条件,所以不参与性能评估。

表3记录了各 INC 算法在区域Ⅱ、区域Ⅲ的仿

$$P_{\text{loss}} = \frac{\sum P_{\text{PV}}(t) - \sum P_{\text{MPP}}(t)}{\sum P_{\text{PV}}(t)} \quad (22)$$

$$T_{\text{eff}} = \frac{\int_0^t P_{\text{MPP}}}{\int_0^t P_{\text{PV}}} \times 100\% \quad (23)$$

表 3 光照强度变化下的各 INC 算法的比较

Tab.3 Comparison of different INC algorithms

区域	INC 算法	稳态占空比	稳态最小功率/W	稳态最大功率/W	稳态振荡率(%)	跟踪过程功率损失(%)	跟踪精度(%)	响应时间/s
Ⅱ (光强上升)	传统	0.625~0.635	63.259	64.052	1.239	19.384	90.804	0.97
	变步长	0.631~0.632	63.978 2	64.052	0.116	9.182	97.477	0.42
	文献[14]	0.631	63.943	64.039	0.171	10.437	96.997	0.52
	改进	0.630	63.990	64.047	0.090	2.174	99.371	0.37
Ⅲ (光强下降)	传统	0.54~0.55	30.353	30.545	0.628	16.549	90.155	1.07
	变步长	0.542~0.548	30.506	30.545	0.127	2.958	99.060	0.42
	文献[14]	0.549	30.485	30.522	0.122	1.376	99.794	0.07
	改进	0.549	30.492	30.524	0.107	1.327	99.814	0.07

5.1 传统 INC 算法仿真结果

传统 INC 算法仿真结果如图 10 所示。图 10(a) 为光强、光伏电压、电流与占空比波形;图 10(b) 为功率波形。

由图 10(a) 的区域 I 可知,传统 INC 算法在 0.55 s 跟踪到最大功率点,此时占空比为 0.54。由图 10(b) 的区域 II、Ⅲ局部放大图以及表 3 可得出,该算法的跟踪速度慢,耗时均接近 1 s,使得其余性能评估指标均较差。从而说明传统 INC 算法对于光强快速变化情况的跟踪效果差。

5.2 变步长 INC 仿真结果

变步长 INC 算法仿真结果如图 11 所示。由图 11(a) 的区域 I 可知,该算法耗时 0.4 s 跟踪到最大功率点,此时占空比为 0.553。由于使用的步长是由式(13)所决定,且 $|dP/dV| = 0$ 在实际上是不能实现的^[25],这就使得稳态下占空比有一定抖动,功率也有一定的振荡。区域 I 稳态时,占空比为 0.545~0.553,功率为 30.451~30.545 W。

对比图 10(a) 与图 11(a) 可发现,变步长 INC 算法在区域 II 与区域Ⅲ的占空比调整速度比传统 INC 算法有明显的提升,说明变步长 INC 算法的跟踪速度比传统 INC 算法快。从而使得性能评估指标均比传统 INC 算法好。

虽然变步长 INC 算法对于光强快速变化的跟踪效果比传统 INC 算法好,但从表 3 可知该算法还存在以下缺点,跟踪速度慢,耗时接近 8 个周期;对

式中, $P_{\text{max_ss}}$ 与 $P_{\text{min_ss}}$ 分别为稳态最大功率、稳态最小功率; P_{MPP} 与 P_{PV} 分别为 MPPT 算法跟踪到的功率与光伏阵列理论功率值; t 为 MPPT 算法的跟踪时间。跟踪过程的功率损失指的是从功率跳变到跟踪到最大功率点这期间的功率损失。

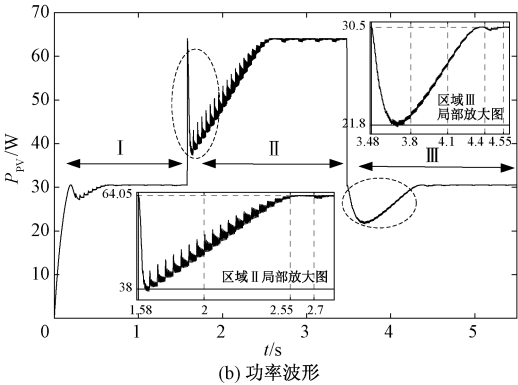
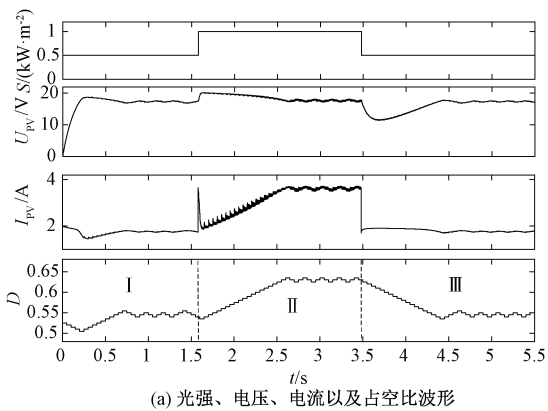


图 10 传统 INC 算法仿真结果

Fig.10 Simulation results of conventional INC algorithm

于光强上升情况,跟踪过程的功率损失大。

5.3 文献[14]INC 仿真结果

文献[14]INC 算法仿真结果如图 12 所示。由图 12 与表 3 可知,在光强上升时,该算法的跟踪速

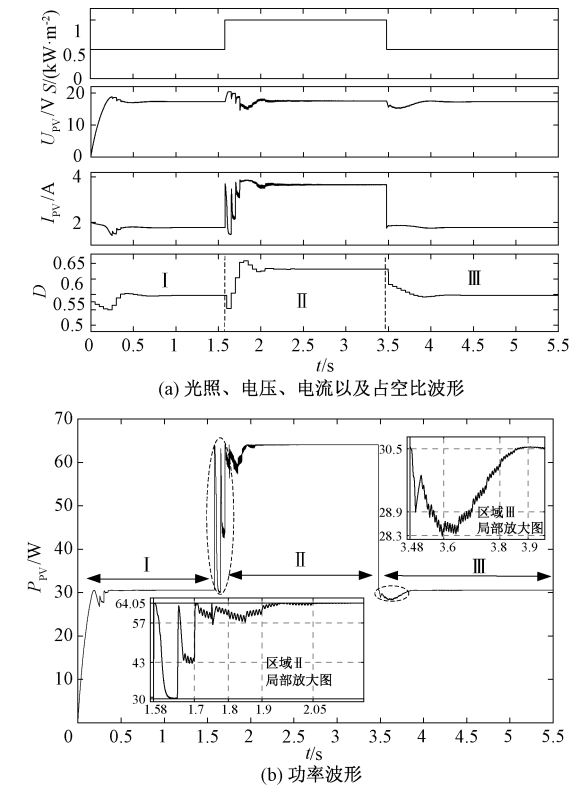


图 11 变步长 INC 算法仿真结果

Fig.11 Simulation results of variable step size INC algorithm

度均比传统 INC 算法、变步长 INC 算法快,但其余性能评估指标却比变步长 INC 算法差。而造成的原因是占空比的调整速度过快,使得 1.58 s 时的占空比已超过最大功率点占空比。在光强下降时,性能评估指标均比传统 INC 算法、变步长 INC 算法好,尤其是跟踪速度,耗时仅为 0.07 s。

虽然文献[14]INC 算法的整体跟踪效果比传统 INC 算法与变步长 INC 算法好,但该算法对于光强上升情况的跟踪效果还是不够理想。

5.4 改进 INC 仿真结果

改进 INC 算法仿真结果如图 13 所示。
由图 13(a)区域I可知,该算法在 0.35 s 跟踪到最大功率点,此时占空比为 0.545。跟踪速度比变步长 INC 算法快一个周期,这是由于改进 INC 算法使用式(15)限制占空比的频繁改变。当工作点满足式(15)时,占空比就不发生变化,从而能有效地降低稳态振荡率。由于工作点满足式(15),改进 INC 算法会将变量 *Flag* 置 1,并将电压、电流与占空比分别记录为 V_{mpp} 、 I_{mpp} 与 D_{mpp} ,如图 8 所示的流程步骤。

1.58 s 时,改进 INC 算法检测到光强上升后,会将变量 *Flag* 清零,并增大占空比,使得工作点向最

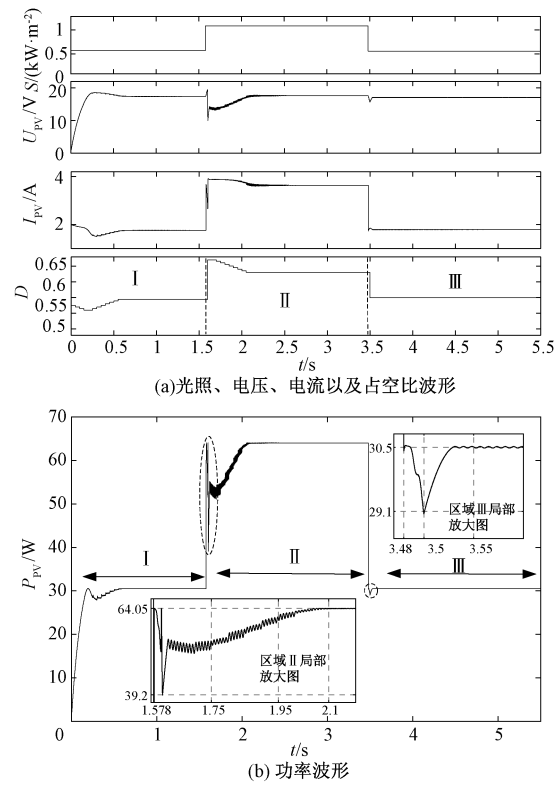


图 12 文献[14]INC 算法仿真结果

Fig.12 Simulation results of INC algorithm in [14]

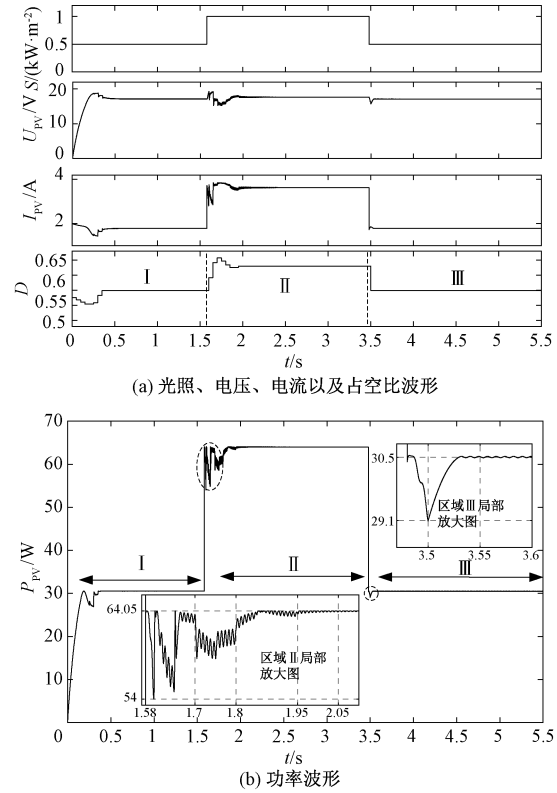


图 13 改进 INC 算法仿真结果

Fig.13 Simulation results of improved INC algorithm

大功率点靠近,避免误判;然后利用变步长调整占空比,直至满足式(15)为止。由图 13(a)的区域Ⅱ可知,该算法耗时 0.37 s 跟踪到最大功率点,占空比为 0.630。对比图 11(b)与图 13(b)的区域Ⅱ局部放大图可发现,改进 INC 算法跟踪过程中最小功率为 54 W,而未消除误判的变步长 INC 算法却低至 30 W,前者比后者高出 24 W。从表 3 可知,改进 INC 算法的性能评估指标均比其他 MPPT 算法好。其中跟踪速度是传统 INC 算法的 2.6 倍;跟踪精度比传统 INC 算法提高了 8.567%。

3.48 s 时,光照强度突然下降到 500 W/m^2 ,即从区域Ⅱ进入区域Ⅲ。此时工作点不满足式(15),改进 INC 算法会将变量 *Flag* 清零,同时检测出光照强度下降。并使用式(19)计算出负载电阻 R_{load} ,进而使用式(18)与式(20)更新占空比,见图 8 流程图。式(18)计算出的占空比为 0.549,此时工作点满足式(15)。但根据图 13(b)中的区域Ⅲ局部放大图可知,3.5 s 时并未到达最大功率,经过一个周期后才到达,总耗时记为 0.07 s。从表 3 可知,改进 INC 算法的性能评估指标均比其他 MPPT 算法好。其中跟踪速度是传统 INC 算法的 15.3 倍;跟踪精度比传统 INC 算法提高了 9.659%。从而说明改进 INC 算法对于光照强度快速变化情况的跟踪效果均比其他 MPPT 算法好。

各 INC 算法在区域Ⅱ~区域Ⅲ的平均跟踪精度见表 4。从表 4 可知,改进 INC 算法的平均跟踪精度高达 99.593%,比传统 INC 算法提高了 9.113%,比变步长 INC 算法与文献[14]INC 算法分别提高了 1.324%与 1.197%。

表 4 各算法在区域Ⅱ~区域Ⅲ的平均跟踪精度

Tab.4 Average tracking efficiency of each algorithm in region Ⅱ ~ Ⅲ				
INC 算法	传统	变步长	文献[14]	改进
平均跟踪效率(%)	90.480	98.269	98.396	99.593

6 结论

为了解决 MPPT 算法在光照强度快速变化下跟踪效果差的问题,本文提出了一种改进 INC 算法,并与其他 MPPT 算法进行仿真对比。由仿真结果可知,改进 INC 算法在光照强度快速变化情况下有如下性能的提升。

(1)响应速度快,是传统 INC 算法的 9 倍、变步长 INC 算法的 3.6 倍、文献[14]INC 算法的 1.2 倍。

(2)稳态振荡率低,平均仅为 0.099%。

(3)跟踪过程的功率损失少,平均仅为 1.751%,跟踪精度高,平均跟踪精度高达 99.593%,比传统 INC 算法提高了 9.113%,比变步长 INC 算法与文献[14]INC 算法分别提高了 1.324%与 1.197%。

参考文献 (References):

[1] 杨宏超,程若发,吕彩艳,等 (Yang Hongchao, Cheng Ruofa, Lv Caiyan, et al.). 光伏组件内部参数辨识与输出特性研究 (Study on internal parameter identification and output characteristics of photovoltaic module) [J]. 电子技术应用 (Computer Technology and Its Application), 2018, 44 (1): 125-128.

[2] 邱革非,张春刚,仲泽坤,等 (Qiu Gefei, Zhang Chungang, Zhong Zekun, et al.). 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 (MPPT analysis of photovoltaic power generation system based on P&O and IC method) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2017, 50 (3): 154-160.

[3] 潘逸崑,窦伟 (Pan Yikun, Dou Wei). 两种改进的变步长 MPPT 算法性能对比研究 (Comparison research of two improved variable step length MPPT algorithm) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (3): 69-75.

[4] 高建超,程若发 (Gao Jianchao, Cheng Ruofa). 基于差分进化算法的最大功率点跟踪方法 (Maximum power tracking method based on differential evolution algorithm) [J]. 工业控制计算 (Industrial Control Computer), 2016, 29 (3): 35-36, 38.

[5] 石季英,凌乐陶,薛飞,等 (Shi Jiying, Ling Letao, Xue Fei, et al.). 领地粒子群算法在光伏最大功率跟踪的应用 (Application of territorial PSO in global MPPT for PV array) [J]. 太阳能学报 (Acta Energiae Solaris Sinica), 2019, 40 (9): 2554-2560.

[6] 张强,任小永,陈乾宏,等 (Zhang Qiang, Ren Xiaoyong, Chen Qianhong, et al.). 基于 Fibonacci 数列的 MPPT 仿真与初步实验 (MPPT simulation and preliminary experiment based on Fibonacci numbers) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (2): 28-33.

[7] 范瑞祥,苗洁蓉,王文彬,等 (Fan Ruixiang, Miao Jierong, Wang Wenbin, et al.). 集中式太阳能逆变器快速 MPPT 方法 (Quick MPPT method of centralized PV inverter) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2019, 23 (7): 113-119.

[8] Reisi A R, Moradi M H, Jamasb S. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review [J]. Renewable & Sus-

- tainable Energy Reviews, 2013, 19 (1): 433-443.
- [9] 马爱华, 李磊, 师贺 (Ma Aihua, Li Lei, Shi He). 光伏电池建模及变步长 MPPT 控制 (Modeling of photovoltaic cells and MPPT control algorithm with variable step) [J]. 电气工程学报 (Journal of Electrical Engineering), 2017, 12 (5): 58-63.
- [10] Liu F, Duan S, Liu F, et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (7): 2622-2628.
- [11] Tey K S, Mekhilef S. Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level [J]. Solar Energy, 2014, 101 (1): 333-342.
- [12] Motahhir S, El Ghzizal A E, Sebti S, et al. Modeling of photovoltaic system with modified incremental conductance algorithm for fast changes of irradiance [J]. International Journal of Photoenergy, 2018: 1-13.
- [13] Belkaid A, Colak I, Isik O. Photovoltaic maximum power point tracking under fast varying of solar radiation [J]. Applied Energy, 2016, 179 (1): 523-530.
- [14] Soon T K, Mekhilef S. A fast-converging MPPT technique for photovoltaic system under fast varying solar irradiation and load resistance [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11 (1): 176-186.
- [15] Green M A. Photovoltaic principles [J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2002, 14 (1): 11-17.
- [16] Ishaque K, Salam Z, Taheri H. Simple, fast, and accurate two-diode model for photovoltaic modules [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95 (2): 586-594.
- [17] Solarex. MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules Arrays Datasheet [EB/OL]. <https://www.solarelectric-supply.com/media/custom/upload/Solarex-MSX64.pdf>
- [18] 杨宏超 (Yang Hongchao). 基于光伏组件内部参数辨识的故障诊断模型研究 (Research on fault diagnosis model based on internal parameters identification of Photovoltaic modules) [D]. 南昌: 南昌航空大学 (Nanchang: Nanchang Hangkong University), 2018.
- [19] Sokolov M, Shmilovitz D. Load line emulation based maximum power point tracking [A]. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference [C]. Rhodes, Greece 2008. 4098-4101.
- [20] Coelho R F, Concer F, Martins D C. A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking [A]. 2009 Brazilian Power Electronics Conference [C]. Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, 2009. 673-678.
- [21] Erickson Robert W, Maksimović Dragan. Fundamentals of power electronics [M]. New York: Springer, 2007.
- [22] Soon T K, Mekhilef S, Safari A. Simple and low cost incremental conductance maximum power point tracking using buck-boost converter [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013, 5 (2): 1-13.
- [23] 张光明, 刘毅力, 马龙涛, 等 (Zhang Guangming, Liu Yili, Ma Longtao, et al.). 一种变步长扰动观察法在光伏 MPPT 中的应用 (Application of a variable step size perturbation and observation method on photovoltaic MPPT) [J]. 西安工程大学学报 (Journal of Xi'an Polytechnic University), 2019, 33 (4): 433-439.
- [24] Li X S, Wen H Q, Jiang L, et al. An improved MPPT method for PV system with fast-converging speed and zero oscillation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52 (6): 5051-5064.
- [25] Tajuddin M F N, Arif M S, Ayob S M, et al. Perturbative methods for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) systems: A review [J]. International Journal of Energy Research, 2015, 39 (9): 1153-1178.

An improved INC algorithm under fast varying solar irradiation

XU Li-bin, CHENG Ruo-fa, YANG Jia-jing, LIU Pin-ping

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Under the rapid change of solar irradiation, the conventional maximum power point tracking (MPPT) algorithms have poor tracking effect, and have the disadvantages of low tracking accuracy, large steady-state oscillation rate, slow response speed and large power loss during tracking. In this paper, an improved INC algorithm is proposed. When the solar irradiation rises rapidly, the variable step size INC algorithm that is able to mitigate inaccurate responses can be used to track the maximum power point. When the solar irradiation decreases rapidly, the maximum power point can be quickly tracked by using the load curve and the I-V characteristic curve. The simulation results showed that the algorithm has a fast response speed under the rapid change of solar irradiation, which is 9 times that of the conventional INC algorithm; and the tracking accuracy is 99.593%, which is 9.113% higher than that of the conventional INC algorithm.

Key words: MPPT; response speed; tracking accuracy; Buck-Boost circuit; improved INC algorithm