

文章编号:1671-6833(2018)06-0088-05

基于电导增量法的太阳能光伏阵列 MPPT 仿真

梁亮¹, 詹智民², 邓小磊³, 叶磊², 陈根永¹

(1. 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001; 2. 湖北华中电力科技开发有限责任公司,湖北 武汉 430077; 3. 国网河南禹州市供电公司,河南 禹州 461670)

摘要:针对太阳能光伏阵列最大功率跟踪控制问题,利用 PSCAD/EMTDC 软件测量了光照强度从 0 到 1200 W/m² 和温度从 0 到 100 °C 条件下光伏阵列的短路电流及开路电压,结果表明:恒温条件下,随着光照强度的升高,开路电压及短路电流均逐渐增大;恒光强条件下,随着运行温度的升高,开路电压逐渐减小,而短路电流逐渐增大.然后采用滞环比较的方法产生控制脉冲,从跟踪速度和精度两方面对基于电导增量法的 MPPT 控制策略进行了改进,建立仿真模型并实验,完成最大功率跟踪控制,实验结果表明光伏阵列最大输出功率会随着光照强度的增大而增大.

关键词:光伏阵列;电导增量法;最大功率点跟踪;仿真模型;数据分析

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.029

0 引言

太阳能发电技术前景广阔且发展迅速,但其目前存在发电效率低,输出特性非线性等限制,因此对其最大功率点运行的研究十分必要.此外,光照强度的变化,环境温度和太阳能电池板粉尘聚集都会对光伏发电系统的输出造成很大影响^[1-2].

MPPT 控制的目的是使光伏发电系统能够在多变的环境条件下自动获得理想的最大功率点运行.目前为光伏发电而发展起来的 MPPT 方法有许多,例如扰动观察法、恒定电压法、电导增量法等^[3-5],以及在这些分类的基础上,根据实际情况和各种方法的优缺点进行相应改进的方法.综合考虑各种 MPPT 方法,可以看出电导增量法是其中效果较好的一种,它的最大优点在于能够快速准确地使系统工作在最大功率点,不会像扰动观测法那样在最大功率点附近反复振荡,并且当外界光照等条件剧烈变化时,电导增量法能够快速准确地进行追踪,系统运行效果较好^[6].

笔者将利用 PSCAD/EMTDC 软件实现基于电导增量法的 MPPT 控制仿真.首先通过仿真对不同光照强度和不同运行温度下光伏阵列的短路

电流及开路电压进行测量分析,然后采用滞环比较的方法产生控制脉冲,搭建 MPPT 控制仿真电路,进行光照强度为 1 000 W/m²、运行温度为 25 °C 条件下的最大功率追踪,并研究了恒温下不同光照强度对光伏阵列最大功率点的影响.

1 光伏电源的数学模型及物理模型

1.1 光伏电源等效电路及数学模型

依据光伏电源内部结构和电路特性,可建立光伏电源的数学模型公式^[7]:

$$I_{VD} = I_0 (e^{\frac{qU_{VD}}{AkT}} - 1); \quad (1)$$

$$I_L = I_{ph} - I_0 (e^{\frac{q(U_{oc} + I_L R_s)}{AkT}} - 1) - \frac{U_D}{R_{sh}}; \quad (2)$$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{VD} - \frac{U_D}{R_{sh}} - \frac{U_D}{R_s}; \quad (3)$$

$$U_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right), \quad (4)$$

式中: A 为 P-N 结曲线常数; I_{VD} 为内部等效二极管的 P-N 结反向饱和电流; I_{sc} 为光伏电源短路电流; U_D 为等效二极管端电压; U_{oc} 为光伏电源开路电压; Q 为电子电荷; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度.

1.2 光伏并网的拓扑结构

要实现 MPPT 功能必须有电路拓扑的支

收稿日期:2017-04-10;修订日期:2017-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507155);河南省国际科技合作计划项目(162102410071)

通信作者:陈根永(1964—),男,河南禹州人,郑州大学教授,主要从事电力系统相关研究,E-mail:ezzugy@163.com.

持. 现有光伏发电系统并网的拓扑主要有单极式和双极式两种, 图 1 和图 2 为这两种拓扑的结构.

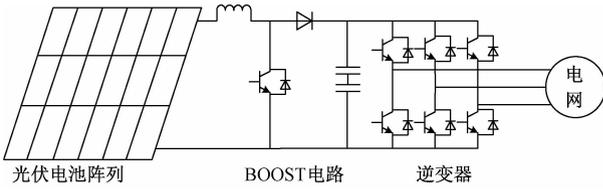


图 1 双极性光伏并网逆变器

Fig.1 Bipolar photovoltaic grid-connected inverter

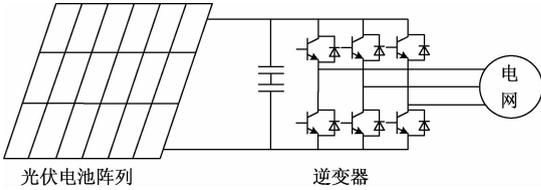


图 2 单极性光伏并网逆变器

Fig.2 Unipolar photovoltaic grid-connected inverter

如图所示, 双极性结构含升压斩波电路 (boost converter), 单极性则不含. 光伏发电一般采用图 3 所示的双级式并网结构, 第一级为 DC-DC 直流变换, 采用 Boost 电路拓扑结构, 目的是将光伏电池阵列输出直流电压升高到一个合适的水平, 并且实现最大功率跟踪控制. 第二级是 DC-AC 变换, 采用三相全控桥逆变电路, 从而实现并网. 本文仿真基于双极性拓扑结构, 实现最大功率跟踪控制^[8].

2 光伏阵列开路电压和短路电流的测量

光伏阵列开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 是 PSCAD/EMTDC 软件中 MPPT 元件的重要参数, 不仅和光伏阵列结构密切相关, 还与光照强度瞬时值 G 及电池运行温度瞬时值 T 有关^[9]. 这里设定光伏阵列由 11 个模块串联而成, 每个模块由 10 个光伏电池堆并联, 而每个光伏电池堆由 36 个光伏电池单元串联构成, 光照强度 G 与运行温度 T 为可变量, 建立图 3 所示仿真模型.

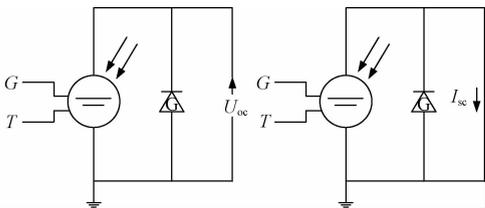


图 3 测量 U_{oc} 和 I_{sc} 仿真模型

Fig.3 The artificial model to measure U_{oc} & I_{sc}

2.1 温度对开路电压和短路电流的影响

现控制光照强度瞬时值 $G = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, 设置温度梯度为 0、25、50、75、100 $^{\circ}\text{C}$. 观察仿真波形, 记录对应的开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} , 如表 1 所示.

表 1 $G = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 条件下开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc}
Tab.1 Short-circuit current U_{oc} and open-circuit voltage I_{sc} under the condition $G = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$

$T/^{\circ}\text{C}$	U_{oc}/V	I_{sc}/A	$T/^{\circ}\text{C}$	U_{oc}/V	I_{sc}/A
0	331.7	24.4	75	305.2	26.2
25	330.5	25.0	100	292.3	26.9
50	318.0	25.6			

由表 1 可知, 在适当的运行温度范围内 (0 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$), 当光照强度 G 保持恒定时, 随着电池运行温度 T 的升高, 开路电压 U_{oc} 逐渐减小, 而短路电流 I_{sc} 逐渐增大.

2.2 光照强度对开路电压和短路电流的影响

现控制电池运行温度瞬时值 $T = 25\ ^{\circ}\text{C}$, 设置光照强度梯度为 0、200、400、600、800、1 000、1 200 W/m^2 . 观察仿真波形, 记录对应的开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} , 如表 2 所示.

表 2 $T = 25\ ^{\circ}\text{C}$ 条件下开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc}
Tab.2 Short-circuit current U_{oc} and open-circuit voltage I_{sc} under the condition $T = 25\ ^{\circ}\text{C}$

$G/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	U_{oc}/V	I_{sc}/A	$G/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	U_{oc}/V	I_{sc}/A
0	0	0	800	327	20.0
200	305	5.0	1 000	331	25.0
400	316	10.0	1 200	333	30.0
600	323	15.0			

由表 2 可知, 在适当的光照强度范围内 (0 ~ 1 200 W/m^2), 当运行温度 T 保持恒定时, 随着光照强度 G 的升高, 开路电压 U_{oc} 逐渐增大, 短路电流 I_{sc} 也逐渐增大, 且与 G 成正比例关系. 当光照强度为 0 时, 开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 均为 0.

3 MPPT 控制的仿真

光伏系统中的 MPPT 控制策略, 就是先根据实时检测光伏电源的瞬时输出功率, 经过一定的控制算法预测当前工况下光伏电源可能的最大功率输出点, 然后通过改变当前的阻抗或电流、电压等方式来满足最大功率输出的要求^[10].

3.1 电导增量法的原理

电导增量法通过不断比较光伏电源工作时的

电导增量和瞬间电导,进而改变控制信号^[11]. 光伏电源最大功率点处的光伏电源输出功率 P 与输出电压 U 满足条件:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0. \quad (5)$$

从而可得:

$$\frac{I}{U} + \frac{dI}{dU} = G + dG = 0, \quad (6)$$

式中: dP 为输出功率 P 的增量; dU 为输出电压 U 的增量; dI 为电流 I 的增量; G 为瞬间电导; dG 为瞬时电导 G 的增量.

用 ΔU 和 ΔI 代替 dU 和 dI ,可得:

$$dI(t_2) \approx \Delta I(t_2) = I(t_2) - I(t_1); \quad (7)$$

$$dU(t_2) \approx \Delta U(t_2) = U(t_2) - U(t_1). \quad (8)$$

进一步推导,可得系统运行点与最大功率点 U_{MPP} 的判据如下,其中 t_1 和 t_2 为两相邻的时间点.

$$(1) G + dG \approx \frac{I}{U} + \frac{I(t_2) - I(t_1)}{U(t_2) - U(t_1)} > 0, \text{ 则}$$

$U < U_{MPP}$,需要适当增大参考电压来达到最大功率点;

$$(2) G + dG \approx \frac{I}{U} + \frac{I(t_2) - I(t_1)}{U(t_2) - U(t_1)} < 0, \text{ 则}$$

$U > U_{MPP}$,需要适当减小参考电压来达到最大功率点;

$$(3) G + dG \approx \frac{I}{U} + \frac{I(t_2) - I(t_1)}{U(t_2) - U(t_1)} = 0, \text{ 则}$$

$U = U_{MPP}$,这时系统正工作在最大功率点处.

3.2 在 PSCAD/EMTDC 软件上搭建仿真模型

该模型追踪算法采用的是电导增量法,元件输入为光伏阵列输出电压 V_{pvX} 和输出电流 I_{pvX} .

模型主电路如图 4 所示. 光伏阵列的输入为光照强度变量 G 与温度变量 T ,输出连接至三相逆变器直流电容, V_{Fdc} 为实际直流电容电压,三相逆变器由 6 个 IGBT 元件组成,光伏阵列经无源逆变后向电阻负载提供有功功率,其中 I_{Fa} 、 I_{Fb} 与 I_{Fc} 为三相输出电流.

图 5 所示为控制电路. 光伏阵列输出电压 V_{pvX} 和输出电流 I_{pvX} 经惯性环节输入 MPPT 元件,元件输出是最大功率点对应的电压 D ,该电压信号 D 加上电阻压降信号 F 之后可得直流电容的电压参考信号 V_{deref} . 将该电压与实际直流电容电压 V_{Fdc} 相减,再通过 PI 校正环节,可得参考输出电流幅值信号 I_M ,最后通过电流初相位、幅值 I_M 及频率合成三相输出电流参考信号 I_{aref} 、

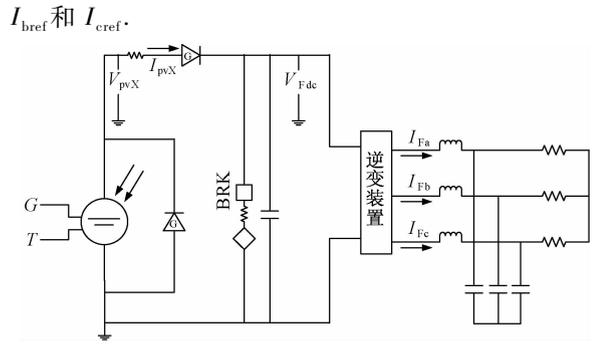


图 4 MPPT 仿真模型

Fig. 4 The main artificial model of MPPT

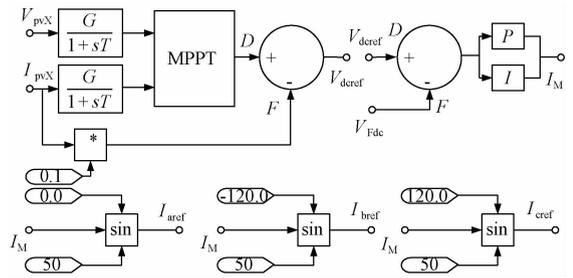


图 5 控制电路

Fig. 5 The control circuit of MPPT

三相逆变器的触发脉冲产生电路如图 6 所示. 图中 err_A 、 err_B 与 err_C 为各项电流的误差信号, H_on 为开通信号, H_off 为关断信号, $g_1 \sim g_6$ 为生成的驱动脉冲信号.

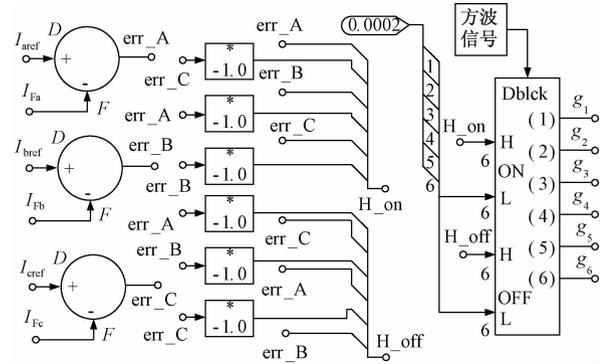


图 6 触发脉冲产生电路

Fig. 6 The trigger pulse generating circuit

产生触发脉冲采用了滞环比较的方法,并利用了 PSCAD 提供的脉冲发生元件,这里以编号 1 和 4 的 IGBT 的脉冲产生方法为例说明该电路原理. 产生器件 1 开通信号的 H 端接 A 相电流的误差信号 err_A , L 输入为滞环死区 (0.000 2 kA), 则当参考电流信号大于实际输出电流 0.2 A 时, 开通驱动信号为 1, 器件 1 导通; 产生器件 1 关断信号的 H 端接 A 相电流的误差信号 err_A , L 输入为滞环死区 (0.000 2 kA), 则当实际输出电流大于参考电流信号 0.2 A 时驱动信号为 0, 器件 1

关断. 器件 4 的驱动信号正好与器件 1 的反相.

3.3 仿真波形观测与分析

设置仿真总时长 10.0 s, 仿真步长 50 μ s, 绘图步长 250 μ s, 依此设置仿真参数并运行.

逆变器 A 相输出电流和参考电流的仿真波形如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 直流电压能较好的跟踪参考电压指令, 逆变器输出电流可以良好的跟踪参考电流, 输出是 50 Hz 基波正弦信号.

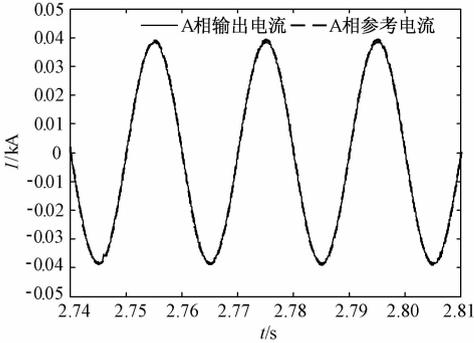


图 7 A 相电流波形

Fig. 7 The simulation waveform of A phase current

光伏阵列的输出电压电流和输出功率仿真波形分别如图 8 和图 9 所示.

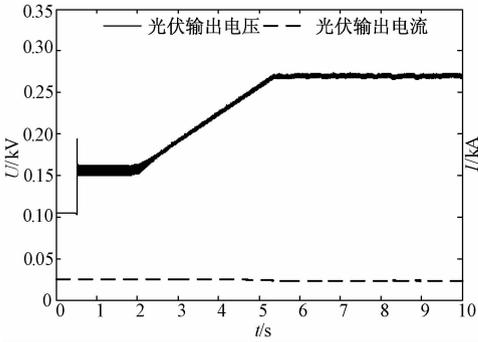


图 8 光伏输出电压电流波形

Fig. 8 The simulation waveform of photovoltaic output voltage and current

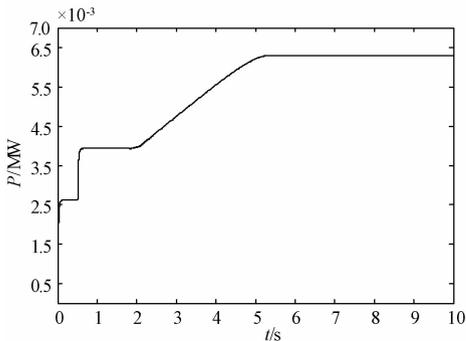


图 9 输出功率波形

Fig. 9 The simulation waveform of output power

设定孔径起点为 2.0 s, 长度为 8.0 s, 可得光伏阵列的 $P-U$ 曲线如图 10 所示. 根据以上仿真波形图可以看出, 大约 5.4 s 之后光伏阵列输出达到稳定状态, 稳定后的输出电压约为 269 V, 输出电流约为 23.4 A, 最大功率达到 6.3 kW. 根据图 10 可以看出, 对应最大功率的输出电压也基本为 270 V, 最大功率约为 6.3 kW, 即说明该模型实现了光伏发电 MPPT 控制, 输出功率达到当前光照条件和温度条件下的最大值.

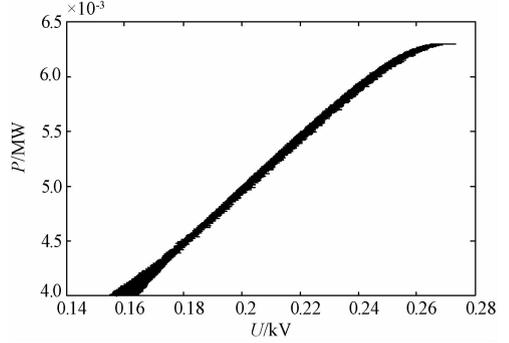


图 10 光伏阵列的 $P-U$ 波形

Fig. 10 The $P-U$ waveform of photovoltaic array

3.4 不同光照强度下的最大功率点

控制电池运行温度 $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 不变, 设定光照强度梯度为 0, 200, 400, 600, 800, 1 000, 1 200 W/m^2 . 设置仿真电路参数, 观察波形并记录最大功率点及相应的 U_{MPP} , 如表 3 所示.

表 3 $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$, 不同光照强度下的最大功率点

Tab. 3 MPP under different solar irradiance levels

when $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$

$G/$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	$P_{\text{M}}/$ kW	$U_{\text{MPP}}/$ V	$G/$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	$P_{\text{M}}/$ kW	$U_{\text{MPP}}/$ V
0	0	0	800	5.00	269
200	0.16	32	1000	6.30	270
400	0.60	63	1200	3.10	105
600	1.40	95			

可见在一定光照强度范围内, 保持运行温度 T 恒定, 光伏阵列最大输出功率会随着光照强度的增大而增大, 当 $G = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 时最大输出功率 P_{M} 达到最大值, 此光照强度为最适宜的值.

4 结论

笔者通过对光伏阵列的开路电压和短路电流进行仿真分析, 得出以下结论: 温度保持恒定, 随着光照强度的升高, 开路电压逐渐增大, 短路电流逐渐增大. 当光照强度为 0 时, 开路电压和短路电流均为 0; 光照强度保持恒定, 随着运行温度的升

高,开路电压逐渐减小,而短路电流逐渐增大。

然后针对光伏发电系统的特点,利用PSCAD/EMTDC软件建立了基于电导增量法的MPPT控制仿真模型,该模型使用了MPPT元件,逆变环节的触发脉冲采用电流滞环比较的方法,模型整体简洁有效,具有良好的稳定性,能够迅速有效地实现对光伏发电的最大功率追踪,输出功率可较快达到当前光照强度与温度条件下的最大值。最后分析了不同光照强度对最大功率点的影响,从而确定了光伏发电的最佳光照强度。

参考文献:

- [1] MAHDI A, TANG W, WU Q. Improvement of a MPPT algorithm for PV systems and its experimental validation[C]//International Conference on Renewable Energies & Power Quality. Granada, Spain; EA4EPQ, 2010:107-110.
- [2] 许天. 并联式支路光伏发电系统的研究与仿真[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 25-28.
- [3] HOHM D P, ROPP M E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experi-

mental, programmable, maximum power point tracking test bed [C] // Photovoltaic Specialists Conference, Texas: IEEE, 2000: 1699-1702.

- [4] GHAZANFTI J, FARSANGI M. Maximum power point tracking using sliding mode control for photovoltaic array[J]. Iranian journal of electrical & electronic engineering, 2013, 9(3): 189-196.
- [5] 叶满园. 以电导增量法实现MPPT的单机光伏并网逆变器[J]. 电力电子技术, 2006, 40(2): 30-32.
- [6] 徐鹏威, 刘飞, 刘邦银, 等. 几种光伏系统MPPT方法的分析比较及改进[J]. 电力电子技术, 2007, 41(5): 3-5.
- [7] 苏建徽, 余世杰. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- [8] 杨文杰, 曾德容. 光伏发电接入微网运行控制仿真研究[J]. 电器开关, 2011(1): 48-54.
- [9] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [10] 王岩. 光伏发电系统MPPT控制方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2007.
- [11] 余运俊, 张翔, 王时胜, 等. 电导增量法光伏发电MPPT研究综述[J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2440-2444.

PV Array MPPT Simulation Based on the Conductance Increment Method

LIANG Liang¹, ZHAN Zhimin², DENG Xiaolei³, YE Lei², CHEN Genyong¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Hubei Central China Technology Development of Electric Power CO. LTD, Wuhan 430077, China; 3. Yuzhou Power Supply Company, Yuzhou 461670, China)

Abstract: This paper focused on the problem of MPPT control for PV arrays. Under the solar irradiance levels from 0 to 1 200 W/m² and the ambient temperatures from 0 to 100 °C, the short circuit current and open circuit voltage of PV array have been measured using PSCAD/EMTDC software. And the result showed that in the condition of constant temperature, the open circuit voltage and short circuit current increased with the increase of illumination intensity; in the condition of constant light intensity, the open circuit voltage decreased and the short-circuit current increased with the increase of temperature. The hysteresis loop was used to generate the control pulse. The MPPT control method based on conductance increment method has been improved from the two aspects of tracking speed and accuracy. A simulation model of system was built to achieve MPPT control. Finally, the experimental result showed that the maximum output power of the PV array increased with the increase of illumination intensity.

Key words: PV array; conductance increment method; maximum power point tracking; simulation model; data analysis