

扰动观测法控制 MPPT 系统运动特性分析

倪 雨,郝帅翔

(成都信息工程大学控制工程学院,四川成都 610225)

摘 要: 扰动观测法是光伏系统 MPPT 算法中最常用的追踪算法.为了准确实现扰动观测法的追踪效果,该文基于扰动观测法等同于分段恒压控制的思想,推导了扰动观测法控制的调整时间公式,分析了扰动观测法控制 MPPT 系统工作点在光强突变时的运动特性,提出了“错误保持”、“正确保持”、“判断错误”和“判断正确”四个概念,总结了扰动观测法控制 MPPT 系统工作点的十二种运动情形及其动态效果,仿真结果和实验结果验证了四种典型运动情形.以此十二种运动情形为依据提出了一种对等评价不同扰动观测法控制性能优劣的评判方法,并应用该方法研究固定步长和变步长的暂态性能,结果表明,当判断错误时,变步长控制的动态性能比定步长的更差.该文研究结果有助于改善干扰控制法的动态性能.

关键词: 光伏电池;最大功率点跟踪;恒压法;扰动观测法;运动特性

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)07-1388-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.021

Motion Characteristics Analysis of P&Q Control MPPT System

NI Yu, HAO Shuai-xiang

(College of Automatic Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: A perturb and observe (P&Q) method is the most commonly used MPPT (maximum power point tracing) algorithm for photovoltaic system. For achieving accurate tracking effect, based on the idea of P&Q method equivalent to piecewise constant voltage method, the settled time formula of the P&Q control MPPT system was deduced in this paper. The motion characteristics of MPPT system operating point were analyzed when the light intensity changes, and then four concepts such as "wrong maintaining", "right maintaining", "misjudgment" and "good judgment", are proposed. It is summarized that 12 movement situations of P&Q control MPPT system operating point correspond to a dozen different dynamic effects; finally the simulations and experimental results verify 4 typical motions. Based on 12 motions, the fair evaluation method for different implementation of the P&Q method is presented, and then the method is used to study the fixed step and variable step method. Simulation results show that when a misjudgment occurs, the dynamic performance of a variable step size is less than the fixed step size. The results contribute to the improvement of the dynamic performance of the P&Q method.

Key words: photovoltaic cells; maximum power point tracing; constant voltage method; perturb and observe method; motion characteristics

1 引言

MPPT 技术是光伏发电系统的关键技术之一.在最大功率点跟踪算法中,电导增量法以及模糊控制等智能控制算法都是基于扰动思想实现,扰动观测法是最简单也是最基本的 MPPT 控制算法^[1],因而在光伏发电系统中得到了广泛应用.

但是,扰动观测法也存在一定局限性.在扰动观测法 MPPT 系统稳态运行时,工作点在最大功率点附近波

动,伴有能量损失;当光照发生剧烈变化时,系统动态特性较差^[1].为了改善 MPPT 算法的稳态特性和动态特性,文献[1~13]对扰动观测法进行了深入研究并提出各种改进方法,但均未分析扰动观测法的动态特性;由于没有定量评价标准^[2],无法对原算法和改进算法进行合理的对比分析和正确评价,所得研究结果缺乏说服力.

为了克服扰动观测法的局限性,合理评价不同 MPPT 算法的优劣,本文将结合 MPPT 系统工作点的

运动特性,以光照突变为条件,分析扰动观测法的动态特性,研究光伏电池工作点的运动规律,并以此为基础建立一个评价不同 MPPT 算法动态性能优劣的评价方法.最后,通过仿真和实验验证评价方法的正确性和可行性.

2 扰动观测法控制原理

扰动观测法基本原理:首先检测光伏电池在某一参考电压下的输出功率,然后施加一个正向参考电压扰动量,并检测其输出功率.若输出功率增加,说明最大功率点在当前工作点的右侧,可以继续增加正向扰动量;若输出功率降低,说明最大功率点在当前工作点的左侧,应该反向施加扰动量.如此反复,直到使输出功率在预先设定的范围内波动,从而实现了最大功率点跟踪.扰动观测法控制流程如图 1 所示.

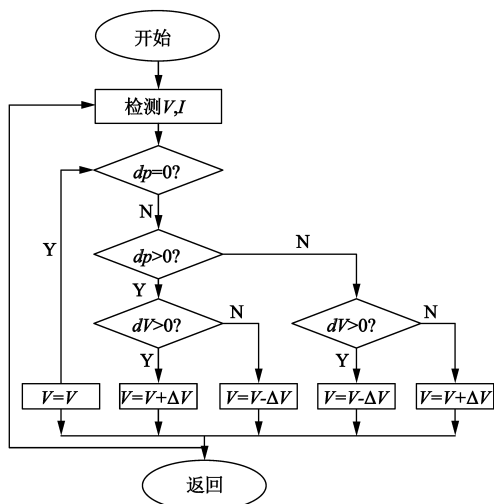


图1 扰动观测法流程图

由图 1 可知,扰动观测法控制存在 5 种情形, $dp = 0$ 成立时,实现最大功率点跟踪; $dp > 0, dV > 0$,最大功率点在参考功率点左侧,继续增加参考电压; $dp > 0, dV < 0$,最大功率点在参考功率点右侧,则继续减少参考电压; $dp < 0, dV > 0$,最大功率点在参考功率点右侧,则应减少参考电压; $dp < 0, dV < 0$,最大功率点在参考功率点左侧,则应增加参考电压.最终实现最大功率点跟踪.

3 动态调整时间分析

为了分析扰动观测法 MPPT 系统工作点运动规律,本节分析扰动观测法追踪系统的动态调节过程,推导调整时间的表达式.扰动观测法控制系统稳态和暂态(光强突变)过程如图 2 所示.

由图 2(a)可知,扰动观测法控制等效为分段恒压控制,即控制器给出一个新参考电压,光伏系统进行一

次恒压跟踪.电压扰动观测法计算的参考电压呈阶梯状,每个台阶的宽度由控制器对电压和电流的采样时间决定,每个台阶的高度由控制器计算的步长决定,每个台阶的升降由前两个采样时刻的电压和电流共同决定.

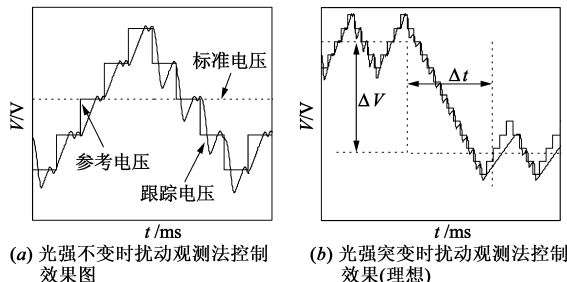


图2

从图 2(b)中可知,扰动观测法 MPPT 系统动态调整时间为

$$t \approx T * \Delta V / d \quad (1)$$

其中, t 为动态调整时间, $t = t_1 - t_2$,光强突变时刻 t_1 ,下一初始稳态时刻 t_2 ; T 为采样时间; $\Delta V = V_1 - V_2$ 为参考电压跌落量, $t = t_1$ 时最大功率点电压 V_1 , $t = t_2$ 时最大功率点电压 V_2 ; d 为步长.

动态过程伴随的能量为

$$w = \int_0^t p dt \quad (2)$$

4 光伏电池工作点运动情况分析

假设 MPPT 系统已有精确光伏模型,准确实现了扰动法的控制机理.在分析中,本节采用 X 表示光伏电池工作点.

4.1 X 运动范围

X 运动情况如图 3 所示.图 3 中, M_i 为各个光强下的最大功率点, A_i, B_i 为工作点 X 的运动范围.

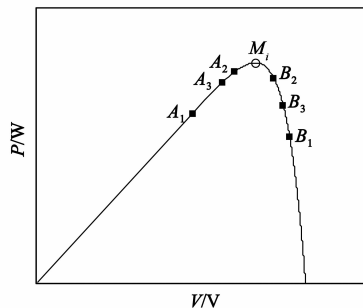


图3 光伏电池工作点运动情况

MPPT 系统 X 有三种运动情况: M 左侧, M 右侧, M 两侧.当 X 仅在 M 左侧或 M 右侧时, X 不经过 M ,造成较大能量损失;在对比研究不同控制方法的控制效果时,如果跃变时刻选取不同,可能造成不公平对比,而

影响研究结果的准确性和可信度. 为此, 下文分析不同跃变时刻对瞬态响应过程的影响.

4.2 X 运动特性分析

假设: 光强较大时, X 运动在 $P-V$ 曲线 1 上 $A_1 - B_1$ 之间, 最大功率点为 M_1 ; 光强较小时, X 运动在 $P-V$ 曲线 2 上 $A_2 - B_2$ 之间, 最大功率点为 M_2 . 当光强阶跃减小时, 变化前 X 可能在变化后最大功率点 M_2 左侧 (跃变量较小), 也可能在 M_2 右侧 (跃变量较大); 当光强阶跃增加时, X 可能在变化后最大功率点 M_1 左侧 (跃变量较大), 也可能在 M_1 右侧 (跃变量较小). 本文以 A_1 在 M_2 左侧 (光强阶跃减小量较小), B_2 在 M_1 右侧 (光强阶跃增加量较小) 为例进行分析.

(1) X 在光强减小时运动情形如图 4 所示. 在图 4 中, 三角符号顶点朝上代表工作点沿 $P-V$ 曲线向上运动, 顶点朝下代表工作点沿 $P-V$ 曲线向下运动.

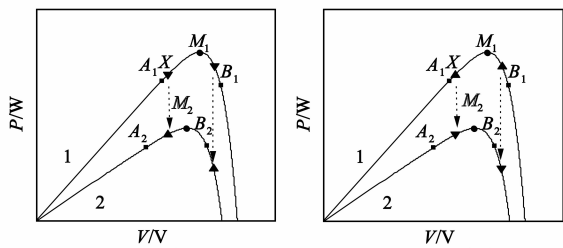


图4

由图 4 可知, 当光强小幅跃减时, X 由 $P-V$ 曲线 1 运动至 $P-V$ 曲线 2, 跃变后标准电压小于跃变前标准电压.

情况 1: 如图 4(a), 当 X 在 $A_1 - M_1$ 之间沿着 $P-V$ 曲线 1 向下运动时, 某一时刻光照跃减, 判断命令 $dp < 0$, 因电压保持原减小趋势, 则 $dv < 0, dp/dv > 0$, 新参考电压 $V = V + \Delta V$, X 沿着 $P-V$ 曲线 2 向上运动, 判断正确.

情况 2: 如图 4(a), 当 X 在 $M_1 - B_1$ 之间沿着 $P-V$ 曲线 1 向下运动时, 某一时刻光照跃减, 判断命令 $dp < 0$, 因电压保持原增加趋势, 则 $dv > 0, dp/dv < 0$, 新参考电压 $V = V - \Delta V$, X 沿着 $P-V$ 曲线 2 向上运动, 判断正确.

情况 3: 如图 4(b), 当 X 在 $A_1 - M_1$ 之间沿着 $P-V$ 曲线 1 向上运动时, 某一时刻光照跃减, 判断命令 $dp < 0$, 因电压保持原增加趋势, 则 $dv > 0, dp/dv < 0$, 新参考电压 $V = V - \Delta V$, X 沿着 $P-V$ 曲线 2 向下运动, 判断错误.

情况 4: 如图 4(b), 当 X 在 $M_1 - B_1$ 之间沿着 $P-V$ 曲线 1 向上运动时, 某一时刻光照跃减, 判断命令 $dp < 0$, 因电压保持原减小趋势, 则 $dv < 0, dp/dv > 0$, 新参考电压 $V = V + \Delta V$, X 沿着 $P-V$ 曲线 2 向下运动, 判断错误.

(2) X 在光强增加时运动情形如图 5 所示.

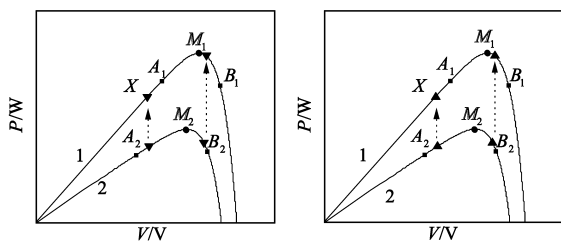


图5

由图 5 可知, 当光强小幅跃增时, X 由 $P-V$ 曲线 2 运动至 $P-V$ 曲线 1, 跃变后标准电压大于跃变前标准电压.

情况 5: 如图 5(a), 当 X 在 $A_2 - M_2$ 之间沿着 $P-V$ 曲线 2 向下运动时, 某一时刻光照跃增, 判断命令 $dp > 0$, 因电压保持原减小趋势, 则 $dv < 0, dp/dv < 0$, 新参考电压 $V = V - \Delta V$, X 沿着 $P-V$ 曲线 1 向下运动, 判断错误.

情况 6: 如图 5(a), 当 X 在 $M_2 - B_2$ 之间沿着 $P-V$ 曲线 2 向下运动时, 某一时刻光照跃增, 判断命令 $dp > 0$, 因电压保持原增加趋势, 则 $dv > 0, dp/dv > 0$, 新参考电压 $V = V + \Delta V$, X 沿着 $P-V$ 曲线 1 向下运动, 判断错误.

情况 7: 如图 5(b), 当 X 在 $A_2 - M_2$ 之间沿着 $P-V$ 曲线 2 向上运动时, 某一时刻光照跃增, 判断命令 $dp > 0$, 因电压保持原增加趋势, 则 $dv > 0, dp/dv > 0$, 新参考电压 $V = V + \Delta V$, X 沿着 $P-V$ 曲线 1 向上运动, 判断正确.

情况 8: 如图 5(b), 当 X 在 $M_2 - B_2$ 之间沿着 $P-V$ 曲线 2 向上运动时, 某一时刻光照跃增, 判断命令 $dp > 0$, 因电压保持原减小趋势, 则 $dv < 0, dp/dv < 0$, 新参考电压 $V = V - \Delta V$, X 沿着 $P-V$ 曲线 1 向上运动, 判断正确.

为分析方便, 本文将正确判断时的电压变化趋势定义为期望电压变化趋势, 据此提出“错误保持”概念: 在针对跃变的参考电压给出之前, 保持的原电压变化趋势与期望的电压变化趋势相反, 这种保持称作错误保持; 相同则为“正确保持”. 据此, 光强阶跃变化时, 情况 1 - 情况 8 分析结果如表 1 所示.

表 1 中, 延迟即延迟时间, 以跃变时刻为零初始时刻, 以参考电压等于跃变时刻参考电压且变化趋势与期望电压变化趋势一致时的最后时刻 (参考电压台阶右侧). 由表 1 可知, 光强减小时, 判断错误时延迟时间较判断正确时多 T ; 光强增加时, 判断正确时延迟时间为零, 判断错误时为 $4T$.

当 A_1 在 M_2 右侧, B_2 在 M_1 左侧分析方法相同, 即跃变量较大时, 也存在 8 种情况. 对比分析结果如表 2 所示.

表 1 情况 1-情况 8 保持与判断对比 (A_1 在 M_2 左侧, B_2 在 M_1 右侧, 跃变量较小)

光强	光强阶跃减小				光强阶跃增加			
情况	1	2	3	4	5	6	7	8
X	M_1 左侧向下运动	M_1 右侧向下运动	M_1 左侧向上运动	M_1 右侧向上运动	M_2 左侧向下运动	M_2 右侧向下运动	M_2 左侧向上运动	M_2 右侧向上运动
保持	错误保持	错误保持	正确保持	正确保持	错误保持	错误保持	正确保持	正确保持
判断	判断正确	判断正确	判断错误	判断错误	判断错误	判断错误	判断正确	判断正确
延迟	$2T$	$2T$	$3T$	$3T$	$4T$	$4T$	0	0

表 2 情况 1' - 情况 8' 保持与判断对比 (A_1 在 M_2 右侧, B_2 在 M_1 左侧, 跃变量较大)

光强	光强阶跃减小				光强阶跃增加			
情况	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
X	M_1 左侧向下运动	M_1 右侧向下运动	M_1 左侧向上运动	M_1 右侧向上运动	M_2 左侧向下运动	M_2 右侧向下运动	M_2 左侧向上运动	M_2 右侧向上运动
保持	正确保持	错误保持	错误保持	正确保持	错误保持	正确保持	正确保持	错误保持
判断	判断错误	判断正确	判断正确	判断错误	判断错误	判断正确	判断正确	判断错误
延迟	$3T$	$2T$	$2T$	$3T$	$4T$	0	0	$4T$

由表 1 和表 2 可知, 两个表中的 2(2'), 4(4'), 5(5') 和 7(7') 一样, 故光强突变时存在 12 种情形. 当光强减小时, 总是有至少 $2T$ 延迟, 且判断正确和正确保持不会同时出现; 当光强增加时, MPPT 系统总是存在两个极端, 延迟为零或 $4T$.

当光强跃变时, 发生判断正确, 判断错误, 正确保持和错误保持的概率各为 50%. 光强减小时, 判断正确, 必然伴随错误保持; 判断错误, 必然伴随正确保持. 加载时, 判断正确, 必然伴随正确保持; 判断错误, 必然伴随错误保持. 正确保持和判断正确同时出现的机率是 25%.

5 仿真分析与实验验证

5.1 理论分析的验证

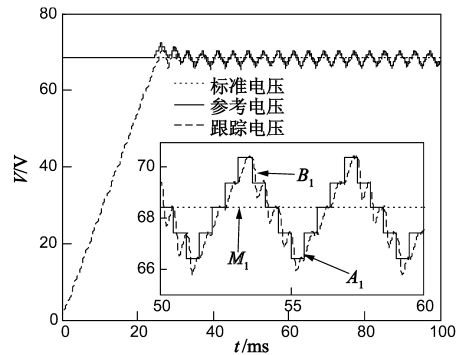
本节仿真分析固定步长扰动观测法, 验证光强跃变量较大时的情况 2'、4'、5' 和 7'. 本文采用 MSX240 型号光伏电池, 基于阻增量光伏模型对上述理论分析进行仿真验证.

当光照不变时, 扰动观测法最大功率点跟踪的仿真结果如图 6 所示.

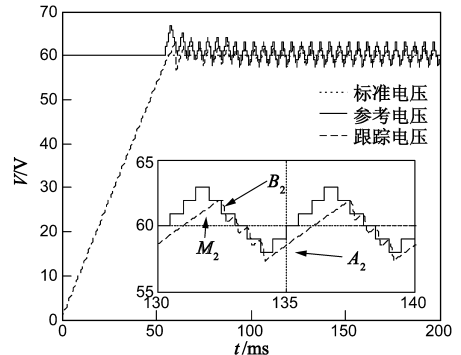
由图 6 可知, B_1 和 B_2 分别在 M_1 和 M_2 的右侧, A_1 和 A_2 分别在点 M_1 和 M_2 的左侧, 而且, A_1 在 M_2 的右侧, B_2 在 M_1 的左侧. 扰动观测法的参考电压呈阶梯状, 以标准电压为平均值上下波动, 光伏电池输出电压跟随参考电压的变化而变化.

(1) 情况 2': 在 $t = 53\text{ms}$ 时, X 向下运动, 光照阶跃减小, 仿真结果和对应实验现象如图 7 所示. 由图 7(b)

可知, t_1 时刻错误保持, t_2 时刻判断正确, 延迟 $2T$ 后 X 进入期望运动方向. 文献[4]中 Fig8(d) 与情况 2' 对应, 如图 7(c) 所示.



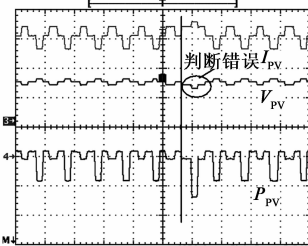
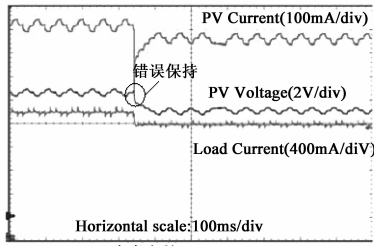
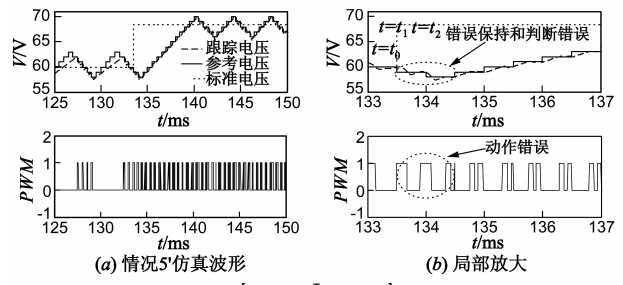
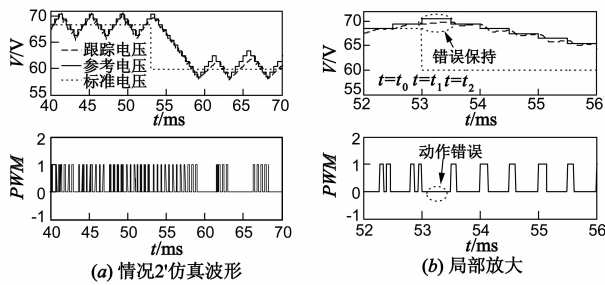
(a) 光照 1000W 时的电压跟踪图



(b) 光照 400W 时的电压跟踪图

图 6 不同光照时电压跟踪图

(2) 情况 4': 在 $t = 54\text{ms}$ 处, X 向上运动, 光照跃减, 仿真结果和对应实验现象如图 8 所示. 由图 8(b) 可知,



(c) 情况2'实验波形
图7

(c) 情况5'实验波形
图9

t_1 时刻正确保持, t_2 时刻判断错误, 延迟 $3T$ 后 X 进入期望运动方向. 文献[3]中 Fig10(b) 和文献[4]中 Fig7(d) 所对应情况 4', 如图 8(c) 所示.

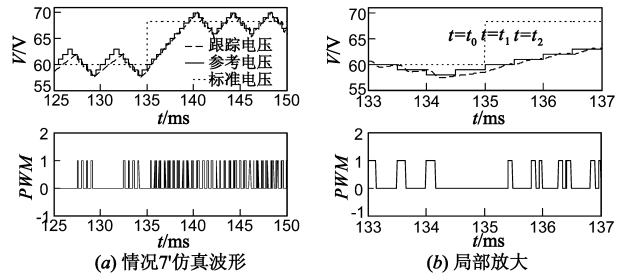
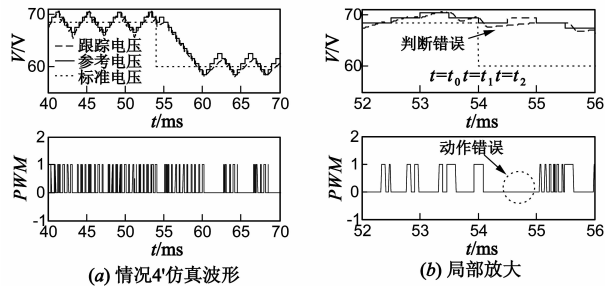
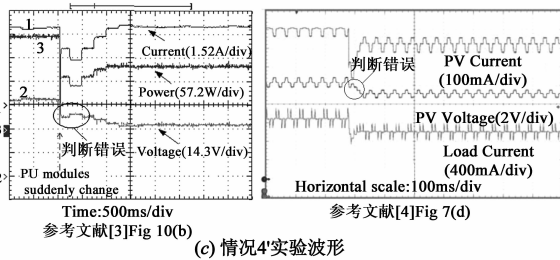


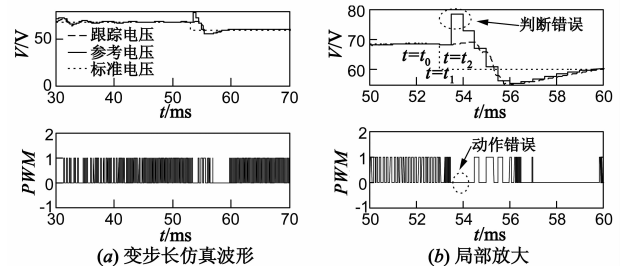
图10

5.2 研究结果应用

当判断正确时, 变步长静态性能优于固定步长. 当判断错误时, 变步长的动态特性会变得很差. 选取固定步长为 1, 变步长 $d = dp/dv$ 进行对比, 在 X 相同运



(c) 情况4'实验波形
图8



(c) 变步长实验波形
图11

(3) 情况 5': 在 $t = 133.5\text{ms}$ 处, 光照跃增, 仿真结果和实验现象如图 9 所示. 由图 9(b) 可知, t_1 时段错误保持, t_2 时刻判断错误, 延迟 $4T$ 后 X 进入期望运动方向. 文献[1]中 Fig20(b) 对应情况 5', 如图 9(c) 所示.

(4) 情况 7': 在 $t = 135\text{ms}$ 时, 光照突增, 仿真结果如图 10 所示. 由图 10(b) 可知, t_1 时刻正确保持, t_2 时刻判断正确, X 直接进入期望运动方向.

仿真结果和实验结果验证了理论分析的正确性. 当判断错误时, 系统将延迟至少 $3T$ 才能够进入期望运动方向.

动情况下,光强发生突变.当光强跃减时,变步长 MPPT 系统的主要波形如图 11 所示.

由图 11(b)可知, $t = t_1$ 时刻正确保持, $t = t_2$ 时刻判断错误,延迟 $4T$ 后进入期望运动方向.文献[4]中 Fig10 与之对应.同属情况 4,变步长的延迟时间较常规

扰动法多 $1T$.

当光强跃减时,变步长和定步长的最大功率跟踪结果如图 12 所示.由图 12(a)可知,相同跃变时刻不一定对应相同的跃变情况;以情况 4 发生跃变,定步长扰动观测法的暂态响应时间小于变步长,即 $\Delta t_1 < \Delta t_2$.

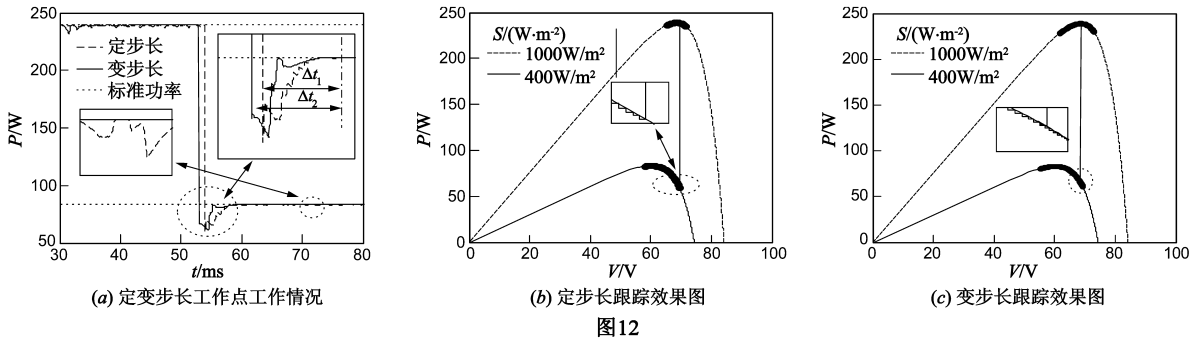


图 12

由图 12(c)可知,在 X 处于 $B \rightarrow M$ 运动中,当光照突减时,变步长 MPPT 系统的工作点在变化后 $P-V$ 曲线上存在明显向右运动(拖尾),造成较严重延迟(大于定步长),加长了系统动态调节时间.

综上,在同等跃变情况下,当发生判断错误时,变步长扰动观测法暂态性能恶化而不如定步长.推广上述方法,即可得到一种对于不同 MPPT 算法动态特性公平合理的对比评价方法:

(1)从十二种情形中任意选择一种,并保证不同扰动法均在此情形下发生跃变.

(2)仿真给出光伏电池端电压、电流和输出功率的波形,观测暂态调节时间和能量损失.

(3)开展与仿真条件匹配的实验,给出光伏电池端电压、电流和输出功率等波形,观测暂态调节时间和能量损失.

(4)综合仿真和实验结果给出不同扰动观测法的控制效果.

经过以上四个步骤,能够正确合理地评价不同扰动观测法控制的动态性能优劣,从而提高了结果的可信度和准确度.

6 结论

本文研究了扰动观测法控制原理,基于扰动观测法控制等同于分段恒压控制的思想,给出了估算扰动观测法控制在光强变化时调节时间的计算方法,分析了扰动观测法控制 MPPT 系统光伏电池工作点在光强突变时的运动规律,提出了“错误保持”、“正确保持”、“判断错误”和“判断正确”四个概念,说明了“判断错误”会严重影响扰动观测法控制的动态特性,总结出 12 种突变情形.通过仿真分析说明,实现公平合理的对比必要条件是同等跃变情形而非主观上认为的相同跃变

时刻.本文还以此为依据,对变步长和定步长在同等跃变情形下进行对比,结果表明变步长控制的暂态性能较定步长更差.扰动观测法 MPPT 系统工作点运动规律和 12 种突变情形的提出,为公平合理对比不同算法以及改善扰动观测法 MPPT 系统的光强突变响应性能提供了重要依据.

参考文献

- [1] Femia N, Granozio D, Petrone G, et al. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 934 - 950.
- [2] Zhao Z M, Chen J, Sun X Y. Maximum Power Point Tracking Technology for Photovoltaic Power Generation[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [3] Liu F R, Duan S X, 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.
- [4] Jiang Y C, Jaber A. Adaptive step size with adaptive-perturbation-frequency digital MPPT controller for a single-sensor photovoltaic solar system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(7): 3195 - 3205.
- [5] Leyva R, Alonso C, Queinnec I, et al. MPPT of photovoltaic systems using extremum-seeking control[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 249 - 258.
- [6] Kobayashi K, Matsuo H, Sekine Y. An excellent operating point tracker of the solar-cell power supply system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 495 - 499.
- [7] Seok-II G, Seon-Ju A, Joon-Ho C, et al. Simulation and analysis of existing MPPT control methods in a PV generation system [J]. Journal of International Council on Electrical Engineering, 2011, 1(4): 446 - 451.
- [8] Bratcu A I, Munteanu I, Bacha S, et al. Cascaded DC-DC con-

verter photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 403 – 411.

- [9] Yazdani A, Dash P P. A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic system interfaced with a distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 589 – 594.
- [10] Giovanni P, Giovanni S, Remus T, et al. Reliability issues in photovoltaic power processing systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2569 – 2580.
- [11] Dezso S, Remus T, Jochen H, et al. Optimized maximum power point tracker for fast-changing environmental conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2629 – 2637.
- [12] Mario F, Alessandro G, Giovanni P, et al. Maximum power point tracking in a one-cycle-controlled single-stage photovoltaic inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2684 – 2693.
- [13] Nicola F, Gianpaolo L, Giovanni P, et al. Distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: novel approach and system analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2610 – 2621.

作者简介



倪 雨(通讯作者) 男, 1978 年 4 月生于四川成都, 工学博士, 现为成都信息工程学院控制工程学院副教授, 研究方向为开关 DC-DC 变换器电路拓扑及滑模控制技术.

E-mail: niyuheiger@163.com



郝帅翔 男, 1988 年 3 月生于河北石家庄. 工学学士, 2013 年毕业于成都信息工程学院控制工程学院电气工程及其自动化专业.

E-mail: 1276306896@qq.com