

基于离散时间纹波控制的太阳能最大功率点跟踪算法

刘圣波, 刘 贺, 赵燕东*

(北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 为了提高光伏太阳能转换率, 拓展传统纹波控制技术的应用, 该文提出了离散时间纹波控制算法, 通过对纹波控制技术的离散化处理, 将最大功率点跟踪控制问题转换为离散采样-控制问题。以太阳能板输出电压为状态量, 在其处于极大值和极小值时对系统进行采样; 随后采取离散时间纹波控制算法使系统快速追踪到系统的最大功率点。该文在 Simulink 系统中对离散时间纹波控制算法进行了仿真。仿真结果表明, 在 1 000 和 200 W/cm², 25℃ 的条件下, 算法均可以快速准确地追踪到太阳能系统的最大功率点, 追踪精度高达 96%; 在外部环境由 1 000 变为 200 W/cm² 时, 系统能够在 0.1 s 内准确地追踪到新的最大功率点。

关键词: 太阳能, 系统, 跟踪, 算法, 离散纹波控制, 最大功率点

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.016

中图分类号: S214; S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0130-08

刘圣波, 刘 贺, 赵燕东. 基于离散时间纹波控制的太阳能最大功率点跟踪算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 130—137.

Liu Shengbo, Liu He, Zhao Yandong. A solar maximum power point tracking algorithm based on discrete-time ripple correlation control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 130—137. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

随着现代农业生产中新型传感器等设备的出现, 越来越多的设备被安置在田间。由于田间布线十分不便, 设备的电源供给成为一个突出问题^[1-3]。而太阳能基本不受区域限制, 因此, 农业生产中的许多设备适宜使用太阳能提供电力^[4-6]。由于太阳辐射的波动性, 提高光伏太阳能板的转换效率是提高太阳能利用率的关键^[7]。由于替代能源都有严格定义的最大功率点, 在这个点上, 系统可以向外界提供最大的功率输出, 或者具有最高的能量转换效率^[8-9]。通过将系统定位到最大功率点, 可以有效地提高能源利用效率, 为设备提供更持久的电力支持。太阳能最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术, 主要是通过监测太阳能板的输出电压和对应电流, 以达到输出功率最大的目的^[10]。太阳能系统在最大功率点跟踪控制器的控制下, 使得系统始终工作在最大功率点处。目前已经有各种不同的数字和模拟电路方法, 实现对最大功率点的跟

踪^[11-19]。基于模糊控制技术的控制方法^[20-22]控制精度高, 震荡小, 但是需要设计者有丰富的经验; 变步长扰动观察法^[23]改进了传统扰动观察法的一些缺陷, 减小了跟踪时间; 爬山法^[24-25]简单实用, 效率较高, 但是会在最大功率点附近扰动。

本研究针对光伏太阳能板的最大功率控制问题, 设计了基于离散时间纹波控制技术的太阳能最大功率点跟踪算法, 具体研究包括: 将连续系统纹波控制技术离散化, 并提出一种适用于太阳能最大功率点跟踪的纹波控制算法; 构建离散时间纹波控制算法的仿真模型; 利用 Simulink 对系统进行仿真, 验证算法的有效性。

1 离散时间纹波控制技术原理及算法

1.1 光伏太阳能系统中的纹波控制技术

纹波控制技术是一种适用于开关电源转换电路的实时寻优技术, 它通过使用开关过程产生的纹波信息, 控制选定的能量函数 J 达到最优^[26-27]。其中能量函数 J 是系统状态变量 z 的函数。在太阳能最大功率控制系统中, 如果将太阳能板的输出功率作为能量函数 J , 那么通过最大化能量函数即可实现对光伏太阳能板最大功率点的实时追踪。根据太阳能板的功率曲线可知, 输出功率为单峰曲线, 且系统只有一个最大功率点值^[28]。对于能量函数 $J(z)$ 其极值点处有

$$\frac{dJ(z)}{dz} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2013-03-27 修订日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 31371537); 北京市教育委员会共建项目建设计划科学研究与科研基地建设项目(2008BJKY01)

作者简介: 刘圣波(1989—), 男, 江西人, 主要从事智能检测与控制研究。北京 北京林业大学工学院, 100083。Email: circler3@sina.com
*通信作者: 赵燕东(1965—), 女, 山东人, 教授, 博士, 博导, 主要从事智能检测与控制研究。北京 北京林业大学工学院, 100083。

Email: yandongzh@bjfu.edu.cn

能量转换电路的输入为 u , 对于 DC-DC 转换电路 u 为占空比。状态变量的稳态值为

$$\varphi(u) = \lim_{t \rightarrow \infty} z(u, t) \quad (2)$$

根据稳定性要求, 状态变量在最大功率点附近必须具有单调性, 单调性可以保证系统的输入无极性翻转, 通过积分控制规律^[29]

$$u = k \int \frac{dJ}{dz} dt \quad (3)$$

式中, k 的符号决定系统收敛到极大值还是极小值, k 的大小决定系统收敛的速度; 通常 $\frac{dJ}{dz}$ 这种微分形式是无法得到的, 如果给式 (3) 中的积分项乘以一个正项, 系统的平衡点不改变^[30], 将式 (3) 乘以 $(\frac{dz}{dt})^2$ 则有

$$u = k \int \frac{dJ}{dz} \frac{dz}{dt} \frac{dz}{dt} dt = k \int \frac{dJ}{dt} \frac{dz}{dt} dt \quad (4)$$

此控制规律只含有时间的微分项, 在实际电路中很容易获得。其中 $\frac{dz}{dt}$ 不为零。如果 DC-DC 变换器按一定的占空比 D ($0 < D < 1$), 不停的开关, 并且开关周期 $T > 0$, 则电路中电流与电压对时间的微分, 都不为零。

1.2 基于离散时间纹波控制的太阳能最大功率点跟踪算法

纹波控制技术主要应用于模拟电路中, 因为模拟器件功耗较高, 使用数字化的纹波技术非常必要, 同时也便于单片机编程, 通过高频采样, 可以对控制规则离散化^[31-32]。在该系统中, 系统能量函数 P_{panel} 为光伏太阳能板输出功率, W ; 系统的状态变量 U 为系统输出电压, V ; 其中 U 为分段线性, 在 0 到 T 的时间内有

$$\frac{dU}{dt} = \begin{cases} \omega_+ & t \in [0, DT) \\ \omega_- & t \in [DT, T) \end{cases} \quad (5)$$

式中, T 是开关周期, s ; D 为占空比; $\frac{dU}{dt}$ 为电压变化率, V/s ; ω_+ 代表正电压变化率值, V/s ; ω_- 表示负电压变化率值, V/s 。

将式 (5) 代入式 (4), 得到控制量 u 在一个周期内的变化量为

$$\begin{aligned} u(T) &= u(0) + k\omega_+ \int_0^{DT} \frac{dP_{panel}}{dt} dt + k\omega_- \int_{DT}^T \frac{dP_{panel}}{dt} dt = \\ &= u(0) + k\omega_+ [P_{panel}(DT) - P_{panel}(0)] + \\ &\quad k\omega_- [P_{panel}(T) - P_{panel}(DT)] \end{aligned} \quad (6)$$

由系统周期性, 则有

$$\begin{aligned} P_{panel}(0) &= P_{panel}(T) \\ \omega_+ D + \omega_- (1 - D) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

得到离散化的控制规律

$$\begin{aligned} u(T) &= u(0) + \\ &\quad \frac{k\omega_+ D}{1 - D} [P_{panel}(DT) - P_{panel}(0)] \end{aligned}$$

此处, 用能量函数变化的符号代替实际的能量变化, 简化得到

$$u(T) = u(0) + \hat{k} \operatorname{sgn}[P_{panel}(DT) - P_{panel}(0)] \quad (8)$$

式中, \hat{k} 为需要调整的电压值, V 。此规则通过检测能量函数变化的符号来调整控制量, 在系统稳态下不仅有 $u(T) = u(0)$ 和 $P_{panel}(0) = P_{panel}(T)$ 。同时能量函数 P_{panel} 还会在控制量 u 的控制下收敛到最优控制点处, 此时有

$$P_{panel}(DT) = P_{panel}(0) = P_{panel}(T) \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 周期内 DT 时刻与起始时刻输出功率相等时, 系统达到稳态; 由于控制信号在这 2 个时刻发生切换, 根据式 (5) 可知, 2 个时刻恰好为电压极值点; 因此, 对电压极值点时刻进行功率采样, 即可判断系统是否到达最大功率点。实际操作时, 可以保持 u 在 nT 个周期内不变, 然后根据 J 在同一个周期内的 2 个极值点处的采样值之差, 更新 u 的值, 其控制规律如下式

$$\begin{aligned} D(t_0 + nT) &= \\ D(t_0) + \hat{k} \operatorname{sgn}[P_{panel}(t_0 + (n-1+D)T) - & \\ P_{panel}(t_0 + (n-1)T)] & \end{aligned} \quad (10)$$

此控制策略的核心在于, 使系统收敛到最大功率点所需要的信息, 可以通过同一周期内的 2 次采样值获得, 2 次采样分别是在状态变量 z 最大和最小时进行的, 在平衡点处, J 可以以 2 倍开关频率通过最大功率点。

2 基于离散时间纹波控制的太阳能最大功率跟踪系统仿真平台

本文提出了基于离散时间纹波控制的最大功率算法, 使用电路中固有的电压及电流的纹波信息, 通过对功率在同一周期内 2 点的采样值, 确定占空比改变的方向, 使系统自动追踪到最大功率点。太阳能最大功率跟踪系统的结构如图 1 所示。系统主要由三部分组成, 分别为太阳能电池板模块, DC-DC 变换电路模块及最大功率控制算法模块。这里主要介绍最大功率算法控制模块, 该模块包括由 S 函数编写的离散纹波控制器、由触发子系统构成的纹波采样器, 以及将控制器输出变为 PWM 波的 PWM 生成器。

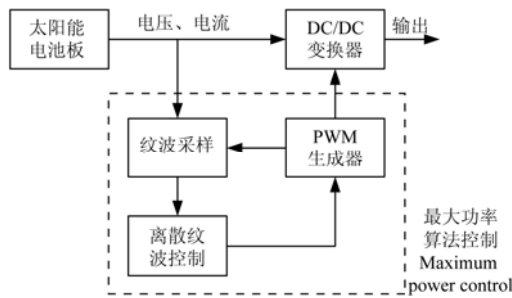


图1 基于离散时间纹波控制算法的最大功率点跟踪系统

Fig.1 Maximum power point tracking system based on discrete time ripple correlation control algorithm

控制器使用基于离散时间纹波控制算法实现对太阳能系统的最大功率点跟踪,其输入为系统中太阳能电池板的输出电流及电压,其输出为计算得到的占空比数值,该数值经PWM发生器,转换为相应的PWM波,控制DC-DC变换电路,实现对电压及电流的调节。控制器的采样频率为1 kHz,由S函数的采样时间决定。纹波信号的采样由PWM波控制触发子系统进行,触发子系统模块由Simulink提供。将太阳能电池板的电压及电流作为该系统的输入,PWM发生器的输出作为其采样控制信号,PWM波的频率为10 kHz。在每个PWM周期内,都会对纹波信号进行采集,采集的样本点

分别在PWM信号发生切换的时刻。由于S函数的采样时间为PWM波信号频率的10倍,相当于占空比在10个周期内保持不变,然后S函数根据 P_{panel} 在同一个周期内的2次采样值之差,更新占空比 D 的值,其控制规律如式(11)

$$D(t_0 + nT) = D(t_0) + 0.01 \operatorname{sgn}[P_{panel}(t_0 + (n-1)T) - P_{panel}(t_0 + (n-1)T)] \quad (11)$$

其中, $n=10$,由触发子系统对太阳能电池板的输出电压和电流进行采样,在同一周期内的2次采样分别是在状态变量 U 最大和最小时进行的,将采样到的太阳能电池板输出电压和电流信号输送到S函数控制器模块,根据式(11)的控制规律计算出下一时刻需要的占空比值。其示意如图2所示。

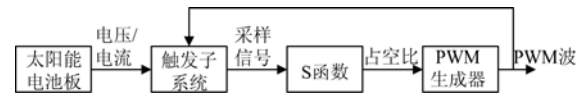


图2 触发采样子系统

Fig.2 Triggered sampling subsystem

根据上述分析建立Simulink仿真模型,本文使用的Simulink仿真模型如图3所示。

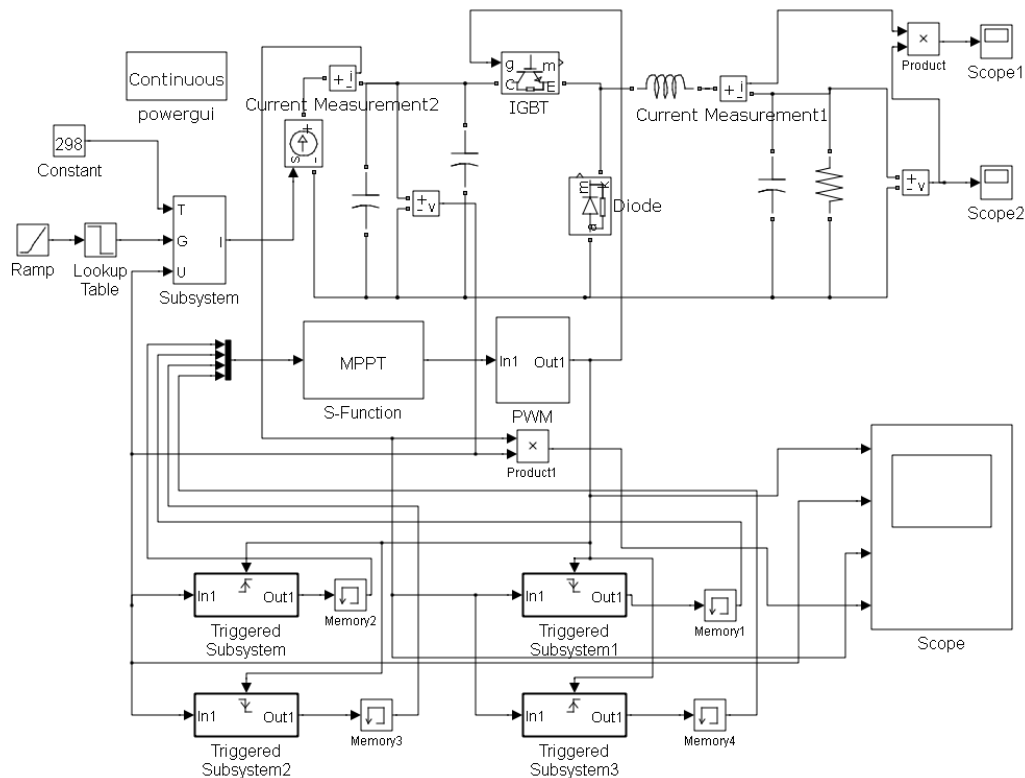


图3 仿真模型图

Fig.3 Simulink model

3 仿真结果与分析

运行仿真平台，对基于离散时间纹波控制的跟踪算法进行仿真，验证本文所提出算法的可行性，观察其追踪效果。

3.1 纹波信息与最大功率点位置

太阳能板电压受占空比控制，是占空比的单调函数；而太阳能板功率与电压关系如图 4 所示。

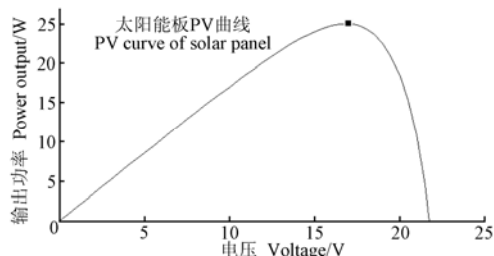
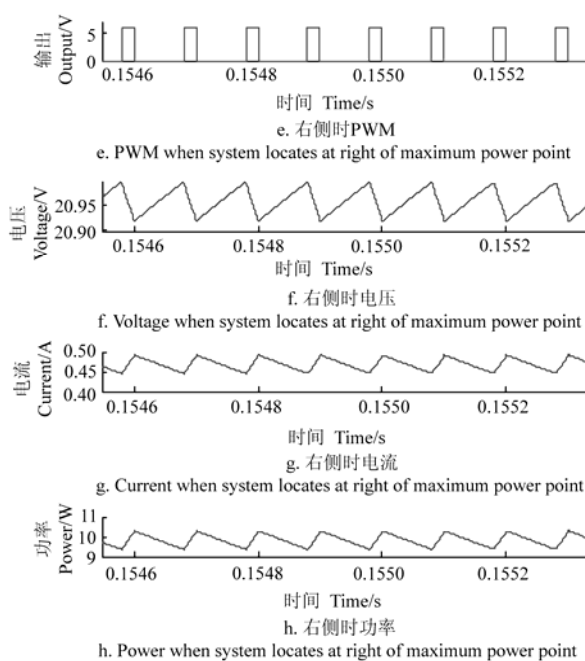
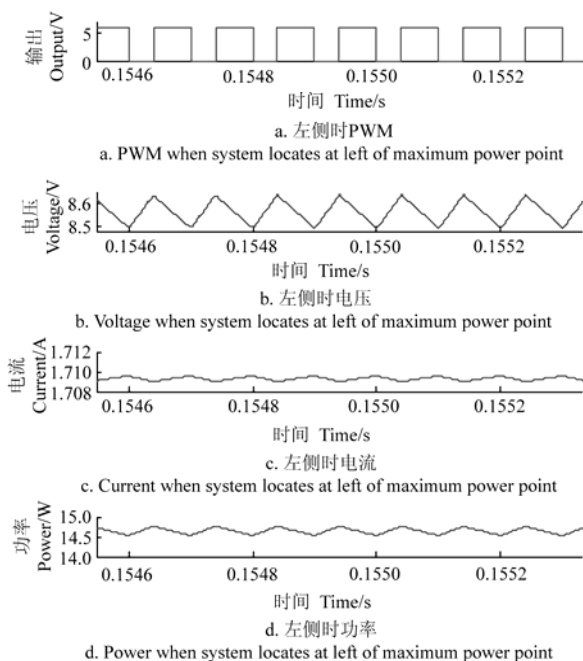


图 4 占空比与最大功率点位置的关系

Fig.4 Relationship of duty cycle and maximum power point

对 MPPT 系统的采样过程如图 5 所示，以太阳



注：图 a~d 占空比为 0.4，图 e~h 占空比为 0.8。

Note: Figures a~d have a duty ratio of 0.4. Figures e~h have a duty ratio of 0.8.

图 5 系统处于最大功率点左侧和右侧时波形

Fig.5 System output at left and right of maximum power point

图 6 中太阳能系统工作在最大功率点处，瞬时功率在一个开关周期内 2 次通过最大功率点，一次在电流增加时，一次在电流减少时。此时太阳能系统输出的最大功率与 DC-DC 变换电路中的纹波大小有关。

3.2 不同环境条件下离散时间纹波控制最大功率跟踪

设置太阳能电池板仿真模块在标准测试环境下的参数为：最大功率点电压为 17 V，最大输出功

能板的输出电压 U_{panel} 为状态变量，同时测量的还有太阳能板的输出电流 I_{panel} ，计算太阳能板的输出功率 $P_{panel}=I_{panel}U_{panel}$ 。

图 5a~图 5d 中，设置占空比为 0.4，太阳能光伏系统的输出电压小于最大功率点电压，系统工作点在最大功率点得左侧，此时太阳能电池板的功率纹波相位与太阳能电池板电压的纹波相位一致，在 2 个采样点得到的功率差值符号为正，采用式 (10) 的控制算法更新占空比，使得占空比增加，从而增大太阳能电池板的输出电压，使得系统工作点向最大功率点方向移动。

而在图 5e~图 5h 中，将占空比设置为 0.8，此时光伏系统的输出电压大于最大功率点电压，工作点在最大功率点的右侧，太阳能电池板的功率纹波相位与太阳能电池板电压的纹波相位刚好反向，在 2 个采样点得到的功率差值符号为负，采用式 (10) 的控制算法更新占空比，将会使得占空比减小，从而减小太阳能电池板的输出电压，同样会使得系统工作点向最大功率点方向移动。

率 25.7 W。太阳能最大功率跟踪系统的标准环境为光照强度 $1\,000\text{ W/cm}^2$ ，温度 25°C ，得到此时太阳能系统的最大功率追踪曲线，如图 7 所示。

由图 7 可以看出，经过最大功率点跟踪控制器的控制，太阳能电池板的输出功率最终稳定在 24.8 W，其输出电压稳定在 17 V，输出电流稳定在 1.46 A。追踪到的标准测试环境下的最大功率点与设定的太阳能最大功率点高度吻合，追踪精度高达

96%。同等条件下,使用爬山法仿真,结果如图 8 所示,功率稳定在 23.9 W,精度为 93%。可见,本文设计的基于离散时间纹波控制的功率跟踪控制算法可以实现对太阳能光伏系统进行快速准确地最大功率点跟踪。

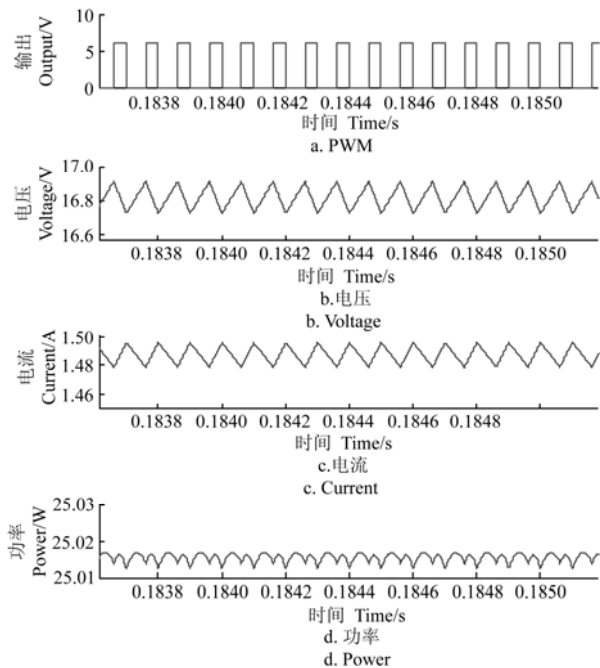
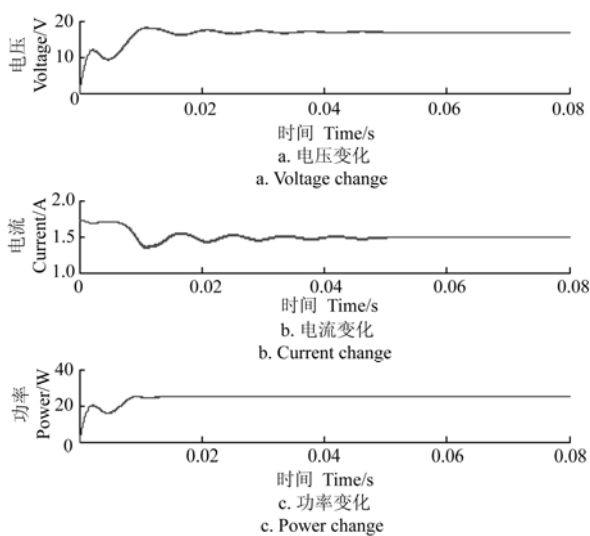


图 6 系统在最大功率点处波形

Fig.6 System output at maximum power point



注: 温度 25℃。

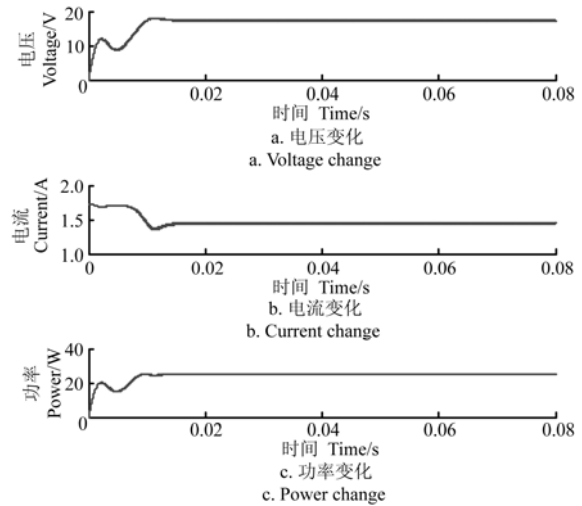
Note: Temperature is 25℃.

图 7 基于离散时间纹波控制的太阳能系统的最大功率跟踪曲线 (光照强度 1 000 W/cm²)

Fig.7 Waveforms for tracking maximum power point based on discrete time ripple correlation control (Light intensity 1 000 W/cm²)

当光照强度为 200 W/cm², 温度为 25℃时, 基于离散时间纹波控制的太阳能系统的功率跟踪曲线, 如图 9 所示。

由图 9 可以发现, 经最大功率跟踪控制, 系统经过 0.22 s 达到稳定, 太阳能电池板的输出电压仍然稳定在 17 V 左右, 而太阳能电池的输出电流明显下降, 只有 0.3 A, 其输出最大功率只有 5 W。这是由于, 太阳能电池板的光电流大小主要受到光照强度的影响, 当光照强度明显下降时, 其最大功率点电流明显下降, 而最大功率点电压则无太大变化。

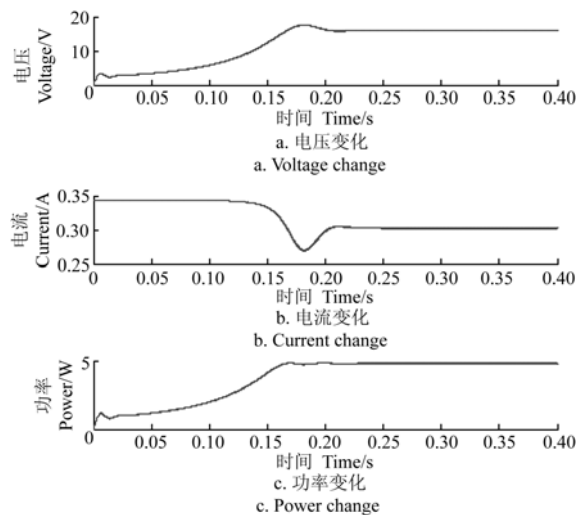


注: 温度 25℃。

Note: Temperature is 25℃.

图 8 基于爬山法的太阳能系统的最大功率跟踪曲线 (光照强度 1 000 W/cm²)

Fig.8 Waveforms for tracking maximum power point based on climbing method (Light intensity 1 000 W/cm²)



注: 温度 25℃。

Note: Temperature is 25℃.

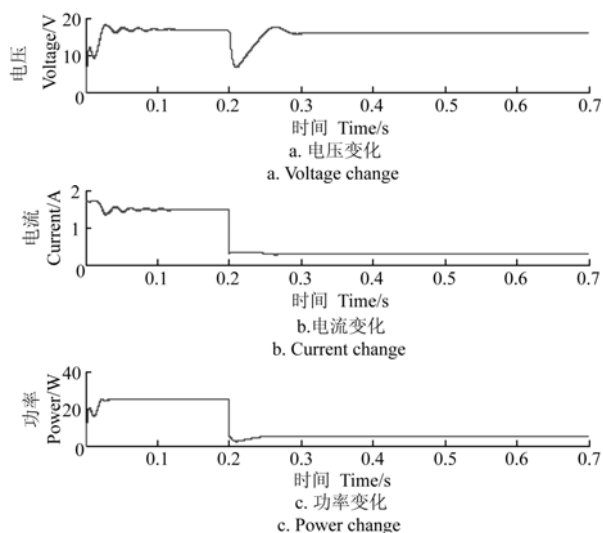
图 9 基于离散时间纹波控制的太阳能系统的最大功率跟踪曲线 (光照强度 200 W/cm²)

Fig.9 Waveforms for tracking maximum power point based on discrete time ripple correlation control (Light intensity 200 W/cm²)

3.3 外部环境变化时离散时间纹波控制最大功率跟踪

在实际环境中, 外界环境处在不断的变化之

中, 最大功率算法必须可以在外界环境发生变化时, 迅速准确地跟踪到新的最大功率点。为了验证环境变化时算法的跟踪效果, 首先设置在 0.2 s 内, 光照强度在 $1\,000\text{ W/cm}^2$, 温度 25°C , 在 0.2 s 时, 环境参数变化到 200 W/cm^2 , 温度 25°C , 此时太阳能系统的仿真波形如图 10 所示。



注: 在 0.2 s 内, 光照强度为 $1\,000\text{ W/cm}^2$, 温度 25°C , 0.2 s 后变化为 200 W/cm^2 , 温度 25°C 。

Note: During the initial 0.2 s, light intensity is 200 W/cm^2 and temperature is 25°C . Light intensity changes to $1\,000\text{ W/cm}^2$ at 0.2 s and temperature is 25°C .

图 10 基于离散时间纹波控制的太阳能系统的最大功率追踪曲线 (从 $1\,000$ 到 200 W/cm^2)

Fig.10 Waveforms for tracking maximum power point based on discrete time ripple control(From $1\,000$ to 200 W/cm^2)

图 10 反映了在追踪系统最大功率点的过程中, 系统的占空比、太阳能电池电压、电流及功率随时间的变化曲线, 4 个参数都很快的收敛到了系统的最大功率点处。在 0.2 s 时光照强度发生突变, 系统在最大功率控制器的控制下, 经过 0.1 s 的调节, 重新又达到了新的最大功率点。可见, 当外界环境参数发生变化时, 本文提出的最大功率跟踪算法, 可以迅速准确的跟踪到新的最大功率点。

4 结 论

本文提出了一种基于离散时间纹波控制技术的最大功率跟踪算法, 并在 Simulink 系统中构建了基于该算法的最大功率点跟踪系统。系统通过在 $1\,000$ 和 200 W/cm^2 , 25°C 的仿真环境下测试, 检验了跟踪算法的有效性。仿真试验结果表明, 在光照强度 $1\,000\text{ W/cm}^2$, 温度 25°C 时, 系统反应迅速, 能够在 0.2 s 内跟踪到最大功率点, 跟踪精度达到 96%; 光照强度为 200 W/cm^2 时, 调节时间约为 0.22s; 光强由 $1\,000\text{ W/cm}^2$ 变化为 200 W/cm^2 后, 系统仅经过 0.1 s 就又调节到新的最大功率点。由此

可见, 该算法能够快速准确地对太阳能系统最大功率点进行追踪。

[参 考 文 献]

- [1] 洪添胜, 杨洲, 宋淑然, 等. 柑橘生产机械化研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 105—110.
Hong Tiansheng, Yang Zhou, Song Shuran, et al. Mechanization of citrus production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 105—110. (in Chinese with English abstract)
- [2] 洪添胜, 苏建, 朱余清, 等. 山地果园链式循环货运索道的设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 105—110.
Hong Tiansheng, Su Jian, Zhu Yuqing, et al. Design of circular chain ropeway for cargo transportation in mountain orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 105—110. (in Chinese with English abstract)
- [3] 文韬, 洪添胜, 苏建, 等. 山地果园链式循环货运索道张紧检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 55—60.
Wen Tao, Hong Tiansheng, Su Jian, et al. Design and testing of tension detection system on circular chain carrier ropeway in mountain orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 55—60. (in Chinese with English abstract)
- [4] 班婷, 朱明, 王海. 太阳能集热器的研制及结构优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 277—281.
Ban Ting, Zhu Ming, Wang Hai. Design and structural optimization of flat-plate solar air collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Suppl.1): 277—281. (in Chinese with English abstract)
- [5] 宋卫堂, 姚珑璐, 丁涛, 等. 气-气换热器对太阳能再生装置性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 278—282.
Song Weitang, Yao Longlu, Ding Tao, et al. Effects of gas-gas heat exchanger on improving the performance of solar regenerator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 278—282. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李明, 郑士逢, 季旭, 等. 立面阳台式太阳能热水器的性能特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 228—232.
Li Ming, Zheng Tufeng, Ji Xu, et al. Performance of façade balcony type solar water heaters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(10): 228—232. (in Chinese with English abstract)
- [7] 欧阳名三, 余世杰, 沈玉梁, 等. 具有最大功率点跟踪功能的户用光伏充电系统的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 272—275.
Ouyang Mingsan, Yu Shijie, Shen Yuliang, et al. Research of domestic photovoltaic charging system with maximum power point tracing(MPPT)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 272—275. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李炜, 朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(6): 239—243.
Li Wei, Zhu Xinjian. The maximum power point tracking control of a photovoltaic power system[J]. Computer Simulation, 2006, 23(6): 239—243. (in Chinese with English abstract)
- [9] 文韬, 洪添胜, 李震, 等. 太阳能硅光电池最大功率点跟踪算法的仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2012,

- 28(1): 196—201.
Wen Tao, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Test and simulation of solar silicon battery tracking algorithm based on maximum power point[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 196—201. (in Chinese with English abstract)
- [10] 潘建. 光伏电池最大功率点跟踪控制研究[J]. 电子技术, 2011, 38(9): 87—88.
Pan Jian. Control strategy of maximum power point tracking of pv cells[J]. Electronic Technology, 2011, 38(9): 87—88. (in Chinese with English abstract)
- [11] 钱嘉怡, 朱东柏, 王梓. 光伏系统 MPPT 控制方法研究[J]. 价值工程, 2011, 30(10): 157—158.
Qian Jiayi, Zhu Dongbai, Wang Zi. Research on maximum power point tracking in photovoltaic system[J]. Value Engineering, 2011, 30(10): 157—158. (in Chinese with English abstract)
- [12] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248—1251.
Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui. Versatile matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248—1251. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴大中, 王晓伟. 一种光伏 MPPT 模糊控制算法研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 808—813.
Wu Dazhong, Wang Xiaowei. A photovoltaic MPPT fuzzy controlling algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(6): 808—813. (in Chinese with English abstract)
- [14] 孙冠群, 孟庆海, 王斌锐, 等. 基于最大功率点与最小损耗点跟踪的光伏水泵系统效率优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 61—70.
Sun Guanqun, Meng Qinghai, Wang Binrui, et al. Efficiency optimization of stand-alone photovoltaic pumping system based on MPPT and MLPT[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(11): 61—70. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王雨, 胡仁杰. 基于 MATLAB 的光伏模块输出特性及 MPPT 的建模与仿真[J]. 半导体光电, 2012, 33(1): 18—21.
Wang Yu, Hu Renjie. Modeling and simulation of PV module output characteristics and MPPT based on MATLAB[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(1): 18—21. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘立群, 王志新. PV 系统的变电压 MPPT 算法及仿真[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 140—141.
Liu Liqun, Wang Zhixin. Variable-Voltage MPPT algorithm and simulation of photovoltaic system[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(2): 140—141. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张强, 任小永, 陈乾宏, 等. 基于 Fibonacci 数列的 MPPT 仿真与初步实验[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 28—29.
Zhang Qiang, Ren Xiaoyong, Chen Qianhong, et al. MPPT simulation and preliminary experiment based on Fibonacci numbers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 28—29. (in Chinese with English abstract)
- [18] 何人望, 邱万英, 吴迅, 等. 基于 PSIM 的新型扰动观察法的 MPPT 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 56—59.
He Renwang, Qiu Wanying, Wu Xun, et al. Simulation study of new perturbation and observation method in MPPT based on PSIM[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 56—59. (in Chinese with English abstract)
- [19] 彭志辉, 和军平, 马光, 等. 光伏发电系统 MPPT 输出功率采样周期的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 24—28.
Peng Zhihui, He Junping, Ma Guang, et al. Sampling period optimization design of output power of photovoltaic power generation MPPT systems[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(34): 24—28. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王飞, 李军红, 李先祥. 基于模糊参数自整定数字 PID 控制的光伏最大功率点跟踪技术研究[J]. 低压电器, 2011(16): 30—34.
Wang Fei, Li Junhong, Li Xianxiang. Study of maximum power point tracking technology based on fuzzy parameters self-tuning digital PID control[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(16): 30—34. (in Chinese with English abstract)
- [21] 吴海涛, 孙以泽, 孟焯. 粒子群优化模糊控制器在光伏发电系统最大功率跟踪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 52—57.
Wu Haitao, Sun Yize, Meng Chuo. Application of fuzzy controller with particle swarm optimization algorithm to maximum power point tracking of photovoltaic generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 52—57. (in Chinese with English abstract)
- [22] 邹学毅, 朱学忠. 变结构参数模糊控制在光伏发电最大功率点跟踪中的应用[J]. 低压电器, 2011(22): 23—26.
Zou Xueyi, Zhu Xuezhong. Maximum power point tracking by using variable parameters fuzzy control for photovoltaic generation system[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(22): 23—26. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王义飞, 吴伟, 张峰华, 等. 改进型变步长光伏最大功率点快速跟踪[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2011, 17(3): 249—252.
Wang Yifei, Wu Wei, Zhang Haohua, et al. Modified variable step algorithm of maximum power point tracking for photovoltaic system[J]. Journal of Shanghai University: Natural Science Edition, 2011, 17(3): 249—252. (in Chinese with English abstract)
- [24] 罗隆福, 李鑫, 李芬芬. 光伏系统最大功率点跟踪算法的改进及应用[J]. 电力电子技术, 2011, 45(4): 1—3.
Luo Longfu, Li Xin, Li Fenfen. An improved method of tracking the maximum power point for photovoltaic system and application[J]. Power Electronics, 2011, 45(4): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王丽萍, 张建成. 光伏电池最大功率点跟踪控制方法的对比研究及改进[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(2): 52—55.
Wang Liping, Zhang Jiancheng. Comparative research and improvement of PV maximum power point tracking control methods[J]. Advances of power system and hydroelectric engineering, 2011, 27(2): 52—55. (in Chinese with English abstract)
- [26] Balog R, Krein P T. Automatic tuning of coupled inductor filters[C]// Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2002: 591—596.
- [27] Logue D L, Krein P T. Optimization of power electronic systems using ripple correlation control: A dynamic

- programming approach[C]// Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2001: 459—464.
- [28] Jain S, Agarwal V. Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(5): 753—762.
- [29] Benavides N D, Esum T, Chapman P L. Ripple correlation control of a multiple-input DC-DC converter[C]// Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2005: 160—164.
- [30] Esum T, Kimball J W, Krein P, et al. Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1282—1291.
- [31] Bazzi A M, Krein P T. Concerning "Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum seeking control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(6): 1611—1612.
- [32] Kimball J W, Krein P T. Discrete-time ripple correlation control for maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2353—2362.

A solar maximum power point tracking algorithm based on discrete-time ripple correlation control

Liu Shengbo, Liu He, Zhao Yandong^{*}

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Solar photovoltaic technology has been widely used in modern agriculture. Due to the volatility of solar power, it is hard to maximize the use of solar energy. In order to seek a way to improve the conversion rate of photovoltaic solar panels, this paper developed a new algorithm to utilize solar energy more efficiently. Since tracking solar maximum power point is a valid method to maintain the solar panel power output at a high level, at this paper, we choose ripple correlation control (RCC) to keep tracking the maximum power point of a solar photovoltaic (PV) system. Ripple correlation control is a real-time optimal method particularly suitable for power convertor control. The objective of RCC in solar PV system is to maximize the energy quantity. This paper extended the traditional analog RCC technique to the digital domain. With discretization and simplifications of math model, the RCC method can be transformed to a sampling problem. The control method shows that when the solar PV system reaches the maximum power point, power outputs at both maximum and minimum state should be nearly the same. Moreover, since voltage output of a system is easy to observe and directly related to power output, it is ideally appropriate for sampling and analysis. Setting the output voltage as status variable, the discrete-time RCC (DRCC) algorithm can track the optimal operating point quickly via sampling at maximum and minimum voltage moments. A DRCC Simulink model of the maximum power point tracking (MPPT) system was built in the paper. The model consists of three parts: solar PV panel module, DC-DC convertor and control module. In the control module, ripple sampler is built with trigger subsystem to get output information (voltage and current). Controller is implemented with S-function. After S-function adopts the voltage and current information, it will calculate the power difference and output duty ratio signal. The output of the controller is transformed to PWM wave to adjust the system power output. Voltage of solar PV panel is controlled by duty ratio via DC-DC convertor. When the system works at non-maximal power point, difference of power outputs at two sample points can refresh the duty ratio to make the voltage change, and finally take effects on the power output. The proposed algorithm was realized and testified in Simulink system. In the simulation, voltage of solar PV system at maximum power point was set to 17V and maximum power output is set to 25.7W. In an environment of 1000 W/cm² and 25°C, output of the whole system finally reached a stable state of 17V and 24.8W. Power tracking accuracy was up to 96%. Under the same condition, we used mountain climbing tracking technique to run the simulation. The system power output came to 23.9W in the end, which achieved an accuracy of 93%. Another simulation was conducted by changing the environment parameter to 200 W/cm², 25°C. The control model can also track the maximum power point. In the dynamic light intensity test which light intensity varied from 1000W/cm² to 200W/cm² at 0.2s during simulation, the system was able to track new maximum power point within 0.1s. The results indicated that the algorithm is capable for fast MPPT under the conditions of 1000W/cm² and 200W/cm², 25°C.

Key words: solar energy, systems, tracking, algorithms, discrete time ripple correlation control, maximum power point

(责任编辑: 张俊芳)