

一种 VWP 分段模糊控制的光伏系统 MPPT 方法

李绍武, 高宪文, 冯玉昌

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 当天气情况快速变化时, 如何同时优化光伏 (photovoltaic, PV) 系统在最大功率跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 控制中的快速性、准确性和平稳性目前仍是一个难题. 针对这一问题, 提出了一种可变天气参数 (variable weather parameter, VWP) 分段模糊 MPPT 方法. 该方法采用两条 VWP 直线将输出功率曲线分为三个跟踪区域, 每个区域采用一个模糊控制器进行控制, 其总体控制决策为: 在控制量远离理想最大功率点 (maximum power point, MPP) 时采用大步长以确保跟踪的快速性, 在控制量接近 MPP 时采用小步长以确保跟踪的准确性和平稳性. 仿真实验证明, 该控制方法比传统扰动观察法具有更好的快速性、准确性和平稳性.

关 键 词: 光伏系统; 模糊控制; 最大功率跟踪; 可变天气参数; 分段控制

中图分类号: TM 615

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)08-1065-05

A VWP-Section Fuzzy MPPT Method for PV Systems

LI Shao-wu, GAO Xian-wen, FENG Yu-chang

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GAO Xian-wen, professor, E-mail: gaioxianwen@mail.neu.edu.cn)

Abstract: It is difficult to simultaneously optimize the maximum power point tracking (MPPT) of the photovoltaic (PV) systems under the criteria of rapidity, accuracy and placidity, when the weather varies quickly. Aimed at solving this problem, a fuzzy MPPT method combined with variable weather parameters (VWP) is proposed. In this method, the power curve of the output signal is divided into three sections by the two VWP straight lines and each section has one fuzzy controller for tracking control. The overall control strategy is that a big tracking step-size is selected to ensure the MPPT rapidity when the control signal is far from its ideal value at maximum power point (MPP), while a small tracking step-size is used to ensure the MPPT accuracy and placidity. Simulation experiments verify that the method proposed outperforms the conventional perturbation and observation (P & O) method in rapidity, accuracy and placidity.

Key words: PV generation system; fuzzy logic control; maximum power point tracking (MPPT); variable weather parameter (VWP); sectional control

目前, 提高光伏系统能源利用效率的最大功率跟踪 (MPPT) 方法主要包括: 扰动观察法^[1]、电导增量法^[2]、模糊控制法^[3]、神经网络法^[4]、可变天气参数 (VWP) 法^[5-6] 等. 其中, 扰动观察法和电导增量法应用最广泛. 但这些控制方法均有缺陷: 扰动观察法的快速性和平稳性差, 普通模糊控制法的快速性、准确性和平稳性之间难以兼顾, VWP 法跟踪速度最快但准确性欠缺. 本文在此背景下将 VWP 法和模糊智能算法^[7-8] 相结合, 提

出了一种 VWP 分段模糊 MPPT 方法, 以期实现 MPPT 过程中快速性、准确性和平稳性方面的同时优化.

1 光伏系统数学模型

光伏系统的一般结构如图 1 所示: DC/DC 转换器连接在光伏阵列与负载或逆变器之间以实现 MPPT 控制. 根据接入的 DC/DC 转换器类型, 光

收稿日期: 2014-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61034005).

作者简介: 李绍武 (1979-), 男, 湖北恩施人, 东北大学博士研究生; 高宪文 (1955-), 男, 辽宁盘锦人, 东北大学教授, 博士生导师.

伏系统结构又可再分为 PV-buck, PV-boost 和 PV-buck/boost 三种拓扑结构. 在这三种光伏系统中, 仅 PV-buck/boost 拓扑始终能实现 MPPT 控制而不受外界条件影响, 因此本文选用这一结构的光伏系统为研究对象, 其结构如图 2 所示. 其中 V, I, V_o, I_o 和 R_L 分别表示光伏电池的电压、电流、DC/DC 转换器的输出电压、电流和负载电阻.



图 1 普通光伏发电系统结构

Fig. 1 Structure of typical PV generation system

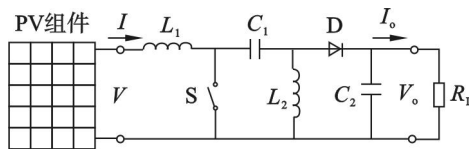


图 2 PV-buck/boost 拓扑的光伏发电系统结构

Fig. 2 Structure of PV system with PV-buck/boost topology

对于光伏电池, 根据文献[9]和文献[10]可得出它的简化数学模型:

$$I = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{V}{C_2 V_{oc}}} - 1)] \quad (1)$$

式中: $C_1 = (1 - I_m/I_{sc}) \exp(-V_m/C_2 V_{oc})$; $C_2 = (V_m/V_{oc} - 1)/\ln(1 - I_m/I_{sc})$; I_{sc}, V_{oc}, I_m 和 V_m 为标准测试条件下(辐照度 1000 W/m^2 , 温度 25°C)生产商提供的光伏电池参数, 分别表示短路电流、开路电压、最大功率点处电流和电压.

对于 buck/boost 型 DC/DC 转换器, 假设电路为理想电路且电容和电感值足够大, 根据图 2 有式(2)~式(4)成立. 其中 P_o 和 D 分别表示光伏系统的输出功率和 buck/boost 电路 PWM 波(开关控制信号)占空比.

$$V_o = \frac{D}{1-D} V, \quad (2)$$

$$VI = V_o I_o, \quad (3)$$

$$P_o = V_o I_o = V_o^2 / R_L. \quad (4)$$

根据式(1)~式(4)可得

$$P_o = \frac{R_L}{D^2} (1-D)^2 I_{sc}^2 [1 - C_1 (e^{\frac{\sqrt{P_o R_L} (1-D)}{C_2 D V_{oc}}} - 1)]^2. \quad (5)$$

式(5)表示了光伏系统输出功率 P_o 与控制信号 D 之间的数学关系, 该方程即为 PV-buck/boost 拓扑的光伏系统在理想情况下的数学模型.

2 VWP 分段模糊 MPPT 控制原理

首先, 为了求取最大功率点处的控制信号, 将

式(5)代入式(6)中:

$$\frac{dP_o}{dD} = 0, \quad (6)$$

有

$$D_{\max} = \frac{\sqrt{P_{o,\max} R_L}}{\sqrt{P_{o,\max} R_L} + C}. \quad (7)$$

式中: $P_{o,\max}$ 和 D_{\max} 分别表示输出功率最大值及其对应的占空比; C 是一个可变天气参数, 其值可由式(8)计算:

$$C = C_2 V_{oc} [\text{lambertw}(e \times (1 + C_1)/C_1) - 1]. \quad (8)$$

式中: $\text{lambertw}(y)$ 表示方程 $x \cdot e^x = y$ 的解.

根据光伏系统数学模型(5)可绘制输出功率与控制信号的 $P-D$ 曲线. 结合 $P-D$ 曲线可得 VWP 分段模糊 MPPT 控制的原理图如图 3 所示. 其中, $P_{o,\max}^*$ 和 $P_{o,\max}$ 分别表示实际和理想的输出功率值; D_{\max}^* 和 D_{\max} 分别表示实际和理想的对应最大功率点处的 PWM 波占空比.

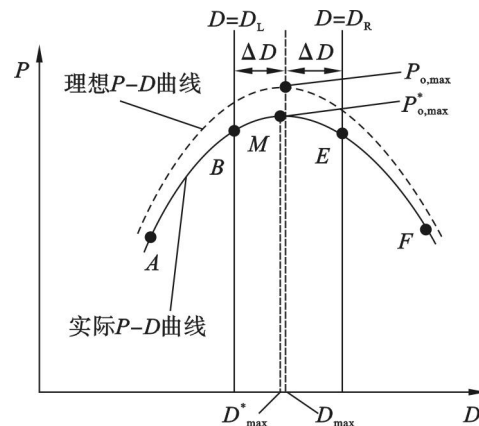


图 3 VWP 分段模糊 MPPT 控制的原理图

Fig. 3 Principle of VWP-section fuzzy MPPT control

根据图 3, 实际的 $P-D$ 曲线被直线 $D = D_L$ 和 $D = D_R$ 分成三段. 其中 D_L 和 D_R 满足式(9), ΔD 表示占空比增量常数且始终大于 0.

$$\left. \begin{aligned} D_L &= D_{\max} - \Delta D, \\ D_R &= D_{\max} + \Delta D. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据文献[5]可知, 参数 $P_{o,\max}$ 和 C 均是可变天气参数(太阳辐照度 S 和光伏电池温度 θ)的函数, 而由式(7)~式(9)确定的直线 $D = D_L$ 和 $D = D_R$ 也会随着外部天气环境的变化而变化, 因此这两条直线可称为 VWP 直线. 为了分析方便, 直线 $D = D_L$ 和 $D = D_R$ 分别称为左 VWP 直线和右 VWP 直线. 在实际 $P-D$ 曲线的三段内, 可采用不同的模糊控制器进行控制, 以同时兼顾 MPPT 跟踪过程的快速性、准确性和平稳性. 根据上述分析, 本文提出的 VWP 分段模糊 MPPT 控

制策略可描述为:在左 VWP 直线左侧,采用模糊控制器 1 进行控制直至在左 VWP 直线处进行切换为止,主要实现 MPPT 控制的快速性;在右 VWP 直线右侧,采用模糊控制器 3 进行控制直至在右 VWP 直线处进行切换为止,主要实现的仍然是 MPPT 控制快速性;在左右 VWP 直线中间采用模糊控制器 2 进行控制,主要实现准确和平稳的 MPPT 跟踪。

区间增量常数 ΔD 可根据实际情况人为设定。 ΔD 过大不能充分提高跟踪的快速性,过小则可能导致控制器之间的切换失败;因此在主控制器设计时必须添加 ΔD 调整环节。设置 ΔD 默认值时,考虑各测量环节误差、光伏系统的局部遮阴等因素并保留一定裕量, ΔD 可选 0.05 至 0.1 之间某一常数。

3 VWP 分段模糊 MPPT 控制的实现

光伏发电系统 VWP 分段模糊 MPPT 控制方法的实现主要包括:VWP 直线的获取,模糊控制器的决策以及整个光伏系统的结构和软件流程。

3.1 VWP 直线的获取

根据文献[5]可知,在标准条件下当光伏电池参数 I_m, I_{sc}, V_m 和 V_{oc} 分别为 8.58 A, 9.19 A, 17.5 V, 22 V 时,理想值 $P_{o,max}$ 和 C 均是天气参数 S 和 θ 的函数且可分别用式(10)和式(11)表示。

$$P_{o,max} = \begin{cases} 2.943 \times 10^{-8} S^3 - 2.992 \times 10^{-5} S^2 + 0.1497 S + 2.664 - 0.045 \theta, & 0 \leq \theta \leq 40; \\ 2.943 \times 10^{-8} S^3 - 2.992 \times 10^{-5} S^2 + 0.1497 S + 2.664, & -20 \leq \theta \leq 0. \end{cases} \quad (10)$$

$$C = 4.62 \times 10^{-6} \times (S - 638.25)^2 + 18.577 - 0.0516 \theta. \quad (11)$$

实际应用中,采用测量装置获取 S, θ 和 R_L 值后,根据式(7)、式(9)~式(11)可确定 VWP 直线。

3.2 模糊控制器的决策

对于三个模糊控制器,均取 PWM 信号的占空比步长作为输出变量。模糊控制器 1 的输入量为理想值 D_{max} 与占空比输出值 D^* 之差 E_1 ;模糊控制器 3 的输入量为占空比输出值 D^* 与理想值 D_{max} 之差 E_3 ;模糊控制器 2 的输入量为输出功率采样值 P_o^* 的变化量 E_2 以及 E_2 的变化量 EC 。

模糊控制器 1 工作于功率点在左 VWP 直线左侧时,其模糊决策为:当 D^* 距离 D_{max} 很远时(如图 3 的 A 点)采用最大占空比正步长;当 D^*

距离 D_{max} 较近时采用较小占空比正步长直到在 B 点切换为止。模糊控制器 3 工作于功率点在右 VWP 直线右侧时,其模糊决策为:当 D^* 距离 D_{max} 很远时(如图 3 的 F 点)采用最大占空比负步长;当 D^* 距离 D_{max} 较近时采用较小占空比负步长直到在 E 点切换为止。模糊控制器 2 的模糊决策为:当功率点在图 3 中 M 点左侧并相对较远时采用小占空比正步长;当功率点在 M 点左侧并距之很近时采用很小小占空比正步长以确保准确性和平稳性;当功率点在 M 点右侧并相对较远时采用小占空比负步长;当功率点在 M 点右侧并距之很近时采用很小小占空比负步长以确保准确性和平稳性;设置一个很小的阈值 ε ,当 $E_2 \leq \varepsilon$ 时停止调整,从而进一步保证跟踪的平稳性。

3.3 系统的结构与流程

为了实现光伏系统的 VWP 分段模糊 MPPT 控制,可采用图 4 所示结构。图中, S, θ, V_o 和 I_o 的实时数据被送入 MPPT 控制器来控制 buck/boost 型 DC/DC 转换器以实现 MPPT。

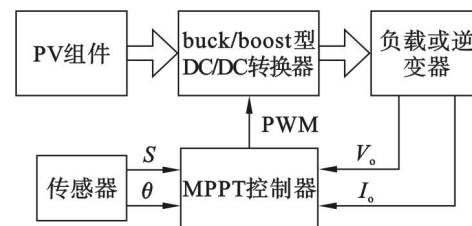


图 4 实现 VWP 分段模糊 MPPT 控制的光伏系统结构
Fig. 4 Structure of PV system with VWP-section fuzzy MPPT control

实际应用中,为节约成本并提高传感器利用率,可将 S 和 θ 这些实时数据同时用于多个光伏发电系统的模糊 MPPT 控制中。

对应图 4 所示电路,可采用图 5 所示主程序流程实现 VWP 分段模糊 MPPT 控制。其中, P_o^* 表示由输出电压、电流采样值计算出的输出功率值,调整 ΔD 环节是防止 ΔD 设置过小造成切换失败。

4 仿真实验及结果分析

为了研究本文提出的 VWP 分段模糊 MPPT 控制策略的输出特性,采用 MATLAB/Simulink 进行仿真实验。实验电路参数:光伏电池模型根据式(1)搭建,其参数与 3.1 节所述相同; buck/boost 电路的开关管采用理想开关,快恢复二极管、电感和电容均为理想元件,其他主要参数及取值见表 1。

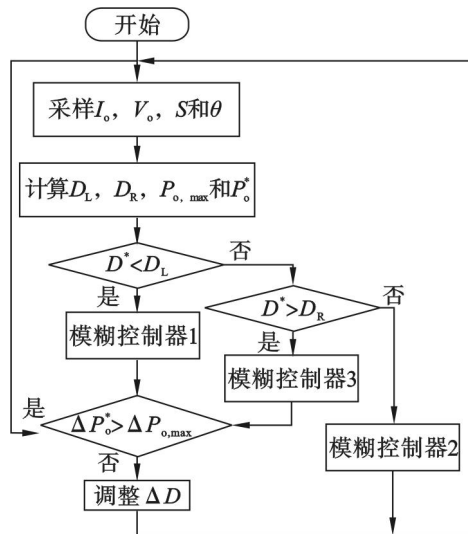


图 5 光伏系统的控制主流程图

Fig. 5 Flow chart of output power control for PV system

表 1 仿真实验主要参数

Table 1 Main parameters in the simulation experiments

参数	参数取值
PWM 波频率/kHz	20
负载电阻 R_L/Ω	10
太阳辐照度 $S/(W \cdot m^{-2})$	500
温度 $\theta/^\circ C$	25
区间增量常数 ΔD	0.050
阈值 ε/W	0.050
P&O 法步长	0.005

根据表 1 的参数值进行仿真实验,可得图 6 和图 7 的实验结果. 其中图 6 显示 VWP 分段模糊 MPPT 控制过程中, E_1 (D_{\max} 与 D^* 之差) 和 D^* 的变化情况;图 7 显示了当系统分别采用本文方法和传统扰动观察法 (P&O 法) 时输出功率的对比曲线. 因为模糊控制器 3 和 1 在控制原理上相同只是控制对象和切换条件不同,故此处不再对模糊控制器 3 进行实验.

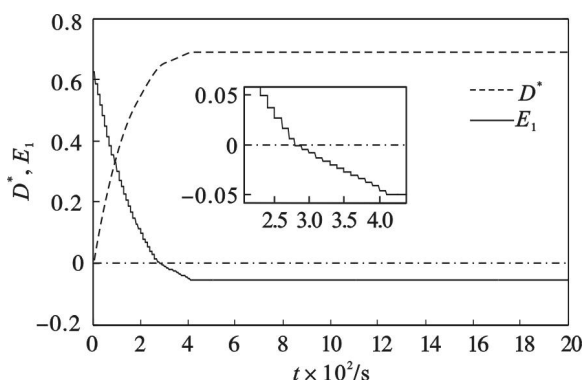


图 6 在 VWP 模糊控制中占空比的变化曲线

Fig. 6 Curves of duty cycle in VWP fuzzy control

图 6 中当 E_1 大于 0 (点划线上方) 时模糊控制器 1 工作,当 E_1 小于 0 (点划线下方) 时模糊控制器 2 工作,两个模糊控制器的切换时刻约在 25.5 ms 处. D^* 的曲线显示了整个 MPPT 控制过程中 buck/boost 电路控制信号的变化情况. 从图 6 的结果可以看出,整个实验过程中光伏系统很好地按照 VWP 分段模糊控制策略实现了 MPPT 控制.

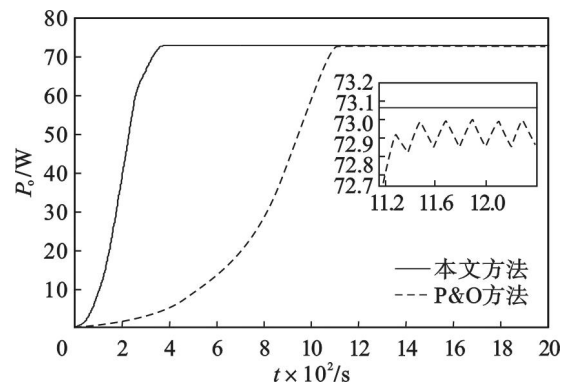


图 7 P&O 法和本文方法的输出功率曲线

Fig. 7 Output power curves of P&O method and the proposed method

由图 7 可以看出:在快速性方面,本文方法和 P&O 法的调节时间分别是 39 ms 和 113 ms;在准确性方面,本文方法和 P&O 法的输出功率分别是 73.06 W 和 72.9 W;在平稳性方面,采用本文方法输出功率没有振荡,而用 P&O 法时输出功率在最大功率点处有轻微振荡. 很明显,本文方法响应更快、离理想值更近且输出更平稳. 为了进一步研究本文方法相对于 P&O 法的准确性,再任意选定一些天气条件进行实验,实验结果如表 2 所示. 表 2 中, $P_{o,max}$, $P_{o,max}^*$ 和 $P_{o,max}^{\delta}$ 分别表示理想输出功率值、VWP 分段模糊 MPPT 法输出功率值和 P&O 法输出功率值.

表 2 准确性实验的结果

Table 2 Results of accuracy experiments

$(S/(W \cdot m^{-2}), \theta/^\circ C)$	$P_{o,max}/W$	$P_{o,max}^*/W$	$P_{o,max}^{\delta}/W$
(500, 10)	73.38	73.36	73.23
(500, 20)	73.24	73.19	73.04
(500, 30)	72.98	72.91	72.61
(800, 10)	117.60	117.59	117.32
(800, 20)	117.44	117.32	117.13
(800, 30)	116.99	116.84	116.12
(1 000, 10)	151.43	151.04	150.09
(1 000, 20)	150.83	150.63	150.01
(1 000, 30)	150.54	150.13	149.55

(下转第 1079 页)