

文章编号:1671-251X(2013)01-0078-06

张明光,李鹏远,谢雯洁,等. MPPT 算法与输入输出反馈线性化控制在光伏发电系统中的应用[J]. 工矿自动化,2013,39(1):78-83.

MPPT 算法与输入输出反馈线性化控制技术在光伏发电系统中的应用

张明光¹, 李鹏远¹, 谢雯洁², 李鹏飞³

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 河南省电力公司平顶山供电公司, 河南 平顶山 467000; 3. 宝丰县电业局, 河南 宝丰 467400)

摘要:针对目前光伏发电系统采用的固定电压法、增量电导法等最大功率点跟踪控制技术跟踪速度慢、精度不佳的问题,提出采用变步长电导增量法进行最大功率点跟踪控制;为了控制光伏系统中电网电流和直流母线电压,采用输入输出反馈线性化控制技术,使得系统的功率因数和直流母线电压可用相同的算法进行控制。在 Matlab/Simulink 环境下对基于变步长电导增量法算法与输入输出反馈线性化控制技术的光伏发电系统进行了建模仿真,结果表明,采用反馈线性化技术控制逆变器后,日照强度和温度变化不会对电网功率因数产生影响;变步长电导增量法提高了光伏发电系统的动态和稳态性能,且降低了电网电流的总谐波失真率。

关键词:光伏发电系统;光伏逆变器;光伏阵列;最大功率点跟踪;MPPT;变步长电导增量法;输入输出反馈线性化

中图分类号:TD60

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Application of MPPT algorithm and input-output feedback linearization control technology in photovoltaic power system

ZHANG Ming-guang¹, LI Peng-yuan¹, XIE Wen-jie², LI Peng-fei³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Pingdingshan Power Supply Company of Henan Electric Power Corporation, Pingdingshan 467000, China; 3. Baofeng Electric Power Bureau, Baofeng 467400, China)

Abstract: In order to solve problems of slow tracking speed and poor accuracy of the maximum power point tracking technology such as fixed voltage method, incremental conductance method and so on used in photovoltaic power system at present, a variable step size incremental conductance algorithm was proposed. For controlling grid current and DC bus voltage of photovoltaic power system, a new method was design by use of input output feedback linearization control technology, which allows control of both power factor and DC bus voltage using the same control algorithm. The model of photovoltaic power system was established and simulated based on the variable step size incremental conductance algorithm and input-output feedback linearization control technology in Matlab/Simulink, and the results showed that using the input-output feedback linearization control technology to control inverter makes changes of solar irradiation and temperature do not affect power factor of power grid, and the variable step size

收稿日期:2012-09-10。

作者简介:张明光(1971-),男,甘肃武威人,教授,研究方向为电力系统自动化、控制理论与控制工程,E-mail: 624650842@qq.com。

incremental conductance improves dynamic and static performances of the photovoltaic power system and reduces the total harmonic distortion of current in the power grid.

Key words: photovoltaic power system; photovoltaic inverter; photovoltaic array; maximum power point tracking; MPPT; variable step size incremental conductance algorithm; input-output feedback linearization

0 引言

光伏阵列可将太阳能转换为电能。光伏阵列具有非线性电源的特点,有独特的最大功率点,且最大功率点会随着天气条件如光照强度和温度等的变化而变化。目前在用的光伏阵列的功率转化效率仍然很低,太阳能电池必须实现最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking,MPPT)控制,以使阵列在任何光照强度和环境温度下都能获得最大功率输出。参考文献[1-3]提出了扰动观察法、固定电压法、电导法增量等 MPPT 技术。这些方法速度慢,精确度低,不能稳定工作于各时期最大功率点,导致光伏系统的输出功率损失,且在简单性、收敛性和硬件实现上也各不相同,总之难以兼顾跟踪的快速性以及系统稳定性两方面的要求。鉴此,本文采用变步长电导增量法进行 MPPT 控制,以提高光伏发电系统的动态和稳态性能。

在并网逆变器控制过程中,必须保证注入电网的电流有较低的总谐波失真率,而且需要控制允许注入电网的无功功率。有关学者提出了许多光伏逆变器控制技术。参考文献[4-5]提出电网电流和直流母线电压的双闭环控制结构和经典的 PI 调节方法,参考文献[6]中采用提前计算好的 PWM 参数,通过在电网电压和逆变器输出电压之间移相来控制电网功率因数。本文采用输入输出反馈线性化控制技术,设计了一种新方法来控制光伏逆变器的功率因数,将逆变器的非线性状态模型在 $d-q$ 坐标系下转换为 2 个线性等效子系统,然后通过极点配置线性控制回路来分别控制电网的功率因数和逆变器直流电压。

1 光伏发电系统描述

通常情况下并网发电系统都为双级结构,第一级是一个 DC/DC 转换器,用于跟踪最大功率点(Maximum Power Point, MPP),第二级是一个 DC/AC 转换器。如果将 MPP 控制直接移到 DC/AC 一侧,则可从系统中去除 DC/DC 转换器,简化系统,提高整体效率并降低成本,这就是单级结构。

光伏发电系统单级并网结构如图 1 所示。该系统由光伏阵列、电容直流环节、三相二电平逆变器和三相电网组成。光伏阵列将太阳能转换为直流电能,直流母线电容器用于减小直流电压在逆变器输入端的高频脉冲,逆变器由 SVPWM 控制。

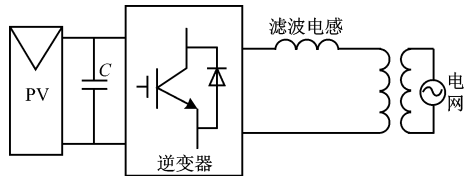


图 1 光伏发电系统单级并网结构

1.1 光伏阵列模型

光伏阵列由若干光伏电池组成,光伏电池的輸出特性方程为

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_p} \tag{1}$$

式中: I_{sc} 为标准测试条件(光照强度为 1 kW/m^2 , 环境温度为 298 K)下测得的光生电流; I_0 为流过二极管的反向饱和漏电流; q 为电荷量, $q = 1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$; R_s 为光伏电池的内阻; A 为二极管的理想常数,其值在 $1 \sim 2$ 之间变化; K 为玻尔兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$; T 为光伏阵列工作时的热力学温度; R_p 为光伏电池的并联电阻。

1.2 MPPT 算法

由于光伏电池的转换效率普遍偏低,光伏发电系统的设计应使光伏阵列实时跟踪 MPP。研究表明,电导增量法在多变的天气条件下可以快速跟踪 MPP。电导增量法基于光伏电池特性曲线在 MPP 处的斜率为零、MPP 左边的斜率为正、MPP 右边的斜率为负的特性,即

$$\begin{cases} dP/dV = 0, & \text{MPP} \\ dP/dV > 0, & \text{MPP 左边} \\ dP/dV < 0, & \text{MPP 右边} \end{cases} \tag{2}$$

$$\text{而} \frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{由此得到瞬}$$

时电导(I/V)和增量电导($\Delta I/\Delta V$)之间的关系。通过比较(I/V)和($\Delta I/\Delta V$)可跟踪 MPP:

$$\begin{cases} \Delta I/\Delta V = -I/V, & \text{MPP} \\ \Delta I/\Delta V > -I/V, & \text{MPP 左边} \\ \Delta I/\Delta V < -I/V, & \text{MPP 右边} \end{cases} \quad (3)$$

输入 MPPT 控制器的被控变量为光伏阵列的电压和电流,通过 MPPT 算法得到的参考电压送至 PWM 控制器,以控制与光伏阵列连接的 DC/DC 或 DC/AC 逆变器。当光照强度发生变化时,MPPT 控制器在预先设定的步长下控制参考电压增加或减小步长,以达到新的最大功率点。

传统的电导增量法采用定步长,追踪步长较大时,对光照变化跟踪速度快,但光伏组件在最大功率点附近的振荡现象严重,导致稳态误差增大;选择较小步长时,振荡现象有所减弱,但对光照变化的跟踪速度变慢。为了克服这些缺陷,本文采用变步长方式^[7],根据工作点位置自动调整步长大小,如果实际工作点远离 MPP,则增加步长以实现快速跟踪;反之步长自动变小以减小震荡。变步长公式为

$$h = \alpha \left| \frac{V_N I_N - V_{N-1} I_{N-1}}{V_N - V_{N-1}} \right| \quad (4)$$

式中: α 为调节步长比例系数; V_N 、 I_N 为光伏阵列在采样时刻 N 的输出电压和电流。

变步长电导增量法程序流程如图 2 所示。

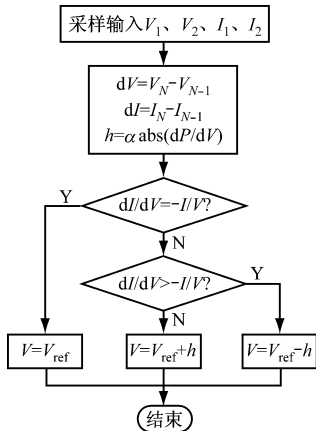


图 2 变步长电导增量法程序流程

1.3 三相逆变器模型

三相逆变器的交流侧部分方程^[8]:

$$\begin{cases} v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ v_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (5)$$

经过 Park 变换,在 $d-p$ 旋转坐标系下得到

$$\begin{cases} v_d = e_d + Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + \omega L i_q \\ v_q = e_q + Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: e_d 、 e_q 、 i_d 、 i_q 、 v_d 、 v_q 分别为电网相电势、相电流和逆变器输出电压经等量变换后的 d 、 q 分量。

忽略逆变器开关的功率损耗,直流输入端和交流输出端的功率平衡关系满足:

$$e_d i_d + e_q i_q = v_{dc} i_{dc} \quad (7)$$

式中: v_{dc} 、 i_{dc} 分别为逆变器的输入电压和电流。

逆变器直流侧满足基尔霍夫定理:

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{pv} - i_{dc} = i_{pv} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{v_{dc}} \quad (8)$$

式中: i_{pv} 为光伏阵列的输出电流。

式(6)和式(8)构成了连接到直流母线和电网的逆变器数学模型。两式可归纳为

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q - \frac{e_d}{L} \\ -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d - \frac{e_q}{L} \\ \frac{i_{pv}}{C} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{C v_{dc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为输入变量, $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T = (v_d, v_q)^T$ 。

令状态向量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T = (i_d, i_q, v_{dc})^T$,则式(9)可简写为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (10)$$

$\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 的向量场定义为

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}x_1 + \omega x_2 - \frac{e_d}{L} \\ -\frac{R}{L}x_2 - \omega x_1 - \frac{e_q}{L} \\ \frac{i_{pv}}{C} - \frac{e_d x_1 + e_q x_2}{C x_3} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

该模型通过调节 x_2 和 x_3 的状态模型来调节电网的直流输入电压和功率因数。这两个状态被视为该模型的输出:

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T = [x_2, x_3]^T = [i_q, v_{dc}]^T \quad (12)$$

从式(9)可看出该系统为非线性系统,因此采用输入输出反馈线性化理论来控制该系统。

2 输入输出反馈线性化理论

输入输出线性化方法的主要思想是设计一种非线性控制,将非线性动态系统转换为完全解耦或部分解耦的线性子系统,以方便应用非线性控制技术。

考虑以下非线性多输入多输出系统:

$\dot{x} = f(x) + g(x)u; \quad y = h(x) \tag{13}$

式中： x 为 $n \times 1$ 阶状态向量； u 为 $m \times 1$ 阶控制输入向量； y 为 $m \times 1$ 阶输出向量； f, h 为向量场函数； g 为 $n \times m$ 矩阵，其列为向量场 g_i 。

假设 r_i 为使至少有一个输入出现在 $y_i^{(r_i)}$ 中的最小整数，则有

$$y_i^{(r_i)} = L_f^{(r_i)} h_i + \sum_{j=1}^m L_{g_j} L_f^{(r_i-1)} h_i u_j \tag{14}$$

式中： L 表示求导。

对于某个整数 r_i ，在状态空间中的一个区域 Ω_x 内存在某一点 $x = x_0$ ，使得 $L_{g_j} L_f^{(r_i-1)} h_i(x) \neq 0$ 。对输入量 y_i 逐次微分，直到出现输入量 u ，可得到

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^{(r_1)} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{(r_m)} h_m(x) \end{bmatrix} + E(x)u \tag{15}$$

$E(x)$ 在定义区域 Ω_x 上可逆，取输入变换：

$$u = E^{-1}(x) \begin{bmatrix} v_1 - L_f^{(r_1)} h_1 \\ \vdots \\ v_m - L_f^{(r_m)} h_m \end{bmatrix} \tag{16}$$

将式(16)带入式(15)可得到输出变量 y 和新的输入变量 v 之间的线性微分关系：

$$[y_1^{(r_1)} \ y_2^{(r_2)} \ \cdots \ y_m^{(r_m)}]^T = [v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_m]^T \tag{17}$$

该过程实现了非线性到线性关系的转换^[9-10]。

3 逆变器的反馈线性化实现

系统输出是电网电流和直流输入电压的 q 分量： $y_1 = x_2 = i_q$ ； $y_2 = x_3 = v_{dc}$ 。对于 y_1 和 y_2 ，有

$$\dot{y}_1 = f_2 - u_2 \frac{1}{L} \tag{18}$$

$$\dot{y}_2 = f_3 = \frac{i_{pv}}{C} - \frac{e_d x_1 + e_q x_2}{C x_3} \tag{19}$$

由式(19)可得

$$\ddot{y}_2 = \dot{f}_3 = \frac{\dot{i}_{pv}}{C} - \frac{1}{C x_3} \left[e_d \left(f + u_1 \frac{1}{L} \right) + e_q \left(f_2 + u_2 \frac{1}{L} \right) \right] + f_3 \frac{e_d x_1 + e_q x_2}{C x_3^2} \tag{20}$$

将式(18)、式(20)写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = A(x) + E(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{21}$$

式中： $E(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{e_d}{L C x_3} & -\frac{e_q}{L C x_3} \end{bmatrix}$ ， $A(x) =$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ \frac{i_{pv}}{C} - \frac{1}{C x_3} (e_d f_1 + e_q f_2) + \frac{(e_d x_1 + e_q x_2)}{C x_3^2} f_3 \end{bmatrix}。$$

为了将系统线性化，将 $\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = E^{-1}(x) \cdot$

$\begin{bmatrix} v_1 - b_1 \\ v_2 - b_2 \end{bmatrix}$ 代入式(21)后得 $\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$ ，完成了非线性系统到线性系统的转换。

对于跟踪控制，为了保证输出量 y_1 和 y_2 能够跟踪参考量 $y_{1ref} = i_{qref}$ 和 $y_{2ref} = v_{dcref}$ ，将输入控制量定义为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} e_1 + \dot{y}_{1ref} \\ k_{21} e_2 + k_{22} \dot{e}_2 + \ddot{y}_{2ref} \end{bmatrix} \tag{22}$$

式中： k_{ij} 为系数； $e_i = y_{iref} - y_i$ ； $\dot{e}_i = \dot{y}_{iref} - \dot{y}_i$ ， $i, j = 1, 2$ 。

式(22)实现了跟踪控制^[11-12]。

4 仿真实验与结果分析

光伏发电系统及其控制方案如图 3 所示。MPPT 模块为线性控制回路提供直流母线电压基准，线性控制回路为反馈线性化回路提供控制信号 v_1 和 v_2 ，反馈线性化模块的输出为控制信号 u_1 和 u_2 ，通过 Park 变换使这 2 个控制信号产生相位参考电压，相位参考电压用于逆变器的 SVPWM 控制。

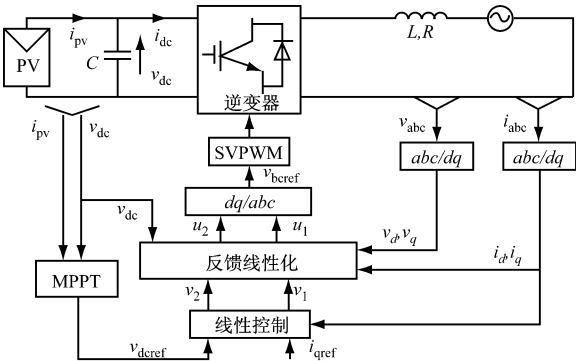


图 3 光伏发电系统及其控制方案

在 Matlab/Simulink 环境中仿真光伏发电系统，仿真参数：电网电压有效值为 220 V，频率 $f = 50$ Hz，电感 $L = 2$ mH，电阻 $R = 0.1 \ \Omega$ ，直流母线电容 $C = 2\ 000 \ \mu\text{F}$ 。

图 4、图 5 为光照强度阶跃变化条件下的仿真结果。 $t = 0.4$ s 时光照强度从 1 kW/m^2 减少为 0.4 kW/m^2 ， $t = 0.6$ s 时光照强度从 0.4 kW/m^2 增强为 1 kW/m^2 。图 4 中电压、电流和功率的变化表

明了光伏阵列能迅速达到新的最大功率点。图 5 显示电网电流的 q 分量没有受到光照强度变化的影响,从而不会影响功率因数。

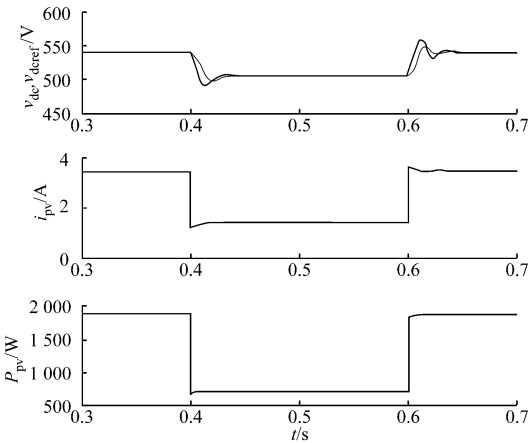


图 4 光伏阵列随光照强度变化的输出特性

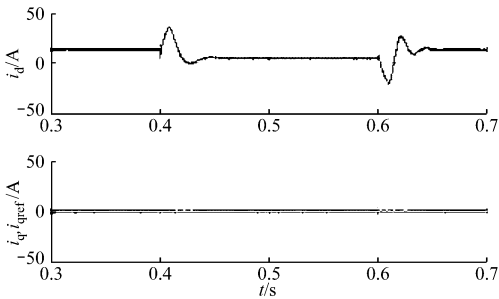


图 5 电网电流 $d-q$ 分量随光照强度变化特性

图 6 为温度阶跃变化条件下的仿真结果。 $t=0.8\text{ s}$ 时温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=1.0\text{ s}$ 时温度从 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见每次温度改变后,光伏阵列都能迅速达到新的最大功率点,而且电网电流的 q 分量特性曲线与图 5 相似,不会影响到电网的功率因数。

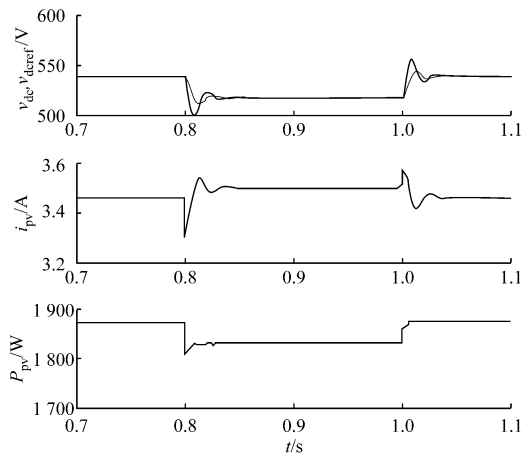


图 6 光伏阵列随温度变化的输出特性

图 7 为电网电流 q 分量随其参考值变化特性。可见日照强度的阶跃变化导致电网参考电流的 q 分

量在 $t=2\text{ s}$ 时从 0 A 上升到 10 A ,即发生阶跃变化后,电网电流的 q 分量能迅速达到新的参考值。

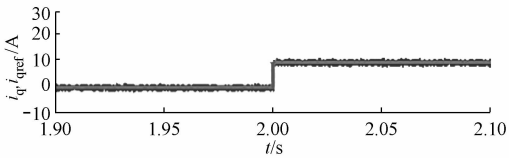
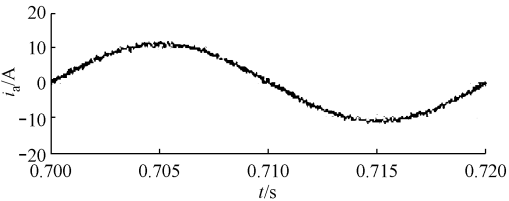


图 7 电网电流 q 分量随其参考值变化特性

图 8 给出了采用定步长 ($step=0.05\text{ V}$) 和变步长 ($step=0.05\text{ V}|\Delta P/\Delta V|$) 时的电网电流比较。可见在变步长情况下只产生了较小的电网稳态振荡电流,而且通过仿真得到此时电网相电流的总谐波失真率较低,为 3.52% ,而定步长情况下的总谐波失真率达 13.12% 。



(a) 定步长



(b) 变步长

图 8 电网电流在不同步长条件下的波形

5 结语

在光伏发电系统的非线性模型中应用反馈线性化控制技术,得到 2 个没有内部动态的线性子系统,这些子系统允许分开控制电网的功率因数和逆变器的直流母线电压。仿真结果表明,使用该控制方法时,光照强度和温度的变化不会影响电网功率因数;采用的变步长电导增量 MPPT 算法提高了光伏发电系统的动态和稳态性能,与定步长算法相比,大大降低了电网电流的总谐波失真率。

参考文献:

[1] HOHM D P, ROPP M E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms [J]. Progress in Photovoltaics, 2003, DOI:10.1002/pip.459.

[2] COELHO R F, CONNER F, MARTINS D C. A study of the basic DC-DC converters applied in

- maximum power point tracking [C]//Power Electronics Conference, 2009, Bonito-Mato Grosso do Sul; 673-678.
- [3] ENRIQUE J M, ANDUJAR J M, BOHORQUEZ M A. A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications[J]. Solar Energy, 2010, 84(1): 79-89.
- [4] MOLINA M G, MERCADO P E. Modeling and control of grid-connected photovoltaic energy conversion system used as a dispersed generator[C]//IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, Bogota; 13-15.
- [5] JAIN S, AGARWAL V. New current control based MPPT technique for single stage grid-connected PV systems[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 625-644.
- [6] HASSAINE L, OLIAS E, QUINTERO J, et al. Digital power factor control and reactive power regulation for grid-connected photovoltaic inverter [J]. Renewable Energy, 2009, 34(9): 315-321.
- [7] LI Jiyong, WANG Honghua. A novel stand-alone PV generation system based on variable step size INC MPPT and SVPWM control[C]//Power Electronics and Motion Control Conference, 2009, Wuhan; 2155-2160.
- [8] 杨培志, 张晓华, 陈宏钧. 三相电压型 PWM 整流器模型准线性化[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 28-35.
- [9] HASSAN K K. Nonlinear system[M]. 3rd Ed. Upper Saddle River; Prentice Hall, 2002: 110-118.
- [10] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 输出函数在多输入多输出非线性控制系统设计中的重要作用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 87-93.
- [11] JUNG J, LIM S, NAM K. A feedback linearizing control scheme for a PWM converter-inverter having a very small DC-link capacitor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(5): 1124-1131.
- [12] LEE D C, LEE G M. DC-bus voltage control of three-phase AC/DC PWM converters using feedback linearization [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 826-833.