

单相单级光伏逆变器最大功率点跟踪方法^{*}

于晶荣^{1,2}, 曹一家¹, 何敏¹, 邹勇军², 陈莎²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082; 2. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘要: 分析了单相单级光伏逆变器的模型特点及其对最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制的特殊要求,提出了适用于这种类型光伏逆变器的MPPT方法。该方法利用极值搜索算法实现MPPT控制,通过高通滤波器提取逆变器直流电压中的纹波电压,以该纹波电压为极值搜索算法的扰动信号;在极值搜索算法中引入优化补偿环节,通过该环节提高算法的收敛速度,进一步优化MPPT控制的稳态和动态性能。仿真和实验结果表明该方法可以充分利用单相单级逆变器的固有纹波,在无需额外注入扰动信号的前提下,该MPPT方法能够快速准确地搜索到最大功率点。

关键词: 最大功率点跟踪;极值搜索算法;单相单级光伏逆变器;优化设计

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Maximum power point tracking method for single-phase single-stage photovoltaic inverter

Yu Jingrong^{1,2}, Cao Yijia¹, He Min¹, Zou Yongjun², Chen Sha²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In this paper, the model characteristic of single-phase single-stage photovoltaic inverter and the special requirement of maximum power point tracking (MPPT) control are analyzed; and the MPPT method suitable for this kind photovoltaic inverter is proposed. This method uses extremum seeking algorithm to implement MPPT control and uses a high pass filter (HPF) to extract the ripple voltage of inverter DC voltage, which is used as the disturbance signal for extremum seeking algorithm. To increase the convergence rate of extremum seeking algorithm, an optimized compensator is introduced, which increases the freedom of control loop, and improves the stability and dynamic performance of the new MPPT method. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed method can make full use the inherent ripple of single-phase single-stage photovoltaic inverter; and can find the maximum power point quickly and precisely without injecting extra external disturbance signal.

Keywords: maximum power point tracking (MPPT); extremum seeking algorithm; single-phase single-stage photovoltaic inverter; optimized design

1 引言

近年来,新能源发电技术发展迅猛,其中光伏发电以其清洁性和经济性被认为是最具有发展前景的可再生能源利用技术。光伏屋顶被认为是未来光伏发电技术推广和普及的主要形式^[1]。在这种光伏系统中,光伏电池通过逆变器连接至单相电网或供给负载。逆变器作为光伏

系统的关键元件,直接影响着系统的整体性能、效率和成本。单相单级逆变器因成本低、可靠性高和配置灵活等特点,是小容量光伏系统中最具有应用前景的拓扑结构,已成为国内外光伏领域的一个研究热点^[2,4]。

在光伏发电系统中,目前应用最广泛的最大功率点跟踪(MPPT)方法是扰动观察法和增量电导法。扰动观察法会导致光伏电池输出功率在最大功率点附近波动,步长较大时会导致在最大功率点附近的波动加大,步长较小时,

收稿日期:2012-06 Received Date:2012-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(60634020)、中央高校基本科研业务费青年教师助推专项(2011QNZT028)资助项目

光伏电池有可能长期工作于低功率区域,变步长虽然能在一定程度上提高光伏系统的稳定性,但是不能从理论上使系统达到最佳的动态性能^[5-8];增量电导法不仅存在步长的选取问题,而且阈值大小受限于传感器的精度^[9]。极值搜索算法能够以外加小幅值周期性信号为扰动信号,通过调制和解调过程,实现对估计值和最佳值的匹配^[10]。文献[11]提出了一种分析极值搜索控制算法的系统方法,通过实时调整多参数目标值使系统达到最佳性能;文献[12]采用极值搜索算法实现最优控制,通过在线调整活塞的位置和驱动频率来优化热声制冷机的功率,但未考虑系统的不稳定因素,没有给出控制器的设计过程;文献[4]提出了利用光伏逆变系统直流侧二次纹波,来达到跟踪到光伏电池最佳工作点的目的,但是文中只是用1和-1来表示实际工作点处在最佳工作点的左侧还是右侧,使得该算法和扰动观察法一样输出功率在最大功率点附近波动;文献[13]提出采用基于纹波的极值搜索算法来达到MPPT的目的,比较了扰动观察法和极值搜索算法的效率,以及电流控制和电压控制MPPT法的稳态和动态性能,但没有涉及该方法的优化设计。

本文针对单相单级逆变器的拓扑结构,利用极值搜索算法以周期性信号为调制波的特点,充分利用逆变器直流电压中的固有纹波电压,在无需额外扰动信号情况下,实现基于极值搜索算法的MPPT控制;为进一步优化MPPT稳态和动态性能,在极值搜索算法中引入补偿器,以提高极值搜索算法的收敛速度;在算法稳定性分析的基础上,给出了该MPPT方法的优化设计细节。仿真结果验证了该MPPT方法的优化效果,实验结果证明该算法具有优良的稳态和动态性能。

2 单相单级光伏系统数学模型及特征

2.1 光伏电池阵列模型

在不同光照强度和环境温度下,光伏电池的输出电流-电压呈现非线性特征,其电流-电压特性方程为^[14-16]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{qU_{pv}}{AkT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

式中: U_{pv} 、 I_{pv} 分别为光伏电池阵列的输出电压和电流, I_{ph} 为光生电流, I_0 为二极管饱和电流, q 为电荷量, A 为二极管因子, k 为波尔兹曼常数, T 为光伏电池温度。

根据式(1),光伏电池阵列的电流-电压(I - V)、功率-电压(P - V)特性曲线如图1所示,图中, I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压。

光伏电池阵列在无遮挡的情况下 P - V 特性为单峰曲线,在某一特定电压值时,其功率输出达到最大值^[17-18]。因此,为提高光伏系统的效率,需要使其始终工作在最大功率点附近,即采用MPPT控制。

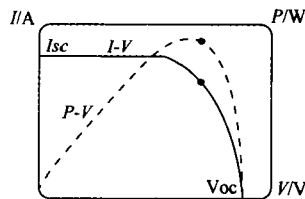


图1 光伏电池在标准条件下的 I - V 、 P - V 特性曲线
Fig. 1 I - V , P - V curves of photovoltaic cell under standard condition

2.2 单相单级光伏逆变器的直流侧纹波电压

单相单级光伏逆变器由直流侧储能电容 C 、单相电压型逆变桥和输出滤波器组成,其拓扑结构如图2所示。图中,4个IGBT构成了电压型逆变桥,电感 L_{f1} 、 L_{f2} 、电容 C_f 和电阻 R_c 构成输出滤波器, R_l 为等效负载。

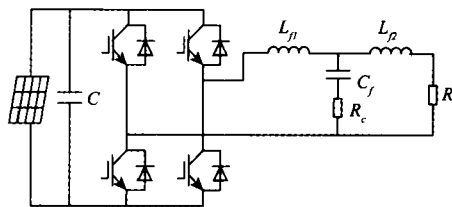


图2 单相单级光伏逆变器拓扑结构
Fig. 2 Topological structure of single-stage single-phase P - V inverter

设光伏逆变器交流侧电压的表达式为 $v_g = v_m \sin \omega t$, 其中 v_m 为电压峰值, ω 为角频率;光伏逆变器单位功率因数发电时,交流侧电流的表达式为 $i_g = i_m \sin \omega t$, 其中 i_m 为电流峰值。则光伏系统的输出功率 p 为:

$$p = v_g i_g = \frac{v_m i_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) \quad (2)$$

由式(2)可以看出,光伏系统的输出功率由直流分量和二次谐波分量2部分组成。

在稳态条件下,光伏电池的输出功率提供了式(2)中的直流部分,即逆变器输出功率的有功分量;式(2)中的交流部分,使得电压型逆变器的直流侧电容电压,在平均值基础上叠加了一个近似二次谐波的纹波电压分量^[4]。该二次谐波电压的幅值为:

$$\Delta U_c \approx \frac{P_{pv}}{2\omega U_0 C} \quad (3)$$

式中: P_{pv} 为标准情况下光伏电池的输出功率, U_0 为标准情况下额定工作电压, C 为并联在光伏电池侧的电容值^[19-20]。一般,纹波幅值 ΔU_c 取为额定电压值的1%~3%^[4,13]。

本文正是以电容电压上频率为2倍基波频率、幅值为 ΔU_c 的纹波电压作为MPPT算法的扰动信号。

3 基于极值搜索算法的 MPPT 方法

3.1 极值搜索算法的原理

极值搜索算法实质上是一个调制过程,即在待寻优的目标值上叠加一个幅值较小的、周期变化的激励信号,使被控对象的输出或某个性能指标发生变化,通过高通滤波器和解调过程不断对性能指标相对目标值变化的导数进行估计,并利用梯度法获得局部最优解^[21]。

极值搜索算法原理如图3所示。图中, $f(t, u)$ 为功能函数, $\tilde{d}_1(t)$ 、 $\tilde{d}_2(t)$ 为外部扰动信号, LPF (low pass filter)、HPF (high pass filter) 分别为低通滤波器和高通滤波器。设 \hat{u} 为最优值 u^* 的估计值,若功能函数 $f(t, u)$ 的时变速度远小于外部扰动 $\tilde{d}_1(t)$ 的变化率,图3能够实现梯度 $\frac{\partial f}{\partial u}(\hat{u})$ 的优化估计。

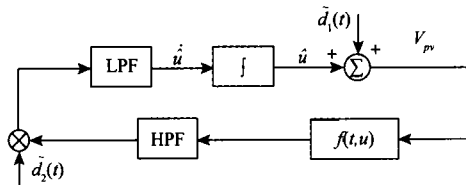


图3 极值搜索算法原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of extremum seeking algorithm

极值搜索算法的一个关键点是解调过程如何提取有用信息并最终搜索到最优值。设扰动量 $\tilde{d}_1(t)$ 和解调信号 $\tilde{d}_2(t)$ 是同频率的正弦信号,其表达式为:

$$\begin{cases} \tilde{d}_1(t) = a \sin \omega_n t \\ \tilde{d}_2(t) = b \sin(\omega_n t + \beta) \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 、 b 分别是扰动量 $\tilde{d}_1(s)$ 和 $\tilde{d}_2(s)$ 的幅值, ω_n 是扰动量的角频率, β 是两信号之间的相位差。

考虑到 $f(t, u)$ 的变化频率远小于纹波 $\tilde{d}_1(t)$ 的频率,所以 $f(t, u)$ 可以用 $f(u)$ 来表示。设在某一时刻函数 $f(u)$ 在 u^* 点存在极大值,把 $f(\hat{u} + \tilde{d}_1)$ 在最优值 u^* 处进行二阶泰勒展开来近似,可得到:

$$f(\hat{u} + \tilde{d}_1) \approx f(u^*) + \frac{1}{2}(\hat{u} + \tilde{d}_1 - u^*)^2 f''(u^*) \quad (5)$$

式中: $f''()$ 表示 $f(u)$ 对 u 的二阶导数,通过 HPF 可以得到式(5)的高频分量,同时忽略扰动分量的平方项,可以得到:

$$\tilde{d}_1(\hat{u} - u^*) f''(u^*) \quad (6)$$

乘以扰动量 $\tilde{d}_2(s)$ 后,得:

$$\tilde{d}_2 \tilde{d}_1(\hat{u} - u^*) f''(u^*) \quad (7)$$

经过 LPF 以后,得到式(7)的直流分量,即:

$$d(\hat{u} - u^*) f''(u^*) = \hat{u} \quad (8)$$

式中: d 表示 $\tilde{d}_2 \tilde{d}_1$ 的直流分量。

对式(8)进行积分运算,求解出式(8)的解为:

$$\hat{u} = \rho e^{df''(u^*)t} + u^* \quad (9)$$

式中: ρ 为常数。若 $f(u)$ 存在极大值,则其二阶导数小于零,且最终得到 $\hat{u} = u^*$, 即估计值等于最优值。

3.2 基于系统固有纹波的 MPPT 方法

单相单级光伏逆变器由于输出功率包含二次谐波成分,导致直流电容上存在以二次谐波为主要成分的纹波电压,因此可以利用纹波电压对光伏逆变器的影响,通过极值搜索算法使光伏电池始终工作在最大功率输出点附近。

基于极值搜索控制的 MPPT 方法原理如图4所示。图中,极值搜索算法的功能函数 $f(t, u)$ 对应于光伏电池的电流-电压函数,即图1中的 I - V 曲线,其输出值为光伏电池输出电流 I_{pv} ; KC 为优化极值搜索算法性能的补偿器; F_1 、 F_2 分别为电流和电压采样环节。

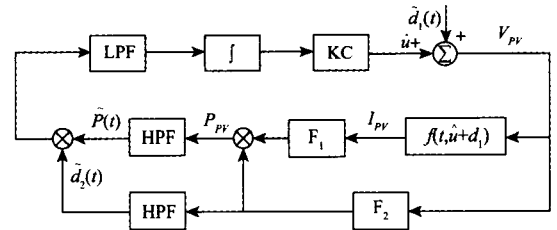


图4 基于极值搜索算法的 MPPT 方法原理框图

Fig. 4 Principle block diagram of MPPT method based on extremum seeking algorithm

设 $\tilde{p}(t)$ 和 $\tilde{v}(t)$ 分别表示光伏电池输出功率 P_{pv} 和输出电压 V_{pv} 的交流分量,根据图1中 P - V 曲线,有 $\tilde{p}(t) \approx \left(\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \right) \tilde{v}(t)$ 。为了避免计算光伏电池的瞬时量 $\tilde{p}(t)$ 和 $\tilde{v}(t)$ 时引入额外干扰,对交流分量取平均值,处理得到:

$$\int_t^{t+T} \tilde{p}(\tau) \tilde{v}(\tau) d\tau \approx \left(\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \right) \int_t^{t+T} \tilde{v}^2(\tau) d\tau \quad (10)$$

式中: T 为积分周期。由式(10),可以得到:

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \approx \frac{\int_t^{t+T} \tilde{p}(\tau) \tilde{v}(\tau) d\tau}{\int_t^{t+T} \tilde{v}^2(\tau) d\tau} \quad (11)$$

由于稳态时二次纹波电压的幅值由 ΔU_c 确定,而频率为电网频率的2倍,所以当积分周期足够长时(远大于二次纹波的周期), $\int_t^{t+T} \tilde{v}^2(\tau) d\tau$ 为常数,所以 $\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}}$ 与

$\int_t^{t+\tau} \tilde{p}(\tau) \tilde{v}(\tau) d\tau$ 存在一定的比例关系,而 $\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}}$ 反映了实际工作电压与最大功率输出点电压之间的关系,因此 $\int_t^{t+\tau} \tilde{p}(\tau) \tilde{v}(\tau) d\tau$ 也可以近似表示实际工作电压与最大功率输出点电压之间的关系。也就是说在较长的时间段内(相对于二次纹波周期), $\int_t^{t+\tau} \tilde{p}(\tau) \tilde{v}(\tau) d\tau$ 能说明实际工作点在最大功率输出点电压的左侧还是右侧,以及离最大功率输出点电压的远近程度。

根据以上分析,图4所示MPPT方法中,通过采样环节 F_1 和 F_2 得到光伏电池输出电流 I_{pv} 和电压 V_{pv} 采样信号后,计算出光伏电池输出功率 P_{pv} ;采用HPF滤除直流分量,可以分别得到输出电压 V_{pv} 的交流分量 $\tilde{v}(\tau)$ 和输出功率 P_{pv} 的交流分量 $\tilde{p}(\tau)$;电压交流分量 $\tilde{v}(\tau)$ 一方面作为扰动信号,同时也作为解调信号;直流侧电容上的纹波电压将导致光伏电池的输出功率发生扰动,而经过 $\tilde{v}(\tau)$ 解调以后能够反映实际电压工作点的位置,再经过LPF后就能够得到光伏电池的最佳工作点电压的估计值。

4 MPPT方法稳定性分析及优化设计

4.1 基于极值搜索算法的MPPT方法稳定性分析

一般地,电流及电压采样电路采用相同的低通滤波电路,滤除采样信号中的高频噪声,同时应该保证信号中的二次谐波成分能顺利通过,本文采用二阶Butterworth滤波器来消除噪声,转折频率设置大于10倍此谐波频率。因此能够保证二次谐波信号顺利通过,同时对二次谐波的相位影响很小,因此可以忽略,简化以后MPPT方法的模型如图5所示。

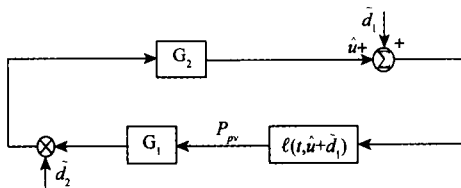


图5 基于极值搜索算法的MPPT方法简化框图

Fig. 5 Simplified block diagram of MPPT method based on extremum seeking algorithm

图中, G_2 包括LPF、积分器和补偿器3个环节, G_1 表示HPF, $\ell(t, \hat{u} + \tilde{d}_1)$ 表示光伏电池的输出功率函数,其输出值为光伏电池输出功率 P_{pv} 。

从图5的原理框图来看,可以根据平均模型的概念来推导出估计值 \hat{u} 的闭环方程为:

$$\hat{u} = G_2 [\tilde{d}_2 G_1 (\ell(t, \hat{u} + \tilde{d}_1))] \quad (12)$$

由于估计值的变化频率远远小于二次谐波的频率,

将函数 $\ell(t, \hat{u} + \tilde{d}_1)$ 在最大功率点电压处进行二阶泰勒

展开,忽略高次项,则可以近似得到:

$$P_{pv} = P_{opt} + \frac{1}{2} Q (u - u^*)^2 \quad (13)$$

式中: P_{opt} 为光伏电池的最大功率, Q 为最大功率点电压处功率函数 $\ell(t, \hat{u} + \tilde{d}_1)$ 的二阶导数。

将式(13)代入式(12),得到:

$$\begin{aligned} \hat{u} &= G_2 \{ \tilde{d}_2 e G_1 [\ell(t, \hat{u} + \tilde{d}_1)] \} = \\ &G_2 \{ \tilde{d}_2 G_1 [P_{opt} + \frac{1}{2} Q (\tilde{d}_1 + \hat{u} - u_{opt})^2] \} = \\ &G_2 \{ \tilde{d}_2 G_1 [P_{opt} + \frac{1}{2} Q [\tilde{d}_1^2 + 2\tilde{d}_1(\hat{u} - u_{opt}) + (\hat{u} - u_{opt})^2]] \} \end{aligned} \quad (14)$$

设HPF在二次谐波角频率附近的幅值增益定义为 g_1 , 则式(14)可以简化为:

$$\hat{u} = G_2 \left\{ g_1 \frac{1}{2} Q [\tilde{d}_2 \tilde{d}_1^2 + 2\tilde{d}_2 \tilde{d}_1 (\hat{u} - u_{opt})] \right\} \quad (15)$$

按照平均模型的概念,定义:

$$r_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} Q \tilde{d}_2 \tilde{d}_1^2 dt \quad (16)$$

$$r_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{d}_2 \tilde{d}_1 dt \quad (17)$$

将式(16)和(17)代入式(15),可以得到:

$$\hat{u} = G_2 g_1 [r_1 + Q r_2 (\hat{u} - u_{opt})] \quad (18)$$

根据式(18),闭环系统的特征方程为:

$$1 - G_2 g_1 Q r_2 = 0 \quad (19)$$

4.2 补偿器的优化设计

由于以电容纹波电压为调制信号和解调信号的极值搜索算法收敛速度较慢且无法控制。为实现对MPPT方法跟踪速度的控制,本文在极值搜索算法中增加一个控制自由度,即在极值搜索算法中引入补偿控制器,通过提高极值搜索算法的收敛速度,实现对MPPT方法动态性能的优化。

本文选择的LPF为2阶滤波器,加上极值搜索算法的积分器,则图5中 G_2 中所包含的低通滤波器和积分器构成了3阶系统。对于高阶系统,比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制是最通用、简单的控制方法。为了兼顾系统的复杂性和控制效果,考虑补偿器采用PID控制实现对系统的优化。由于 G_2 中已经包含有积分环节,算法的稳态误差能够被完全消除,无需加入额外的积分控制;而微分控制有可能放大系统噪声。综合考虑,补偿器选择比例环节,比例控制的增加能够满足优化的动态性能,也不会增加设计难度。

本文使用的HPF为2阶Butterworth滤波器,其等效传递函数 $G_1(s)$ 为:

$$G_1(s) = \frac{s^2}{s^2 + 444.288s + 98696} \quad (20)$$

其截止频率为 50 Hz。在 100 Hz 附近, $G_1(s)$ 的幅值增益 g_1 为 0.97, 相角为 43.31° , 低频段以 -40 dB 的速度衰减。

在本文提出的 MPPT 方法中, 扰动量 $\tilde{d}_1(t)$ 和解调信号 $\tilde{d}_2(t)$ 是幅值相同(忽略 HPF 对扰动信号幅值的衰减)、频率相同的交流信号, 将式(4)代入式(17), 有:

$$r_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{d}_2 \tilde{d}_1 dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a^2 \sin \omega t \sin(\omega t + \beta) dt = \frac{a^2}{2} \cos \beta \quad (21)$$

根据图 4 所示, 扰动量 $\tilde{d}_1(t)$ 和解调信号 $\tilde{d}_2(t)$ 的相角差为 HPF 的相位滞后, 即 $\beta = 43.31^\circ$; 扰动量 $\tilde{d}_1(t)$ 和解调信号 $\tilde{d}_2(t)$ 的幅值 a 为直流电容纹波电压的幅值, 由 ΔU_c 确定。

设 V_{opt} 为光伏电池最大功率点电压, 最大功率输出点电压处函数 $\ell(t, \hat{u} + \tilde{d}_1)$ 的 2 阶导数 Q 为:

$$Q = \frac{\partial^2 P_{PV}}{\partial V_{PV}^2} \Big|_{V_n=V_{opt}} = -\frac{qI_0}{AkT} \left(2 + \frac{qV_{PV}}{AkT} \right) \exp\left(\frac{qV_{PV}}{AkT}\right) \Big|_{V_n=V_{opt}} \quad (22)$$

式中: q, k 均为常数, 温度 T 取 300 K, 本文所用光伏电池的参数为: 二极管因子 $A = 156$, 二极管饱和电流 $I_0 = 455 \mu A$, 最大功率点电压 $V_{opt} = 29.7$ V。根据式(22)得出 $Q = -1.6$ 。

图 4 中, LPF 采用二阶滤波器, 为防止 LPF 产生振荡过程, 取截止频率为 4.5 Hz(远小于谐波频率), LPF 的传递函数为:

$$\frac{799.4}{s^2 + 57.1s + 799.4}$$

设图 4 中补偿器 KC 的传递函数为 $K(s)$, 由于补偿器选定为比例控制, 则 $K(s)$ 为一比例系数 k_p , 根据式(18)可得闭环系统的特征方程为:

$$1 + \frac{452.8}{s^2 + 57.1s + 799.4} \frac{k_p}{s} = 0$$

可见闭环系统是一个 3 阶系统, 按照工程整定方法可近似为 2 阶系统, 然后按照 2 阶系统最佳性能来整定比例系数 k_p 。

5 仿真结果

为验证本文所提出 MPPT 方法的正确性, 在 MATLAB/SIMULINK 环境中对单相单级光伏逆变器进行仿真研究。仿真算法为 ode23tb, 最大仿真步长为 $1E-6$, 仿真时间为 0.8 s; 为了防止 LPF 的振荡过程对系统造成影

响, 需要在 LPF 后加一个限幅环节, 取限幅环节的上限取为 1, 下限取为 -1; 参考初值电压取为 27 V。仿真结果如图 6 所示, 图中曲线 1 为未加优化补偿的 MPPT 算法最大功率点跟踪轨迹, 曲线 2 为本文提出算法的最大功率点跟踪轨迹。

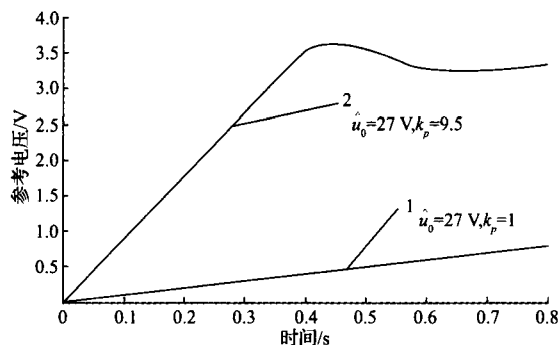


图 6 优化补偿环节对 MPPT 算法效果的影响

Fig. 6 Simulation results under the same initial reference voltage and different k_p

从图中可以看出, 基于极值搜索算法的 MPPT 方法能够使系统工作在预期的工作点上, 同时优化补偿环节的引入对系统的动态性能影响很大。当未加入优化补偿时, 在 0.8 s 的仿真时间里, MPPT 方法无法跟踪到最大功率点; 当引入优化补偿环节, 且根据 2 阶系统最佳性能来整定比例系统 k_p , 即在本文所设计系统中 k_p 取为 9.5 时, 系统在 0.4 s 左右跟踪到最大功率点。仿真结果表明: 在不加优化补偿的 MPPT 控制中, 估计值要经过很长时间的过渡过程才能达到最佳值; 通过优化设计, 能够有效控制系统的跟踪速度, 使系统达到最佳的动态效果。

6 实验结果

为了进一步验证本为所提 MPPT 方法的性能和效果, 在中南大学民主楼搭建了单相单级光伏发电系统试验平台。该试验平台的光伏电池部分由 2 块 100 W 的光伏电池并联组成, 光伏电池的开路电压在天气晴好的情况下在 36 ~ 38 V, 短路电流在 4 ~ 6 A, 最大功率输出点电压大致在 29 ~ 30 V 并且会随温度的变化而变化, 在阳光很强烈的情况, 实际最大输出功率在 140 ~ 150 W, 在最大输出功率时, 电容电压纹波幅值约为 1 V。

单相单级逆变器拓扑结构如图 2 所示, 逆变器控制电路框图如图 7(a) 所示, 控制系统采用 DSP + CPLD 结构, DSP 芯片采用 TI 公司的 32 位定点 TMS320F2812, CPLD 采用 ALTERA 公司的可编程芯片 EPM7256AETC144; 光伏系统的控制频率为 10 kHz。控制算法的实现流程如图 7(b) 所示。

单相单级光伏逆变器的实验波形如图 8 ~ 12 所示。其中, 图 8 ~ 11 是 2011 年 11 月 21 日上午 11 时所得到的数据

(天气晴朗、无云、无风);图12是2011年11月23日上午10:30时实验得到的数据(天气晴朗、无云、无风、有薄雾)。试验数据均由TDS510仿真器从DSP2812中得到。

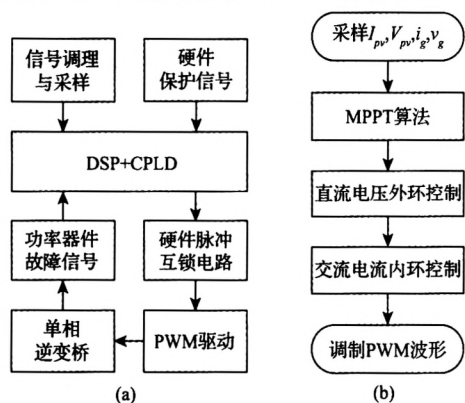


图7 控制系统实现框图与控制算法流程

Fig.7 Realization block diagram of the control system and flowchart of the control algorithm

从图8可以看出,直流电容上存在一个二次谐波扰动电压,扰动电压的幅值约为1V左右,这是通过合理设置直流侧电容数值而得到的。

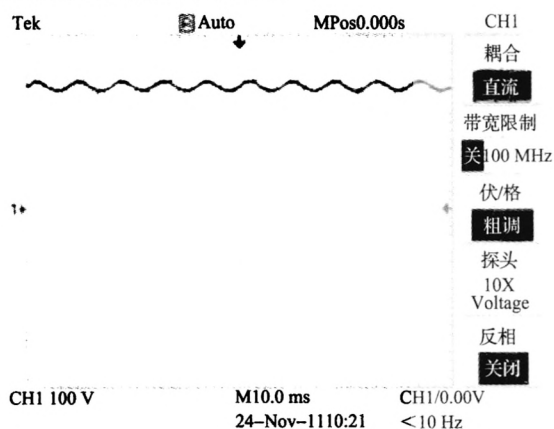


图8 直流侧纹波电压现象(主要成分为100 Hz)

Fig.8 The ripple voltage of DC side (the main component is 100 Hz signal)

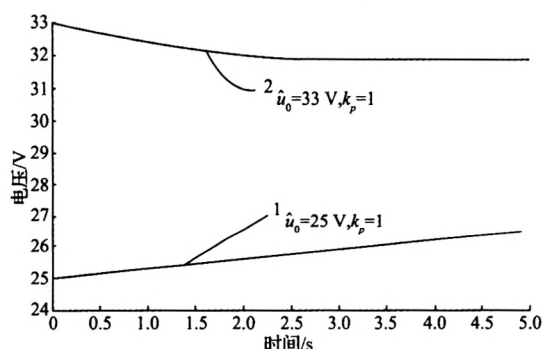


图9 在不同初值条件下的参考电压变化趋势

Fig.9 The reference voltage changing trends under different initial voltage conditions ($k_p = 1$)

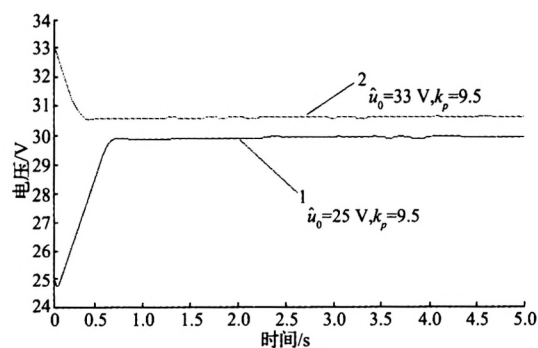


图10 在不同初值条件下的参考电压变化趋势

Fig.10 The reference voltage changing trends under different initial voltage conditions ($k_p = 9.5$)

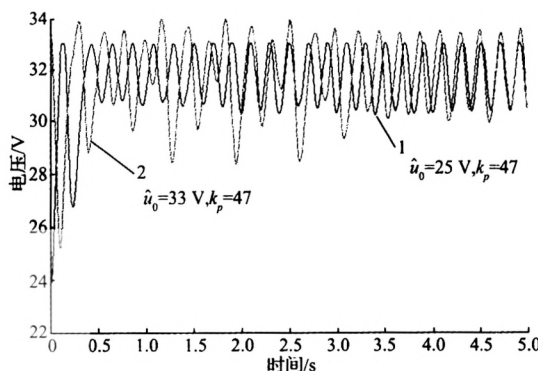


图11 在不同初值条件下的参考电压变化趋势

Fig.11 The reference voltage changing trends under different initial voltage conditions ($k_p = 47$)

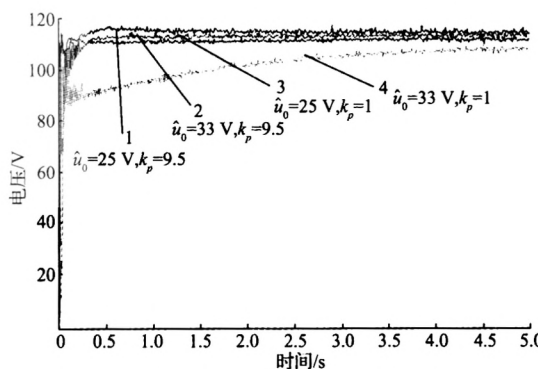


图12 在不同初值及 k_p 条件下的输出功率

Fig.12 Output power under different initial voltages and k_p

从图9~11可以看出,在不同的初始电压条件下,极值搜索算法都能使光伏电池实际工作点电压逐渐趋近于最大功率输出点电压,证明了极值搜索算法的有效性。但是,补偿环节的引入实现了对MPPT算法的收敛速度的控制。

当未加入优化补偿,即 $k_p = 1$ 时,实验结果如图9所示,在5 s的时间内过渡过程还没有完成;当 $k_p = 9.5$ 时,实验结果如图10所示,参考电压基本上在0.8 s内就达到了最佳值;然而,当 k_p 较大,实验结果如图11所示,实验中取 $k_p = 47$ 时,系统产生了振荡,参考电压的这种振荡不仅会使输出滤波电感产生很大的噪声,而且会使得输出电流波形出现不对称的现象。可见不同的 k_p 对极值搜索算法的性能有很大的影响。

图12是不同 k_p 和电压初值条件下的输出功率的情况。从曲线1和2可以看出,当 $k_p = 9.5$ 时,不同的初始电压下在0.8 s内,它们的稳态输出功率差不超过2 W,可见基于纹波的极值搜索算法能使光伏电池的输出功率达到最大值,且具有良好的稳态和动态效果。

从曲线3和4中可以看出,在未引入补偿器 $K(s)$,即 $k_p = 1$ 时,MPPT方法的动态特性不可控,最大功率点电压的跟踪速度取决于算法估计初始值 \hat{u}_0 与最优值之间的位置关系。曲线3的输出功率在5 s内始终低于最大输出功率,但是与最大输出功率相差不大,因为光伏电池的 $P-V$ 特性曲线在最大功率输出点电压左侧(大于MPPT点电压)时梯度较小;当初始值为33 V时,曲线4中的输出功率会长时间比其他情况下低,这主要是因为:1)极值搜索的收敛速度很慢,2)光伏电池的功率曲线在最大功率输出点电压右侧(大于MPPT点电压)时梯度比较大。

7 结 论

单相单级光伏逆变器要求所用MPPT方法能够快速稳定地跟踪到光伏电池的最大功率点。针对单相单级光伏逆变器的拓扑结构特点,本文提出基于极值搜索算法的MPPT方法。该方法通过合理设计直流电容器参数,使得电容器的固有纹波电压能够满足极值搜索算法对扰动信号的要求,并以该固有纹波电压为周期性扰动信号,构建了基于极值搜索算法的MPPT方法。为实现MPPT方法稳定性和动态性能的合理折衷,在MPPT方法中增加一个自由度,即引入比例控制作为MPPT控制的补偿器,以优化MPPT方法的动态性能;给出了该MPPT方法的详细设计过程,通过仿真和实验证明了此方法的有效性和优越性。

参考文献

- [1] 刘静,陶晓峰.基于下垂特性的分布式发电系统的设计[J].电子测量与仪器学报,2011,25(7):635-641.
LIU J,TAO X F. Design of distributed generation system based on droop characteristic[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2011,25(7):635-641.
- [2] 王飞,余世杰,苏建徽.太阳能光伏并网发电系统的研究[J].电工技术学报,2005,20(5):72-74.
WANG F,YU SH J,SU J H. Research on photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(5):72-74.
- [3] 张伯泉,杨宜民,陈璟华,等.基于遗传算法的风/光互补发电系统的优化设计[J].仪器仪表学报,2006,27(增刊3):2315-2317.
ZHANG B Q,YANG Y M,CHEN J H,et al. Optimization design of wind/photovoltaic hybrid power systems based on genetic algorithms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2006,27(Suppl.3):2315-2317.
- [4] CASADEI D,GRANDI G,ROSSI C. Single-phase single-stage photovoltaic generation system based on a ripple correlation control maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2006,21(2):562-568.
- [5] 吴理博,赵争鸣,刘建政,等.单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[J].中国电机工程学报,2006,26(6):73-77.
WU L B,ZHAO ZH M,LIU J ZH,et al. Research on the stability of MPPT strategy applied in single-stage grid-connected photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(6):73-77.
- [6] 韦世宽,雷加,谈恩民,等.光伏系统最大功率点跟踪技术研究[J].电子测量与仪器学报,2011,25(6):490-494.
WEI SH K,LEI J,TAN EN M,et al. Study on maximum power point tracking control techniques in PV system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2011,25(6):490-494.
- [7] 郑诗程,刘伟,葛芦生.具有TMPPT功能的太阳能光伏充电系统研究[J].电子测量与仪器学报,2008,22(3):11-15.
ZHENG SH CH,LIU W,GE L SH. Research on solar photovoltaic charging system with TMPPT function[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2008,22(3):11-15.
- [8] JAIN S,AGARWAL. Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems[J]. Electric Power Applications,IET,2007,1(5):753-762.
- [9] PATEL H,AGARWAL V. MPPT scheme for a PV-fed single-phase single-stage grid-connected inverter operating in CCM with only one current sensor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(1):256-263.
- [10] LEYVA R,ALONSO C,QUEINNEC I. MPPT of photovoltaic systems using extremum-seeking control[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2006,

- 42(1):249-258.
- [11] ROTEA M A. Analysis of multivariable extremum-seeking algorithms[C]. Proceedings of the American Control Conference, 2000, 1(6):433-437.
- [12] LI Y Y, ROTEA M A, CHIU G T C. Extremum-seeking control of a tunable thermoacoustic cooler[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4):527-536.
- [13] BRUNTON S L, ROWLEY C W, KULKARNI S R. Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum-seeking control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(10):2531-2540.
- [14] ESRAM T, KIMBALL J W, KREIN P T. Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5):1282-1291.
- [15] 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.
- [16] 崔开涌, 陈国呈, 张翼. 光伏系统最大功率点直接电流跟踪策略[J]. 电力电子技术, 2008, 42(9):27-41.
CUI K Y, CHEN G CH, ZHANG Y. A maximum power point direct current tracking strategy of photovoltaic system[J]. Power Electronics, 2008, 42(9):27-41.
- [17] 周印华, 王亚楠, 吴伟才, 等. 基于 LabVIEW 的光伏 I - V 测试系统的设计与应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增刊3):1775-1776.
ZHOU Y H, WANG Y N, WU W C, et al. Design and implementation of voltage-current testing system based on LabVIEW for photovoltaic cells[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Suppl. 3):27-41.
- [18] WU T U, CHANG C H, Lin L C. Power loss comparison of single-phase and two-stage grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2):707-715.
- [19] HO B M T, CHUNG S H, HUI S Y R. An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4):953-962.
- [20] KJAER S B, PEDERSEN J K, BLAABJERG F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5):1292-1306.
- [21] 李益国, 沈炯. 基于极值搜索控制的电站锅炉在线燃烧优化[J]. 热能动力工程, 2009, 24(4):466-469.
LI Y G, SHEN J. Power plant boiler combustion online optimization based on extremum-search control[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(4):466-469.

作者简介



于晶荣, 2004 年于湖南大学获得学士学位, 2009 年于湖南大学获得博士学位, 现为中南大学讲师、湖南大学博士后, 主要研究方向为电能质量分析与控制技术。

E-mail: jingrong_yu@126.com

Yu Jingrong received B. Sc. degree in 2004 and Ph. D. degree in 2009 both from Hunan University. Now she is a lecturer in Central South University and a postdoctoral researcher in Hunan University. Her research field is analysis and control of power quality.



曹一家, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与控制、信息技术在电力系统中的应用。

E-mail: yjcao@hnu.edu.cn

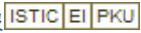
Cao Yijia is a professor and Ph. D. supervisor in Hunan University. His main research interests include optimization and control of power system; and application of information technology in power system.



何敏(通讯作者), 湖南大学讲师, 主要研究方向为图像处理、复杂工业系统控制理论与应用。

E-mail: hemin607@163.com

He Min(Corresponding author) is a lecturer in Hunan University. Her main research interests include image processing, control theory and applications in complex industrial system.

作者: 于晶荣, 曹一家, 何敏, 邹勇军, 陈莎, Yu Jingrong, Cao Yijia, He Min, Zou Yongjun, Chen Sha
作者单位: 于晶荣, Yu Jingrong(湖南大学电气与信息工程学院 长沙410082;中南大学信息科学与工程学院 长沙410083), 曹一家, 何敏, Cao Yijia, He Min(湖南大学电气与信息工程学院 长沙410082), 邹勇军, 陈莎, Zou Yongjun, Chen Sha(中南大学信息科学与工程学院 长沙410083)
刊名: 仪器仪表学报 
英文刊名: Chinese Journal of Scientific Instrument
年, 卷(期): 2013, 34(1)
被引用次数: 8次

参考文献(21条)

1. 刘静, 陶晓峰 基于下垂特性的分布式发电系统的设计[期刊论文]-电子测量与仪器学报 2011(7)
2. 王飞, 余世杰, 苏建徽, 沈玉梁 太阳能光伏并网发电系统研究[期刊论文]-电工技术学报 2005(5)
3. 张伯泉, 杨宜民, 陈华, 刘志煌 基于遗传算法的风/光互补发电系统的优化设计[期刊论文]-仪器仪表学报 2006(z3)
4. CASADEI D;GRANDI G;ROSSI C Single-phase singlestage photovoltaic generation system based on a ripple correlation control maximum power point tracking 2006(02)
5. 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 王健, 刘树 单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[期刊论文]-中国电机工程学报 2006(6)
6. 韦世宽, 雷加, 谈恩民, 王冬 光伏系统最大功率点跟踪技术研究[期刊论文]-电子测量与仪器学报 2011(6)
7. 郑诗程, 刘伟, 葛芦生 具有MPPT功能的太阳能光伏充电系统研究[期刊论文]-电子测量与仪器学报 2008(3)
8. JAIN S, AGARWAL Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to singlestage grid-connected photovoltaic systems 2007(05)
9. PATEL H;AGARWAL V MPPT scheme for a PV-fed single-phase single-stage grid-connected inverter operating in CCM with only one current sensor 2009(01)
10. LEYVA R;ALONSO C;QUEINNEC I MPPT of photovoltaic systems using extremum-seeking control 2006(01)
11. ROTEA M A Analysis of multivariable extremum-seeking algorithms 2000
12. Yaoyu Li;Mario A. Rotea;George T.-C. Chiu;Luc G. Mongeau;In-Su Pack Extremum Seeking Control of a Tunable Thermoacoustic Cooler[外文期刊] 2005(4)
13. BRUNTON S L;ROWLEY C W;KULKARNI S R Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum-seeking control 2010(10)
14. Trishan Eswam;Jonathan W. Kimball;Philip T. Krein;Patrick L. Chapman;Pallab Midya Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays Using Ripple Correlation Control[外文期刊] 2006(5)
15. Kimball J. W.;Krein P. T. Discrete-Time Ripple Correlation Control for Maximum Power Point Tracking[外文期刊] 2008(5)
16. 崔开涌, 陈国呈, 张翼, 俞俊杰 光伏系统最大功率点直接电流跟踪策略[期刊论文]-电力电子技术 2008(9)
17. 周印华, 王亚楠, 吴伟才, 田文晶 基于LabVIEW的光伏I-V测试系统的设计与应用[期刊论文]-仪器仪表学报 2006(z3)
18. WU T U;CHANG C H;Lin L C Power loss comparison of single-phase and two-stage grid-connected photovoltaic systems 2011(02)
19. HO B MT;CHUNG S H;HUI S Y R An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems 2005(04)
20. Soeren Baekhoej Kjaer;John K. Pedersen;Frede Blaabjerg A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules[外文期刊] 2005(5)
21. 李益国, 沈炯 基于极值搜索控制的电站锅炉在线燃烧优化[期刊论文]-热能动力工程 2009(4)

引证文献(7条)

1. 陈增禄, 王宁, 孟新新, 高洁 低频相位扰动法在多机并联系统中的孤岛检测研究[期刊论文]-电子测量技术 2015(04)

2. [赵锋, 王朋, 王朝, 班钰](#) [一种级联多电平光伏逆变器的Matlab仿真研究](#)[期刊论文]-[机电产品开发与创新](#) 2015(01)
3. [孔德政](#) [光伏分布式发电中的逆变系统设计](#)[期刊论文]-[电子测试](#) 2013(14)
4. [李智, 赵伟, 周涛, 范胜林, 刘建业](#) [基于IEC 61850的避雷器监测IED的数据通信研究](#)[期刊论文]-[电子测量技术](#) 2015(3)
5. [于晶荣, 陈莎, 张旺, 王一军, 程美红](#) [单相单级光伏系统的二次功率扰动抑制策略](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2014(02)
6. [欧少敏, 何志毅](#) [太阳能光伏辅助市电供电系统](#)[期刊论文]-[国外电子测量技术](#) 2015(06)
7. [魏尧东, 雷电, 周勤利](#) [基于面向对象方法的IEC 61850光伏逆变器的建模](#)[期刊论文]-[电子测量技术](#) 2014(02)

引用本文格式: [于晶荣, 曹一家, 何敏, 邹勇军, 陈莎, Yu Jingrong, Cao Yijia, He Min, Zou Yongjun, Chen Sha](#) [单相单级光伏逆变器最大功率点跟踪方法](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2013(1)