

Research on MPPT for Photovoltaic Power Generation System Based on the Improved SGD-CMA Algorithm

Wen Qian, Mingming Dai, Yuhu Li

State Grid Anhui Bozhou Power Supply Company, Bozhou Anhui
Email: 76558263@qq.com

Received: Dec. 6th, 2016; accepted: Dec. 20th, 2016; published: Dec. 23rd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, the SGD-CMA algorithm is proposed in MPPT control for the photovoltaic power generation systems. However, the convergence rate of SGD-CMA algorithm is slow. To solve this problem, wavelet SGD-CMA algorithm is proposed. A simulation model for the photovoltaic cell is set up to analyze the PV curve under the different condition of temperature, and illumination. The simulation results have shown that the improved algorithm can get more stable output power, and the reliability of the system is increased.

Keywords

SGD-CMA Algorithm, Wavelet Algorithm, MPPT, Disturbance Observation Method

基于改进SGD-CMA算法的光伏发电系统MPPT控制设计研究

钱文, 戴明明, 李玉虎

国网安徽省电力公司亳州供电公司, 安徽 亳州
Email: 76558263@qq.com

收稿日期: 2016年12月6日; 录用日期: 2016年12月20日; 发布日期: 2016年12月23日

文章引用: 钱文, 戴明明, 李玉虎. 基于改进 SGD-CMA 算法的光伏发电系统 MPPT 控制设计研究[J]. 电气工程, 2016, 4(4): 195-200. <http://dx.doi.org/10.12677/jee.2016.44025>

摘要

本文基于SGD-CMA算法对光伏发电系统中MPPT控制,并针对SGD-CMA算法收敛速度的缺点提出了基于小波算法的光伏发电系统MPPT控制设计方案。本文搭建了光伏电池的仿真模型模拟分析了光伏阵列在温度、光照变化情况下的功率输出特性,仿真结果显示改进后的扰动观测法会获得更稳定的电压和功率输出,系统的可靠性增加。

关键词

SGD-CMA算法, 小波算法, 最大功率点跟踪技术(MPPT), 扰动观测法

1. 引言

在 20 世纪及其之前的时间里的世界能源结构之中,石油、天然气和煤气占据了人类所用能源的绝对主导地位。但自从进入 21 世纪之后,人口的急剧上升和生活水平的大幅度提高使我们不得不在保留现有资源的基础上开发新的能源。在新时代的潮流中,太阳能光伏发电正在日渐成为最有可持续发展前景的可再生资源发电技术[1][2]。

太阳能的不可预知性和波动性大导致了光伏发电系统的电能输出具有间歇性的特点,如果要是光伏发电系统一直提供较大恒定功率,那么为了维持其输出的稳定性就需要安装大容量的储能系统,但是高昂的系统建设费用和开发成本都提高很多,对于光伏发电的推广建设有弊无利[3]。因此,为了减少实际工程中光伏电池作为电源发电的阻力,需要对光伏发电系统采取功率调整控制策略,从而尽量保持系统持续处于在最大功率输出的运行状态中[4]。目前,在最大功率跟踪方面的算法主要有扰动观测法、电导增量法和恒定电压法等。扰动观测法是一种简单实用的方法,但其扰动的范围较大,快速性比较差。恒定电压法是一种简化的最大功率跟踪控制方法,该方法实现比较简单,但不能根据当前的环境状况对输出电压进行调整,不能实时追踪最大功率点。电导增量法是根据光伏阵列的瞬时电导及电导的变化量来调整光伏阵列的输出电压,跟踪最大功率点。电导增量法需要有精确的数学模型才能准确锁定最大功率点,而实际中要得到光伏输出特性的精确模型很难实现[5][6][7]。

针对已有最大功率点跟踪技术(Maximum Power Point Tracking, MPPT)算法存在的不足,本文提出一种基于小波变换的光伏发电系统 MPPT 控制改进算法,通过对扰动观测法进行改进达到提高其算法的收敛速度的目的。

2. 光伏系统最大功率跟踪的原理

MPPT 是利用控制方法来使光伏电池达到它的最佳的输出状态,使得光能最大效率的向电能变化。目前广泛使用的算法是具有自寻优类的扰动观测法。扰动观测法采用的步进搜索的方法。当负载的特性与光伏电池的输出特性交于 MPP 点左侧时,扰动观测法会将交点处电压升高;当负载的特性与光伏电池的输出特性交于 MPP 点右侧时,扰动观测法会将交点处电压降低,持续不断这样的过程,反复进行输出电压扰动,最终会使系统保留在最大功率点的附近,原理如图 1 所示。

扰动观测法控制的优点主要在于操作简单,在最大功率追踪中有很高的使用频率。但缺点却也比较明显,就是震荡和误判问题。因为对于光伏电池来说,外部环境因素是不断变化的,所以 $P-V$ 输出特性也具有时变性。当外部因素快速变化时,这个 MPPT 控制方法可能会发生误判,造成电流波形的失控。

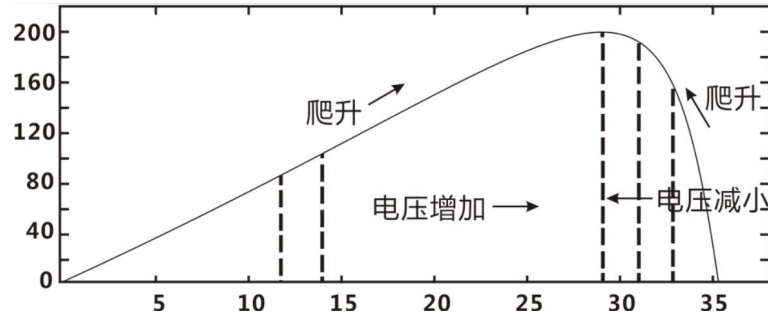


Figure 1. Schematic diagram of disturbance observation method
图 1. 扰动观察法原理图

另一方面，这种算法的实际工作点是在 MPP 附近不断进行小幅震荡，造成了功率的损失和效率的下降。所以更好的方案还是当实际工作点距离 MPP 点较近时，控制器能减小步长，这样同时也能提高精度。

3. 自适应 SGD-CMA 算法

自适应随机梯度恒模算法(SGD-CMA) 算法常用在自适应信号处理中，设权重的初始向量为 $\mathbf{w}(0)$ ，沿均方误差函数减小的方向得到最佳权向量 \mathbf{w}_{opt} ， ξ 减小最快的方向作为负梯度方向，其递推公式为

$$\xi = E \left\{ |e(n)|^2 \right\} \quad (1)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \nabla_{\mathbf{w}} \xi \quad (2)$$

式(2)中， $\nabla_{\mathbf{w}}$ 表示为 ξ 的梯度函数， μ 为控制算法收敛速度的步长因子(取常数)，其中均方误差性能函数的梯度表达式为

$$\nabla_{\mathbf{w}} \xi = 2\mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} - 2\mathbf{R}_{xd} \quad (3)$$

其中 \mathbf{R}_{xx} 为输入信号的协方差矩阵， \mathbf{R}_{xd} 为输入信号与参考信号之间的协方差矩阵，用 $\hat{\nabla}_{\mathbf{w}} \xi$ 来代替梯度 $\nabla_{\mathbf{w}} \xi$ ， $\hat{\nabla}_{\mathbf{w}} \xi$ 的表达式为

$$\hat{\nabla}_{\mathbf{w}} \xi = \nabla_{\mathbf{w}} |e(n)|^2 = -2e^*(n) \mathbf{x}(n) \quad (4)$$

故得算法的递推公式表达式为

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - 2\mu e^*(n) \mathbf{x}(n) \quad (5)$$

为保证算法收敛令 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ ，且 λ_{\max} 是 \mathbf{R}_{xx} 中的最大特征值。为了提高 SGD-CMA 算法的收敛速度，可以将误差由输出信号的模值与期望信号的模值之差构成，其代价函数的一般形式为

$$\xi(\mathbf{w}) = E \left\{ \left| \mathbf{w}^H \mathbf{x} \right|^p - |\alpha|^p \right|^q \} \quad (6)$$

式(6)中 α 为信号幅度，参数 p 和 q 的值分别为 1 或 2，取值不同的 p 和 q 可形成不同的 (p, q) 恒模算法。对于 $\alpha = 1, p = 1$ 和 $q = 2$ ，可得到 SGD-CMA 的迭代公式表达式为

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{w}^H(n) \mathbf{x}(n) \quad (7)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu e^*(n) \mathbf{x}(n) \quad (8)$$

$$e(n) = \frac{2\mathbf{y}(n)}{|\mathbf{y}(n)|} (|\mathbf{y}(n)| - 1) \quad (9)$$

因此 SGD-CMA 算法的收敛速度与步长因子的大小之间有密切的关系。在小步长时的收敛速度变慢了；而且 SGD-CMA 算法在大步长时有较快的收敛速度和较好的跟踪能力。对于收敛速度、跟踪能力和稳态失调之间的矛盾可以采用变步长 SGD-CMA 算法解决这方面的问题。 μ 值变大可以加快收敛速度和波束形成系统的跟踪速度；当权系数接近最佳系数时， μ 值变小以获得系统的稳态性。

4. 基于小波算法的变步长 MPPT 控制

固定步长的扰动观测法在选择步长的时候，较小的步长会提高系统的精度，让追踪的功率点更精确，但因为步长较小所以需要更多的计算，速度降低，计算量加大；较大的步长会加快整个计算进程，占用系统更小的内存空间。但实际上太阳能的不可预知性和波动性大导致了光伏发电系统的电能输出具有间歇性的特点，使得当固定步长的 SGD-CMA 算法的收敛速度变慢。而经过正交小波变换后接收到的信号 $x(n)$ 变成奇异矩阵，再进行 SGD-CMA 算法处理，可以进一步提高算法的辨别力和收敛速度，小波变步长 MPPT 控制模型如图 2 所示。

由小波多分辨分析理论可知迭代公式的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{r}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_j & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{I} \end{bmatrix} \times \cdots \times \begin{bmatrix} \mathbf{W}_2 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \times \mathbf{W}_1 \times \mathbf{x}(n) \\ \mathbf{y}(n) = \mathbf{w}^H(n) \mathbf{r}(n) \\ \mathbf{e}(n) = \frac{2\mathbf{y}(n)}{|\mathbf{y}(n)|} (|\mathbf{y}(n)| - 1) \\ \mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu(n) \mathbf{r}(n) \mathbf{e}^*(n) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中第 j 级小波分解对应的矩阵 $2^{j-j+1} \times 2^{j-j+1}$ (J 为分解层数) \mathbf{W}_j ($j=1, 2, \dots, J$) 为:

$$\mathbf{W}_i = \begin{bmatrix} h_k & \cdots & h_{2k-1} & 0 & \cdots & 0 & h_0 & \cdots & h_{k-1} \\ h_{k-2} & \cdots & h_{2k-3} & h_{2k-2} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & h_{k-3} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ h_{k+2} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & h_1 & h_2 & \cdots & h_{k+1} \\ g_k & \cdots & g_{2k-1} & 0 & \cdots & 0 & g_0 & \cdots & g_{k-1} \\ g_{k-2} & \cdots & g_{2k-3} & g_{2j-2} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & g_{k-3} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ g_{k+2} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & g_1 & g_2 & \cdots & g_{k+1} \end{bmatrix}$$

原接收信号通过小波滤波器 $h(k)$ 和尺度滤波器 $g(k)$ 被分解为低频分量和高频分量，从而减小了信号的相干性，提高自适应信号处理的速度，又由于 \mathbf{W}_i 为稀疏矩阵，使得接收信号经过小波变换后 $\mathbf{r}(n)$ 也变为稀疏矩阵，并具有正交化特点，使 SGD-CMA 算法的收敛速度得到提高，也使得扰动观测法的收敛速度提高。

5. 仿真实验

(1) 温度恒定，光照突变时不同步长对系统输出功率的影响

保持 $T = 25^\circ\text{C}$ 不变，选择在 $t = 4\text{ s}$ 的时候给系统一个太阳光照射强度从 1000 w /突然变化向 400 w /的时候，对比步长为 0.001 和改进后的变步长的两个光伏电池输出功率曲线对比比如图 3 所示。

(2) 辐照度恒定，温度突变时不同步长对系统输出功率的影响

保持 $G = 1000 \text{ w/不变}$ ，选择在 $t = 4 \text{ s}$ 的时候给系统一个环境温度 T 从 $T = 15^\circ\text{C}$ 突然变化向 $T = 30^\circ\text{C}$ 的时候，对比步长为 0.001 和改进后的变步长的两个光伏电池输出功率曲线对比如图 4 所示。

由图 3、图 4 可知在固定步长时候，系统趋于稳态之后依然有很大的震荡，造成大量能量的浪费，并且光伏电池输出功率的平均值是低于改进后的电池输出功率平均值的。改进后的变步长输出功率在虽然在很短的时间内有很大的震荡，这个震荡可能影响系统的稳定性，但系统迅速趋于稳态，而且完全没有震荡。

6. 小结

在太阳能发电系统实时运转的时候，我们总希望光伏电池能在最高效的状态下运行，所以就需要我们适时变动光伏阵列的输出功率的最大值点。但输出功率的最大值点受到温度、光照等因素的影响，因此根据实时的温度和光照对光伏阵列的最大功率进行跟踪控制，对有效利用光伏新能源具有重要的意义。通过分析不同的步长因子对自适应 SGD-CMA 算法收敛速度的影响，将小波算法与 SGD-CMA 自适应算

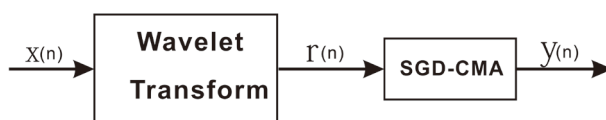


Figure 2. Improved algorithm of wavelet transform
图 2. 小波变步改进算法模型

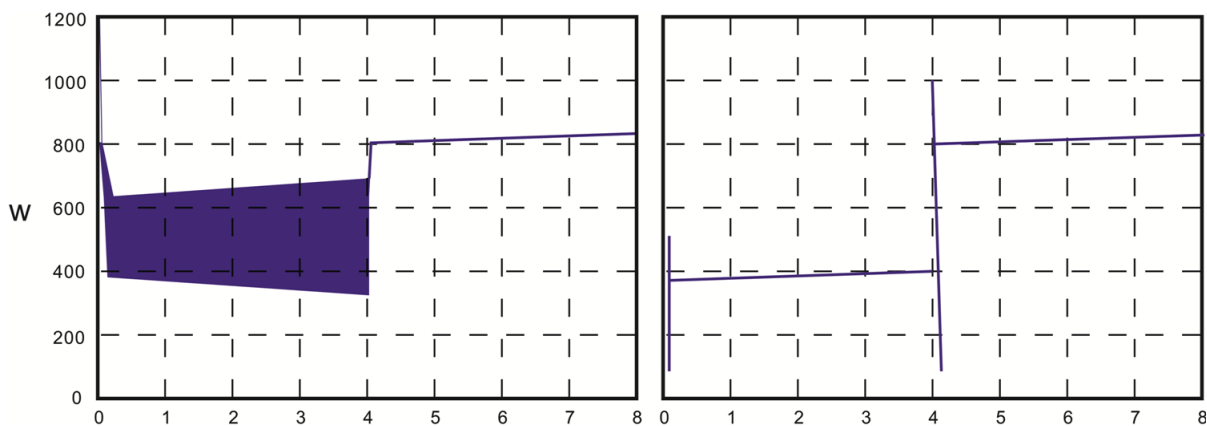


Figure 3. Output power curves of step size 0.001 and variable step size
图 3. 步长为 0.001 和改进后的变步长的两个光伏电池输出功率曲线

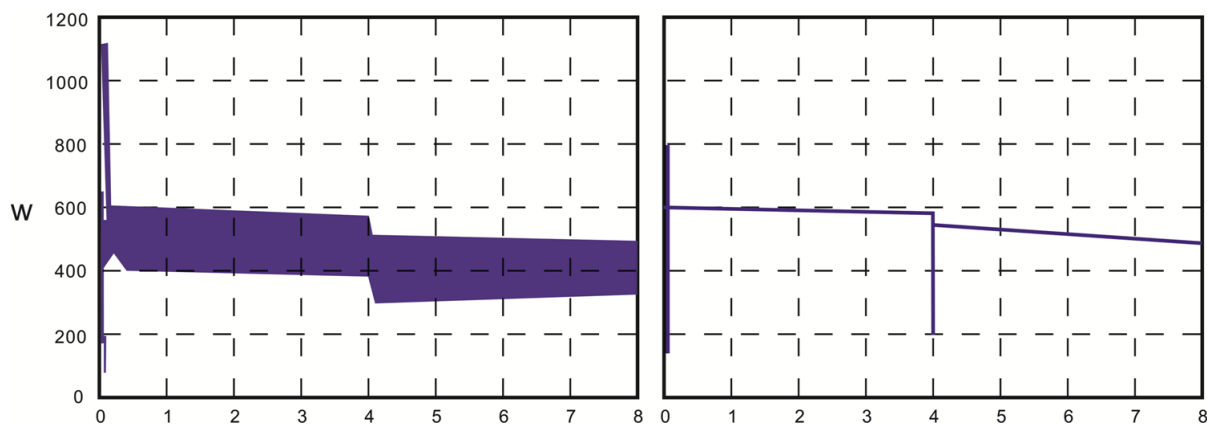


Figure 4. Output power curves of step size 0.001 and variable step size
图 4. 步长为 0.001 和改进后的变步长的两个光伏电池输出功率曲线

法相结合,提高了算法的收敛性,并将该算法应用与光伏发电系统 MPPT 控制系统。仿真表明改进后的扰动观测法会获得更稳定的电压和功率输出,系统的可靠性增大。

参考文献 (References)

- [1] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.
- [2] Chang, Y.A. and Moura, S.J. (2009) Air Flow Control in Fuel Cell Systems: An Extremum Seeking Approach. *American Control Conference*, St. Louis, 10-12 June 2009, 1052-1059.
- [3] 朱拓斐, 陈国定. 光伏发电中 MPPT 控制方法综述[J]. 电源技术, 2011, 35(10): 1322-1324.
- [4] Hussein, K.H., Muta, I., Hoshino, T. and Osakada, M. (1995) Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions. *IEE Proceedings—Generation Transmission and Distribution*, **142**, 59-64. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19951577>
- [5] 朱健. 一种改进的基于恒定电压法的光伏电池最大功率点跟踪方法[J]. 电子技术与软件工程, 2016, 1(3): 248-249.
- [6] 熊远生, 俞立, 徐建明. 固定电压法结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 85-88.
- [7] 叶满园, 官二勇, 宋平岗. 以电导增量法实现 MPPT 的单级光伏并网逆变器[J]. 电力电子技术, 2006, 40(2): 30-32.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org