

光伏最大功率点跟踪控制策略研究

张 崇*, 王玉峰

(辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁鞍山 114000)

摘 要: 针对传统的扰动观察法在光伏最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制中存在着响应速度慢,难以在最大功率点保持平稳等问题,提出了一种假设法并对传统的粒子群算法提出一种改变惯性权重、学习因子的自适应粒子群算法来实现全局最大功率点跟踪。假设法主要是通过公式假设出最大功率点,基于最大功率点位置进行步长的改进。IPSO算法主要是调整传统粒子群算法的参数、优化粒子的搜索顺序、减少迭代次数。通过MATLAB/SIMULINK软件对其建模仿真,得到了假设法还有IPSO算法的仿真结果,并与传统的算法作了对比。结果表明,采用假设法还有IPSO算法都能够实现光伏最大功率点跟踪的精确控制,有助于光伏系统最大功率点跟踪技术的快速实现,具有较好的应用前景。

关键词: 光伏发电;假设法;自适应粒子群算法;自适应参数

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)04-0303-08

Research on Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control Strategy

ZHANG Chong, WANG Yufeng

(School of Electronics and Information Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan Liaoning 114000, CHN)

Abstract: Aiming at the problems of the traditional disturbance observation method in photovoltaic MPPT control, such as slow response speed and difficulty in maintaining stability at the maximum power point, a hypothesis method was proposed and an adaptive particle swarm optimization algorithm with changing inertia weight and learning factor was proposed for the traditional particle swarm optimization algorithm to achieve global maximum power point tracking. The assumption method mainly assumed the maximum power point through the formula, and improved the step size based on the position of the maximum power point. IPSO algorithm mainly adjusted the parameters of traditional particle swarm optimization algorithm, optimized the search order of particles, and reduced the number of iterations. Through the modeling and simulation of MATLAB/SIMULINK software, the simulation results of the hypothesis method and IPSO algorithm were obtained and compared with the traditional algorithm. The results showed that both the hypothetical method and IPSO algorithm could achieve the accurate control of PV MPPT, which was helpful for the rapid realization of PV MPPT

收稿日期:2022-05-09

作者简介:张 崇(1998—),男,硕士,主要研究领域为新能源发电;(E-mail:www.592380063@qq.com)

王玉峰(1981—),男,博士,主要研究领域为电磁兼容。

* 通讯作者

technology and had a good application prospect.

Key words: photovoltaic power generation; prediction method; IPSO algorithm; adaptive parameter

引 言

我国目前大力发展新能源,其中光伏发电已成为当前最热门的研究方向,太阳能在光伏领域里运用的越来越广泛。光伏电池的 P - V 关系拥有一种非线性的特性,光照的强度还有环境的温度都可以影响到它的输出功率,因此为了让光伏电池的输出功率可以在最大功率工作点稳定,提升光伏电池光能转换为电能的效率,学者们在光伏发电系统中研究并提出了最大功率点跟踪技术(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。

最大功率跟踪技术有很多的方法,比较传统普通的办法就是电压恒定法^[1],观察扰动法^[2],增量电导法^[3],以及改进的扰动观察法^[4]。对于 MPPT 技术而言,国内外的学者们提出的扰动观察法因为其操作简单,实用性强被电网等领域广泛使用。但是扰动观察法的步长是固定的,很难追踪到最大功率点,会在其左右来回震荡。文献[5]将扰动观察法与牛顿差值法相结合提出一种复合的控制策略,根据牛顿差值法得到的近似曲线追踪到最大功率,提高了追踪速度,但精度问题还没有很好地解决。传统的算法虽然操作简单,但只适用于光照均匀的情况,当多阴影出现多峰的情况下就会出现局部最优,跟踪不到最大功率点。因此提出了许多改进的智能优化算法都可以通过改进参数的设置进而跟踪到最大功率点,如海鸥算法^[6],蜉蝣算法^[7],蝴蝶算法^[8],猫群算法^[9],细菌觅食算法^[10],麻雀算法^[11]等等。粒子群算法目前使用较为广泛,因为粒子群算法的参数少,易控制。但是标准的 PSO 粒子群算法虽然可以跟踪到最大功率点,但所需要的时间较长且出现震荡不稳定。文章提出了假设法还有 IPSO 算法对其进行优化,不仅可以提高追踪速度还可以提高精度。

1 光伏电池的输出特性

1.1 正常光照下的光伏电池输出特性

光伏阵列是一种可以直接把太阳能转换成电能的装置^[12],是组成光伏发电系统非常重要的一部

分,其功率输出性能直接关系到整个光伏发电系统的运行效率。光电效应的原理就是当太阳光照射在物体上时,改变了物体内部的电荷遍布状态,然后使之产生了电动势还有电流。对光伏电池的电路进行等效替换的模型如图 1 所示。

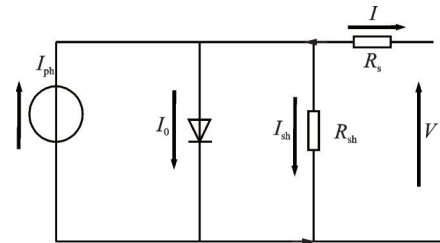


图 1 光伏电池等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of photovoltaic cell

光伏电池的特性方程可以表示为:

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left\{ \exp \left[\frac{q \times (V + I \times R_s)}{n \times K \times T} \right] - 1 \right\} - I_{sh} \quad (1)$$

上述方程中:光电效应产生的光生电流为 I_{ph} ;二极管反向的饱和电流为 I_0 ;电子的电荷量为 q ;光伏电池并联的电阻为 R_{sh} ;光伏电池串联上的电阻为 R_s ;玻尔兹曼常数为 K ;二极管的特性因子为 n (大多已知);光伏电池的温度表示为 T 。文中光伏电池的参数为 $U_{oc}=32.9$ V, $I_{sc}=8.21$ A, $V_{max}=26.4$ V, $I_{max}=7.58$ A,图 2 是利用 MATLAB 搭建的光伏电池模型仿真图。

基于上述光伏电池的基本原理图还有等效电路图,可以通过仿真得到不同的环境温度还有不同的光照强度条件下光伏电池 P - V 曲线如图 3、图 4 所示。

在图 4 可以发现在光照强度不变时,温度越高则光伏电池输出的最大功率越小,反之则光伏电池输出的最大功率也越大。

1.2 多阴影多峰情况下的光伏电池输出特性

局部遮阴现象很常见^[12]。因为大部分太阳能光伏组件都安装在建筑顶端,所以这些光伏组件很容易就会被云彩、雪花、大树、树叶等东西局部遮挡。局部遮阴最恶劣的情况会产生热斑效应,是发电过程中的重要隐患。文章把 3 个光伏电池串联起来,光

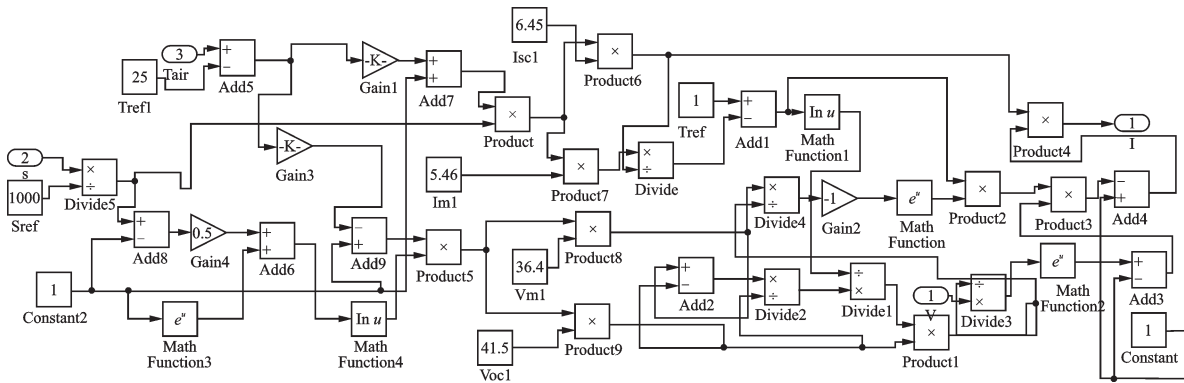


图2 光伏电池模型原理图

Fig.2 Schematic of photovoltaic cell model

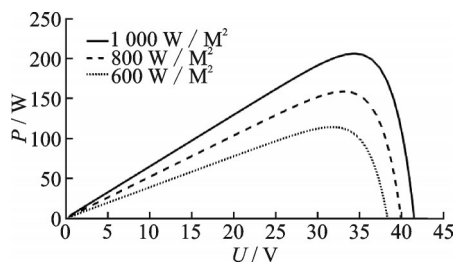


图3 不同光强的P-U曲线

Fig.3 P-U curves of different light intensities

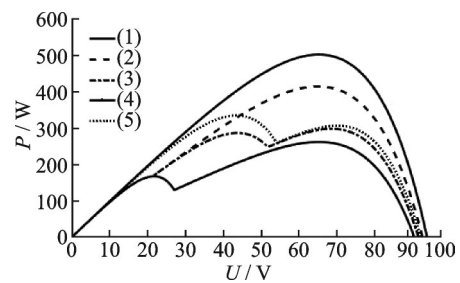


图5 多峰值光伏阵列P-U曲线

Fig.5 P-U curves of multi-peak photovoltaic array

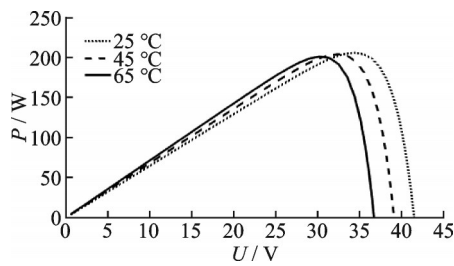


图4 不同温度下的P-U曲线

Fig.4 P-U curves at different temperatures

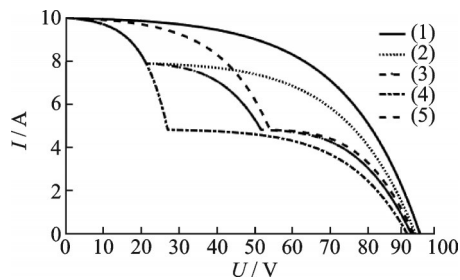


图6 多峰值光伏阵列U-I曲线

Fig.6 U-I curves of multi-peak photovoltaic array

照强度分别为 500 W/M^2 , 800 W/M^2 , 1000 W/M^2 , 见表1。

表1 局部阴影情况

Tab.1 Partial shadow situation

遮阴情况	各部分光照强度/($\text{W}\cdot\text{M}^{-2}$)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
PV_1	1000	1000	1000	1000	1000
PV_2	1000	800	800	500	1000
PV_3	1000	800	500	500	500

多阴影下光伏阵列的P-U曲线如图5所示,U-I曲线如图6所示。

从图5和图6里很容易看出改变光强会使光伏阵列产生多个峰值点。处于局部阴影情况下,想要跟踪到光伏功率最大点,传统普通的单峰值追踪最

大功率点的算法(观察扰动法和增量电导法)就无法使用了,因为这样会导致最后追踪到局部极值点,无法追踪到功率最大点,从而消耗功率。

2 光伏电池的MPPT控制策略

2.1 光照均匀下的假设法

影响扰动观察法寻优效率还有精准度的最大因素就是扰动观察法选取的步长,如果步长选取过大,使迭代的次数可能会减小,大大的缩短了寻优的时间,但这样会出现三电平扰动现象,会在最大功率点附近震荡,幅度较大,并且相距最大功率点位置过大。如步长选取过小,虽然可以跟踪到功率最大点,但寻优的过程极为缓慢,需要很久才能搜

寻到最大点,并且在上升寻优的过程里,会使光伏系统消耗大部分能量,所以选择合适的步长是改进的关键。扰动观察法中之所以步长难控制是因为它对MPP的位置是未知的。为此文章提出了一种假设法,这个方法首先找到一个工作点电压 U_A ,然后给它一个较大的扰动得到工作点电压 U_B ,再通过公式(3)、(4)求出假设的最大功率点电压 U_{YMPP} ,接着通过压差角 θ 来控制步长大小的选取。图7为改进扰动观察法步长的原理图。

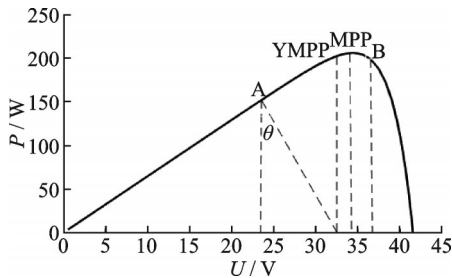


图7 光照均匀假设法原理图

Fig.7 Principle diagram of uniform illumination assumption method

$$U_A' = \left(\frac{2U_A + U_B}{2} \right) \tag{3}$$

$$U_{YMPP} = \left(\frac{2U_A' + U_B}{3} \right) \tag{4}$$

$$\tan \theta = \left(\frac{U_{YMPP} - U_A}{P_A} \right) \tag{5}$$

式中的 $\tan \theta$ 为压差角, U_{YMPP} 通过式(3)、(4)得到,设补偿系数为 K_A :

$$K_A = \tan \theta \tag{6}$$

求出补偿系数后不断迭代追踪到最大功率点

$$\begin{cases} U_2 = U_1 + K_A \times \Delta U \\ U_3 = U_2 + K_A \times \Delta U \\ U_n = U_{n-1} + K_A \times \Delta U \end{cases} \tag{7}$$

$$U_{MPP} \approx U_n \tag{8}$$

假设法的步长会不断的更新,光伏发电系统实际的工作点如果离假设的最大功率点越远,步长 K_A 就会越大,反之步长 K_A 就会越小,防止超过最大功率点电压。假设法的流程图如图8所示。

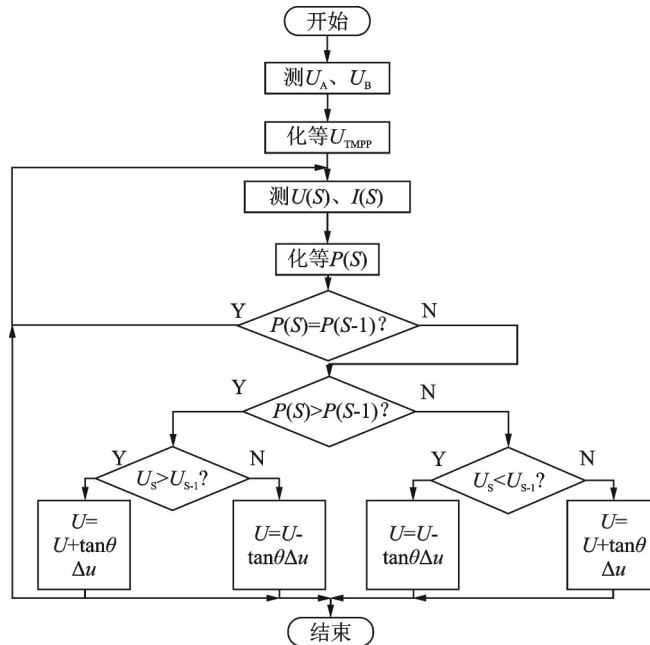


图8 假设法的流程图

Fig.8 Flowchart of the prediction method

2.2 光强变化的假设法

当光强变化时就会出现误判的情况。太阳光在一整天的照射中,光照的强度还有环境温度都是不断改变的,这就会导致 $P-U$ 特性曲线发生变化,如图9所示,最先是红色曲线,此时工作点处于A

点,电压为 U_A ;如果突然间光照强度发生变化,曲线就会变成蓝色曲线,如果此时应用传统的扰动观察法,电压应该继续扰动,正常情况下功率点应该处于B点,此时电压值为 U_B ,但由于功率曲线发生变化,此时真实的功率点应该为C点。但是 $P_C < P_A$ 就会使得扰动往相反的方向移动,即向着功率变小的

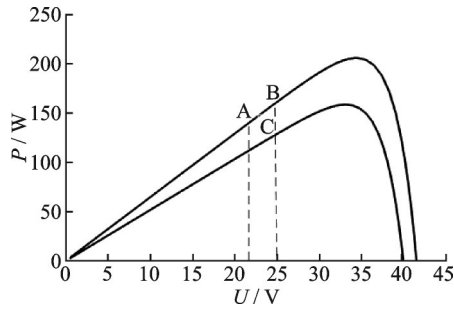


图9 多峰值误判情况

Fig.9 Multi-peak misjudgment situation

方向扰动,导致误判,使得跟踪失效。

图10和图11为光强突然变化的情况,当光照强度发生变化, U_{YMPP} 仍然通过式(3)、(4)计算得到,但是光强变化时补偿系数也随之改变。

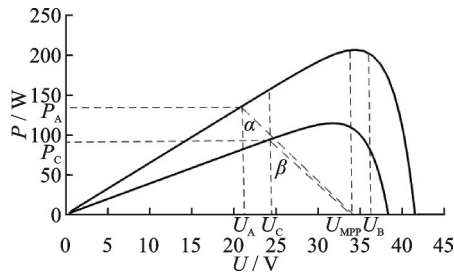


图10 光强下降假设法原理图

Fig.10 Schematic of light intensity drop prediction method

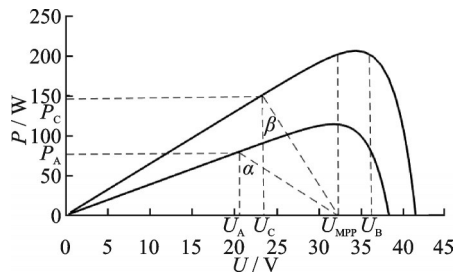


图11 光强上升假设法原理图

Fig.11 Schematic of light intensity rise prediction method

此时

$$\tan\alpha = \frac{U_{YMPP} - U_A}{P_A} \quad (9)$$

$$\tan\beta = \frac{U_{YMPP} - U_A}{P_C} \quad (10)$$

补偿系数 K_A 为:

$$K_A = (U_{YMPP} - U_a) \times (\tan\alpha - \tan\beta) \quad (11)$$

此时应该先求得A点对应的功率 P_A 还有光强变化时扰动到C点的功率 P_C , 然后通过公式(11)求出补偿系数 K_A 。算法流程图如图12所示。

光强变化时假设法的关键就是先求出假设的

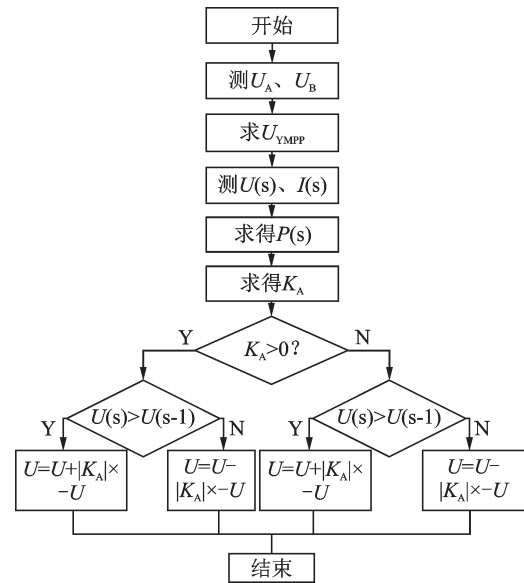


图12 光照强度变化下假设法算法流程图

Fig.12 The flow chart of the prediction method with the change of light intensity

最大功率点电压 U_{YMPP} , 再通过压差角 $\tan\alpha$ 和 $\tan\beta$ 来求出步长补偿系数 K_A , 扰动的步长随着光伏系统工作点的改变而变动, 补偿系数 K_A 越大步长越大, 补偿系数 K_A 越小步长越小, $K_A > 0$ 时说明光强突然下降, $K_A < 0$ 时说明光强突然上升。通过这种方法可以更快速准确地追踪到功率最大点, 可以解决光强变化出现的误判现象。

3 假设法的仿真分析

图13是用MATLAB/SIMULINK软件对假设法进行建模仿真。

3.1 光照均匀时假设法仿真对比分析

从图14及图15可以看出, 假设法大约0.03 s就可以搜索到功率最大点, 而扰动观察法大约0.8 s才能达到, 由此可见光照均匀时假设法比传统的方法搜索的更快并且更加的稳定, 所以改进的假设法是可行的。

3.2 光照变化时假设法仿真对比分析

从图16及图17中分析得到, 在外界的光照强度变化时, 传统的算法会受到影响, 假设法用了大约0.045 s左右就可以趋于稳定, 扰动观察法用时0.082 s左右趋于稳定, 假设法在光强变化的条件下

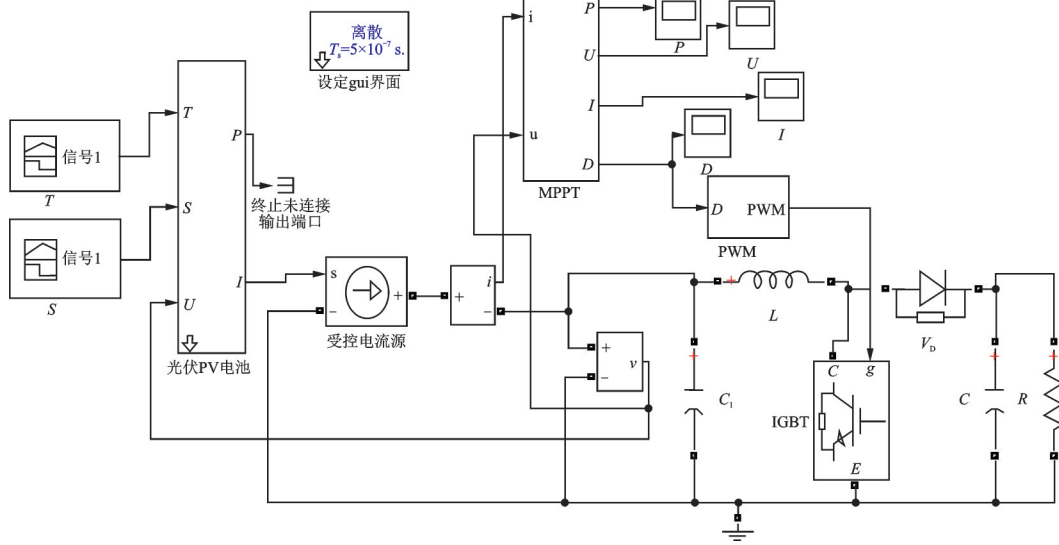


图 13 假设法仿真图

Fig.13 Simulation diagram of prediction method

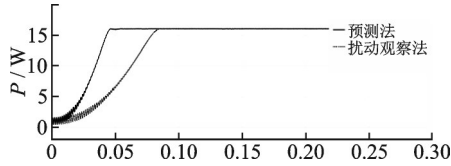


图 14 光照均匀时假设法与扰动观察法功率对比图

Fig.14 The power comparison between the prediction method and the disturbance observation method when the light is uniform

寻优速度很快,它的搜寻速度明显比传统的扰动观察法快得多,由此说明改进步长的假设法效果很明显,验证了该算法的可行性。

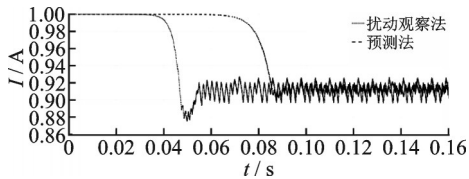


图 15 光照均匀时假设法与扰动观察法电流对比图

Fig.15 The current comparison of prediction method and disturbance observation when the light is uniform

4 改进参数的 IPSO 算法

4.1 标准 PSO 算法

PSO 算法是一种智能优化算法, PSO 算法通过设计一种无质量的粒子来模拟鸟群中的鸟,粒子只有两个属性:速度和位置。每一个粒子在区域内先独自寻找最优解,找到的最优解就记作个体最优解,然后把自己的最优解和所有其他的粒子进行分享,进而找到最优的个体最优解当作群体最优解。

4.2 改进参数 IPSO 算法

传统的 PSO 算法虽然可以搜索到最大功率点,但搜索的时间比较长,而且易震荡不稳定,精度差。文中引进自适应动态的惯性因子 ω , 还有学习因子 c_1, c_2 。前期增大它全局搜索的能力,后期对它的全局搜索能力减小,增大它局部搜索能力来避免收敛慢的问题:

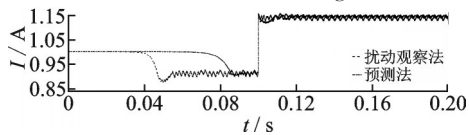


图 16 光照变化时假设法与扰动观察法电流对比图

Fig.16 Comparison of the current between the prediction method and the disturbance observation method when the light changes

$$\omega = \omega_{\max} \left(1 - \frac{K}{N} \right) \quad (12)$$

文章通过非线性单调递减的指数函数来改进自我学习因子 c_1 , 采用非线性递增的对数函数来改进群体认知的学习因子 c_2 。

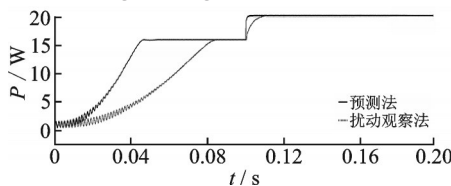


图 17 光照变化时假设法与扰动观察法功率对比图

Fig.17 The power comparison between the prediction method and the disturbance observation method when the light changes

$$c_1 = c_{1\max} \times e^{\frac{K}{N}} \quad (13)$$

$$c_2 = (c_{2max} - c_{2min}) \times \left(\ln \left(1 + \frac{K}{N} \right) \right) \quad (14)$$

N 为迭代的总次数, K 为迭代第几次。改进后的参数可以使算法的收敛速度更快,更精准。IPSO算法流程图如图18所示。

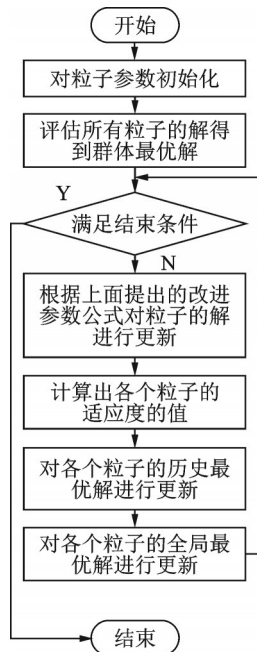


图18 改进参数的IPSO算法流程图

Fig.18 Flow chart of IPSO algorithm with improved parameters

5 实验验证分析

文章采用了MATLAB/SIMULINK对算法进

行验证,用四个光伏电池串联形成的光伏阵列模型对MPPT控制的光伏发电系统进行了建模。仿真实验参数设定的值为:仿真时间3 s,光伏阵列的环境温度25℃,光照强度500 W/M²,800 W/M²,800 W/M²,1000 W/M²,电阻阻值50 Ω,电容0.46×10⁻³F。仿真图如图19所示。

在相同的环境下对传统的PSO算法以及文中提出的自适应IPSO算法的改进参数设定见表2所示。

表2 IPSO算法参数及设定

Tab.2 IPSO algorithm parameters and settings

参数	PSO算法	IPSO算法
ω	0.5	0.4
C_1	1.2	1.2
C_2	1.5	1.2
ω_{min}	—	—
ω_{max}	—	—
C_{1max}	—	—
C_{2max}	—	—
C_{1min}	—	—
C_{2min}	—	—

标准的PSO算法和普通的PSO算法在光伏最大功率追踪系统中仿真图像如图20~21所示。

从传统的PSO算法仿真图像可以看出,虽然可以追踪到光伏阵列的功率最大点,但是它收敛的速度慢,算法搜索震幅也很大,大约1.8 s左右才能跟踪到最大功率点。

改进型自适应参数的IPSO算法在光伏阵列最

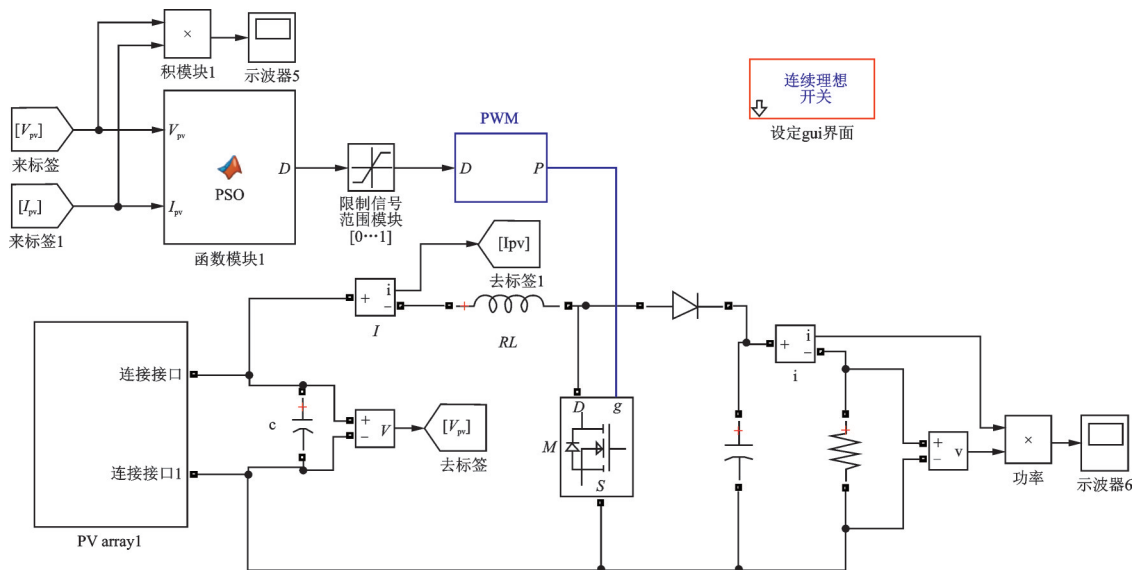


图19 IPSO算法光伏发电系统仿真

Fig.19 IPSO algorithm photovoltaic power generation system simulation

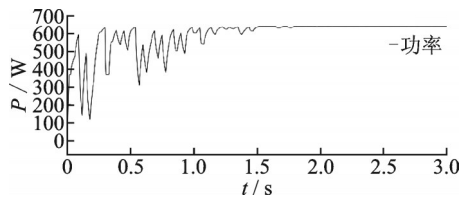


图 20 标准的 PSO 算法光伏最大功率跟踪仿真图像

Fig.20 Photovoltaic maximum power tracking simulation image of standard PSO algorithm

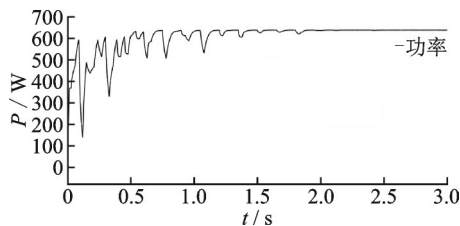


图 21 普通的 PSO 算法光伏最大功率跟踪仿真图像

Fig.21 Photovoltaic maximum power tracking simulation image of common PSO algorithm

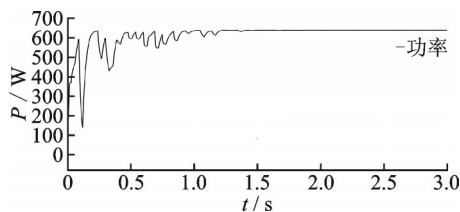


图 22 IPSO 算法光伏最大功率跟踪仿真图像

Fig.22 Photovoltaic maximum power tracking simulation image of IPSO algorithm

大功率跟踪图像如图 22 所示。

从提出的改进参数的 IPSO 算法仿真图像可以看出搜索前期的振幅与传统的 PSO 算法相似,但改进后的算法可以在大约 1.2 s 左右收敛,并且趋于稳定。

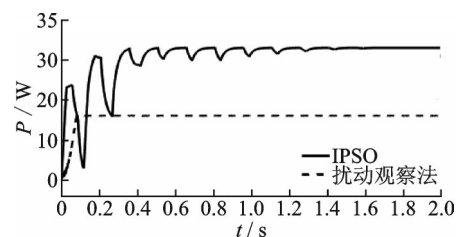


图 23 IPSO 算法与扰动观察法对比图

Fig.23 Comparison of IPSO algorithm and perturbation observation method

图 23 中,从 IPSO 算法与扰动观察法对比可以看出,IPSO 算法可以追踪到最大功率点,而传统的单峰值算法扰动观察法不可以。

从以上的实验仿真验证可以得出,文中提出的

IPSO 算法相较于传统的单峰值算法(扰动观察法),可以跳出局部最优值,光照变化时 IPSO 算法可以搜寻到最大功率点,而扰动观察法只能搜寻到最大功率的一半左右。标准的 PSO 算法还有普通的 PSO 算法大约要 1.8 s 才可以搜寻到最大功率点,而文中提出的 IPSO 算法可以在 1.2 s 左右搜寻到最大功率点并趋于稳定,可以看出 IPSO 算法的搜寻速度相较于标准的 PSO 算法和普通的 PSO 算法明显得到了优化,验证了 IPSO 算法的可行性。

6 结 论

对于单峰值的扰动观察法提出了改进步长的假设法,并与传统的算法做了对比。对于光伏最大功率跟踪系统的多峰值特性,提出了一种改进参数的 IPSO 算法。该算法的优点比较明显,不仅可以追踪到最大输出功率,还提升了收敛速度。从上面的 MATLAB 仿真分析可以看出,文章提出的假设法和 IPSO 算法可以快速准确地跟踪到功率最大点。与传统算法相比,假设法还有 IPSO 的优点是收敛速度更快,响应更好,稳定输出,可以提高光伏发电系统的利用率。

参 考 文 献

- [1] 陈煌林. 基于恒定电压法最大功率点跟踪的改进[J]. 福建电脑, 2013, 29(12): 37-39.
- [2] 牛佳慧, 申凌杰. 基于扰动观察法的光伏电池最大功率跟踪控制[J]. 电工材料, 2021(2): 59-61.
- [3] 孟德越, 任雪维. 基于电导增量法的 MPPT 光伏发电仿真控制研究[J]. 沧州师范学院学报, 2022, 38(1): 107-111+132.
- [4] 陈令军, 戴瑜兴, 全惠敏. 基于改进的扰动观察法在光伏发电 MPPT 中的应用[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 614-616.
- [5] 闫瑞杰, 李海香, 金国文, 等. 基于扰动观察法结合牛顿差值法 MPPT 控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6): 186-192.
- [6] 亓嘉惠, 茹 锋, 吴 琨, 等. 多策略改进海鸥算法及其在光伏 MPPT 中的应用[J]. 电气自动化, 2022, 44(1): 38-40, 43.
- [7] 王艺博. 基于莱维飞行蜉蝣优化算法的光伏阵列最大功率点跟踪研究[J]. 电气技术, 2022, 23(1): 64-69.
- [8] 郑旭彬, 李梦达, 梁智超, 等. 局部遮荫下改进蝴蝶算法的 MPPT 控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(1): 96-101.
- [9] 刘在维. 自适应权重变异猫群算法在光伏系统 MPPT 控制中的应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [10] 朱志国. 基于粒子群-细菌觅食算法的光伏发电 MPPT[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [11] 赵巧静, 边敦新, 陈 羽, 等. 基于改进麻雀搜索算法的 MPPT 方法[J]. 电源技术, 2021, 45(7): 911-914, 927.
- [12] 李 泽. 局部阴影下光伏电池最大功率点跟踪方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.