

基于粒子群遗传算法的光伏 MPPT 控制研究^{*}

胡林静, 刘凯, 杨明文

(内蒙古工业大学 电力学院, 呼和浩特 010080)

摘要: 局部阴影条件下, 光伏阵列的功率输出呈现多峰特性, 传统的 MPPT 跟踪算法容易陷入局部极值点, 无法准确地跟踪到最大功率点。粒子群优化算法可以有效解决多峰寻优问题, 但是普通粒子群算法容易出现收敛速度慢、早熟现象。提出一种改进的粒子群遗传 (IPSO-GA) 算法, 该算法的惯性权重与学习因子随着迭代次数不断发生变化, 可以同时兼顾算法的局部搜索与全局寻优能力, 并且引进遗传算法的交叉、变异操作以增加种群多样性。仿真结果表明, 改进算法在多峰最大功率跟踪过程中, 具有良好的跟踪速度与寻优精度。

关键词: 局部阴影; 改进的粒子群遗传算法; 最大功率跟踪; 光伏阵列

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2019.014.005

中图分类号: TM615

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2019)14-0023-05

Research on PV MPPT control based on particle swarm genetic algorithm

Hu Linjing, Liu Kai, Yang Mingwen

(School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010080, China)

Abstract: Under the conditions of partial shading, the output power of PV array presents multi-peak characteristics. The traditional MPPT methods are ineffective and easy to fall into the local optimum. Particle swarm optimization can effectively solve the multi-peak problem, but the conventional PSO algorithm has a slow convergence rate and is easy to be precocious. An improved particle swarm genetic algorithm is proposed in this paper. The algorithm can balance the ability between local search and global optimization by changing the inertia weight and learning factors constantly. And the cross-over and mutation operation of the genetic algorithm is used to increase the diversity of the population. The simulation results show that the improved algorithm has good tracking speed and precious in the process of multi-peak maximum power tracking.

Keywords: partial shading, improved particle swarm genetic algorithm, the maximum power tracking, PV array

0 引言

近年来, 新能源的利用规模迅速扩大, 光伏发电以其无污染、可再生、分布广泛等优点更是受到各国研究人员的重视。随着光伏设备安装数量的增加, 其工作环境也越来越复杂。当光伏发电系统处于不均匀光照条件下或者光伏板出现遮阴情况时, 光伏系统的功率输出特性曲线会出现多个极值, 此时传统功率跟踪算法容易陷入局部最优解, 难以追踪到最大功率点^[1-2]。因此, 研究局部阴影下光伏 MPPT 问题对提高光伏发电效率具有重要意义。

为解决上述问题, 国内外学者进行了大量的研究

工作。文献[3]提出一种改进电导增量法的全局搜索方法, 该方法需要将各极值点依次进行比较, 确定最大功率点, 但是当光伏阵列容量较大时, 工作量较为繁琐。粒子群算法因参数少、控制简单被广泛应用在光伏阵列最大功率跟踪上, 但是算法参数固定不变, 无法同时保证收敛速度与寻优精度, 并且容易发生早熟现象^[4-6]。文献[7]提出一种猫群算法解决最大功率多峰寻优问题, 控制简单, 参数较少并具有良好的全局搜索能力, 但是并没有讨论动态阴影下 MPPT 追踪效果。针对上述文献缺点, 提出一种改进的粒子群遗传算法, 通过仿真, 验证了该算法在任何阴影条件下都可以快速准确地追踪到系统最大功率点, 具有较好的实用价值。

^{*} 基金项目: 内蒙古自然科学基金资助项目(2017MS0523); 内蒙古高等学校重点科研项目(NJZZ17084)

1 局部阴影下光伏电池功率输出分析

光伏电池机理建模,精度度较高,但是其中涉及到的反向饱和电流、串并联电阻等参数确定十分困难,不利于工程应用。因此工程上一般采用非机理建模的方法,根据厂商提供的光伏电池四个主要参数,即可构建出光伏电池输出特性模型,如式(1)所示^[8]:

$$\begin{cases} I = I_{sc} [1 - C_1 (e^{U/C_2 U_{oc}} - 1)] \\ C_1 = (1 - I_m/I_{sc}) e^{-U_m/(C_2 U_{oc})} \\ C_2 = (U_m/U_{oc} - 1) [\ln(1 - I_m/I_{sc})]^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中 U 和 I 分别为电池的输出电压和输出电流; I_m 、 U_m 、 I_{sc} 、 U_{oc} 分别为光伏电池的最大功率点电流、最大功率点电压、短路电流和开路电压。为了使模型可以模拟出任意光照温度下的输出特性,需要对上述参数进行修正,如式(2)所示^[9]:

$$\begin{cases} I_{sc-new} = I_{sc}(S/S_{ref})(1 + \alpha \Delta T) \\ U_{oc-new} = U_{oc}(1 - \lambda \Delta T) \ln(1 + \beta \Delta S) \\ I_m-new = I_m(S/S_{ref})(1 + \alpha \Delta T) \\ U_m-new = U_m(1 - \lambda \Delta T) \ln(1 + \beta \Delta S) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\Delta T = T - T_{ref}$; $\Delta S = S/S_{ref} - 1$; 修正系数 α 、 β 、 λ 典型值分别为 $0.0025/^\circ\text{C}$ 、 0.5 和 $0.00288/^\circ\text{C}$ 。

以两块光伏电池串联为例,对局部阴影下光伏电池的功率输出特性进行研究。假设两块光伏电池产生的光生电流分别为 I_{ph1} 和 I_{ph2} ,处于均匀光照条件下,两块光伏电池输出特性一致,共同对外输出功率。当第一块光伏电池因遮挡产生阴影,此时光伏阵列有两种工作模式:

(1) 电流处在区间 (I_{ph1}, I_{ph2}) 内,旁路二极管导通,此时电池 1 变成耗能元件,不再对外输出功率,由电池 2 单独对外输出功率,此时最大输出功率为 P_1 ;

(2) 随着外界等效负载逐渐增大,串联电路电流逐渐减少,当电流处于区间 $(0, I_{ph1})$ 时,旁路二极管处于阻断状态,电池 1 产生的光生电流足以对外输出功率。此时,两块电池正常串联,共同对外输出功率,此时系统最大输出功率为 P_2 。

2 改进粒子群算法在多峰 MPPT 中的应用

2.1 标准粒子群算法

粒子群算法是模拟鸟群觅食过程提出的一种仿生类算法,算法首先在可行性空间初始化一群粒子,每个粒子代表一个被优化问题的潜在解,用位置、速度和适应值表示该粒子的特征。粒子在允许范围内不停地运动,通过跟踪个体最优值 P_{best} 与群体最优值 G_{best} 不断更新自己的速度与位置,从而朝最优位置飞行。求解最

优问题过程中,通过式(3)与式(4)反复操作,直至找到问题的最优解。

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 r_1 (P_{best} - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{best} - X_i^k) \quad (3)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + v_i^{k+1} \quad (4)$$

式中 k 表示算法迭代次数; w 是惯性权重; c_1 和 c_2 分别是算法的自学习因子和社会学习因子; r_1 和 r_2 表示 $[0,1]$ 之间的随机数。

2.2 粒子群遗传算法

2.2.1 参数改进

标准粒子群算法参数的选取通常是恒定的,难以同时兼顾局部搜索与全局寻优能力,容易发生早熟现象。式(5)是本文提出的一种参数自适应调整公式。

$$\begin{cases} w(t) = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) \sin[(\pi/2)(t/t_{max})] \\ C_1 = C_{1i} + \frac{C_{1e} - C_{1i}}{t_{max}^2} t^2 \\ C_2 = C_{2i} + \frac{C_{2e} - C_{2i}}{t_{max}^2} t^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中 w_{min} 与 w_{max} 分别表示惯性权重的最小值与最大值; C_{1i} 与 C_{1e} 分别表示自学习因子的初始参数与结束参数; C_{2i} 与 C_{2e} 分别表示社会学习因子的初始参数与结束参数。

参数变化曲线如图 1 所示。

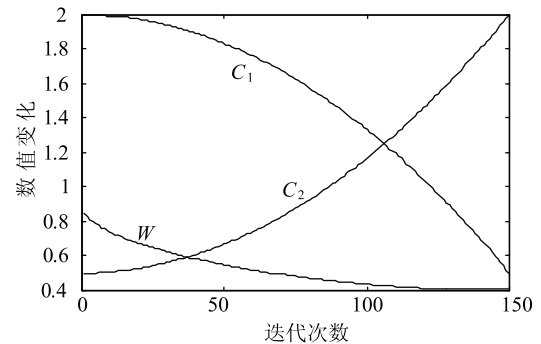


图 1 参数变化曲线图

Fig. 1 Parameter variation curve

参数改进思想如下:在算法搜索初期 C_1 较大, C_2 较小,粒子较快的寻找个体最优值,避免陷入局部最优解。随着迭代次数的增加, C_1 逐渐减小, C_2 逐渐增大,可以加快粒子收敛速度,使群体朝最优位置移动。同理,惯性权重的设计也是如此,在算法搜索初期,较大的惯性权重(惯性权重的值最大不超过 1),有利于全局寻优。随着算法的迭代,为了使算法在局部仔细寻优,惯性权重应该逐渐减

小,这样可以减小算法在最优值附近的振荡,提高粒子的收敛精度。

2.2.2 交叉与变异操作

随着迭代次数的增加,粒子之间的相似度越来越高,种群的多样性得到破坏,容易陷入局部最优而无法跳出。通过引进遗传算法的交叉、变异操作,可以保持种群的多样性,有利于跳出局部最优。

采用个体与群体极值的交叉操作来更新粒子,可以充分吸收群体极值的优点,加快收敛速度。交叉产生的新个体采用精英个体保留策略^[10],当新粒子的适应度大于原先粒子时,进行替换操作否则保持原粒子不变。具体操作如式(6)所示:

$$\begin{cases} p_{i+1}^i = ag_i + (1-a)p_i^i \\ g_{i+1} = ap_i^i + (1-a)g_i \end{cases} \quad (6)$$

式中 a 表示 $[0,1]$ 之间的随机数; p_i^i 表示第 t 代的第 i 个粒子; g_i 表示第 t 次迭代中群体最优值。

变异操作使种群进化方向更加丰富,本文变异方法采用粒子内部两位互换方法,随机选取二个点,将其交换位置,从而产生新的个体。变异后的粒子同样采用精英个体保留策略对粒子进行更新。

2.3 终止策略与重启条件

算法迭代次数设置过小,系统难以在有效时间内追踪到最大功率点;设置过大,当系统追踪到最大功率点时,算法还会继续进行迭代造成输出功率的长时间波动。因此,需要对算法设置终止条件,排除迭代次数对系统造成的影响。当粒子的位置非常集中时,则认为已经找到最大功率点。因此本文设置如下终止条件:当粒子之间最大电压之差小于 $5\%U_{oc}$ 时,停止迭代,输出最大功率。

外界环境复杂多变,当遮阴状态或者光照强度发生变化时,此时需要重新启动算法进行最大功率点跟踪。功率变化量 Δp 为:

$$\Delta p = \frac{|P_{real} - P_m|}{P_m} \quad (7)$$

式中 P_{real} 表示光伏阵列实时输出功率; P_m 表示光伏阵列在上一时刻光照状态下输出的最大功率点。 $\Delta p > 0.1$ 时,表示光照条件发生突变,此时应该重启算法。算法具体流程如图2所示。

3 仿真分析

为验证上述所提算法的合理性与有效性,采用光伏组件串联方式进行仿真研究,最大功率跟踪系统如图3所示。

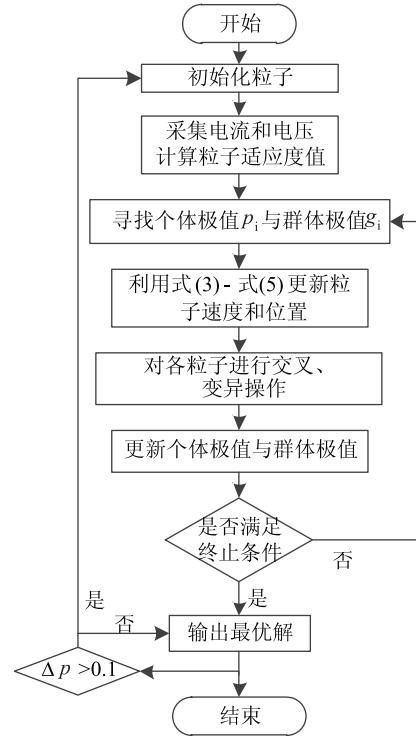


图2 改进的粒子群遗传算法流程图
Fig. 2 Flow chart of IPSO-GA algorithm

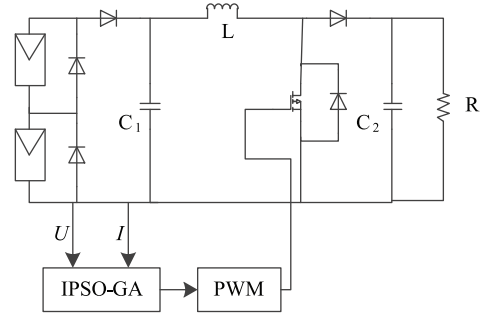


图3 最大功率跟踪电路
Fig. 3 The maximum power tracking circuit

控制系统模型以 Boost 电路为主电路进行最大功率跟踪。仿真参数取值如下: $L = 10 \text{ mH}$, 负载电阻 $R = 50 \Omega$, 滤波电容 $C_1 = 100 \mu\text{F}$, 直流母线电容 $C_2 = 300 \mu\text{F}$ 。IPSO-GA 算法参数选取: $W_{\max} = 0.9$, $W_{\min} = 0.4$, $C_{1i} = 2$, $C_{1e} = 0.5$, $C_{2i} = 0.5$, $C_{2e} = 2$, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.1。

首先,令两块光伏组件串联,其光照强度分别为 $S_1 = 1000 \text{ W/m}^2$, $S_2 = 600 \text{ W/m}^2$, 分别使用改进粒子群遗传算法与常规粒子群算法进行仿真分析,仿真结果如图4和图5所示。

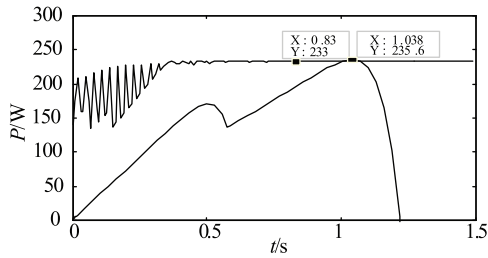


图 4 改进粒子群遗传算法功率追踪效果

Fig. 4 Power tracking effect of IPSO-GA algorithm

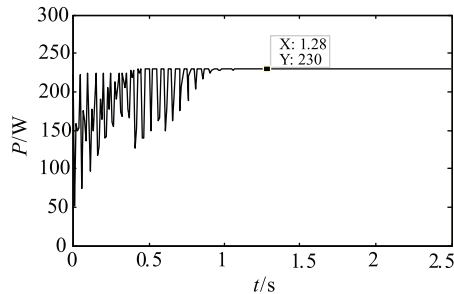


图 5 常规粒子群算法功率追踪效果

Fig. 5 Power tracking effect of PSO algorithm

由图 4 可以看出,采用改进粒子群遗传算法进行光伏阵列最大功率跟踪时,系统在 0.5 s 左右跟踪到最大功率点,输出功率为 233 W,相比于实际最大输出功率 235.6 W,能量损失 2.6 W,追踪误差为 1.1%,且功率追踪过程中,震荡较小,输出平稳。图 5 为常规粒子群算法功率跟踪曲线图,由图 5 可以看出,系统在 1 s 左右达到稳定状态,此时系统最大输出功率 230 W,能量损失 5.6 W,追踪误差为 2.3%,并且在功率跟踪过程中功率输出波动较大。通过上述分析可知,相比于常规粒子群算法,粒子群遗传算法功率追踪时间提高了 50%,输出功率提高了 1.2%。光伏阵列容量越大,本文所提算法的优势就越显著。

为体现文中算法的优越性,采用传统功率跟踪算法 P&O 算法对局部阴影下的光伏阵列进行最大功率跟踪,仿真效果如图 6 所示。

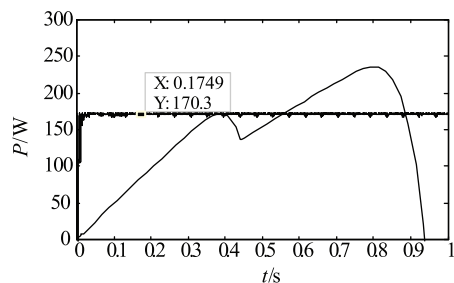


图 6 基于 P&O 算法的功率跟踪效果曲线

Fig. 6 Power tracking effect curve based on P&O algorithm

由图 6 可知,利用扰动观察法进行最大功率跟踪时,系统在 0.05 s 收敛,但是输出并不稳定,在追踪到的功率点附近来回震荡,造成一定的能量损失。由曲线图可以看出,功率陷入局部最优,输出功率仅为 170.3 W,能量损失 165.3 W,追踪误差为 49%,大大降低了光伏发电的效率。

三块光伏组件串联,光照条件为 $S_1 = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, $S_2 = 800\ \text{W}/\text{m}^2$, $S_3 = 500\ \text{W}/\text{m}^2$ 时,仿真结果如图 7 所示。在该光照条件下,光伏阵列的 P-U 特性曲线呈现出三个峰值,全局最大功率点为 301.7 W。由追踪曲线图可以看出,系统在 0.3 s 左右开始收敛并趋于稳定,最大功率输出为 300.9 W。仿真结果表明,所提算法可以满足阴影条件下的功率追踪。

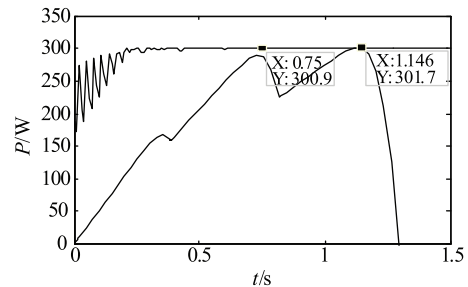


图 7 三峰情况下功率追踪曲线图

Fig. 7 Power tracking curve under three peaks

外界环境复杂多变,导致光伏系统在日常运行中所受的阴影条件在时刻变化着,因此十分有必要对动态阴影下的光伏 MPPT 进行研究。动态仿真条件设置如下:在初始时刻,两块光伏阵列处于均匀光照条件下,即: $S_1 = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, $S_2 = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,在 1.5 s 时,令第二块光伏阵列受到的光照强度由 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 突变为 $600\ \text{W}/\text{m}^2$,即: $S_1 = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, $S_2 = 600\ \text{W}/\text{m}^2$ 。图 8 是光照条件突变前后系统理论上输出的最大功率,仿真结果如图 9 所示。

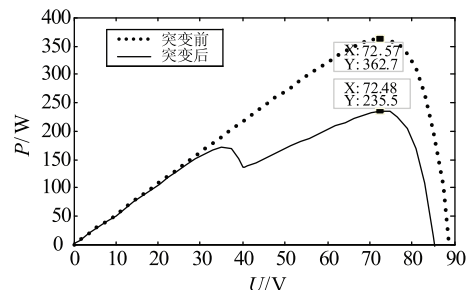


图 8 功率特性曲线

Fig. 8 Power characteristic curve

由图 8 可知,处于均匀光照条件下系统理论最大

输出功率为 362.7 W, 当光照条件突变后, 系统理论上最大输出功率为 235.5 W。由图 9 可以看出, 均匀光照情况下, 输出功率在 0.5 s 稳定在最大功率点 362.7 W, 追踪误差为 0%。在 1.5 s 时, 光照条件发生上述突变, 系统经过 0.4 s 左右, 跟踪到最大功率点, 输出功率为 233 W, 功率损失 2.5 W, 追踪误差为 1%。通过上述分析可知, 在均匀光照以及光照突变情况下, 所提算法依然可以追踪到系统的最大功率点。

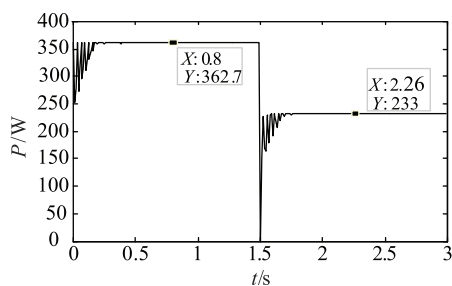


图 9 功率追踪效果曲线图

Fig. 9 Curve of power tracking effect

4 结束语

针对局部阴影条件下光伏阵列功率输出的多峰特性, 本文提出一种改进的自适应粒子群遗传算法 (IP-SO-GA), 该算法同时兼顾两种算法的优点, 可以有效避免输出功率陷入局部极值点, 并可以提高收敛速度。通过上述仿真分析, 可以得到如下结论:

(1) 所提算法在静态阴影与动态阴影下, 都可以快速、精准地追踪到系统的最大功率点, 相比与常规算法, 具有收敛速度快、动态响应好等优点;

(2) 所提算法可以有效克服传统功率跟踪算法容易陷入局部极值点的问题, 且可以有效稳定功率输出, 减少输出震荡, 能够最大限度地提高光伏系统发电效率。

参考文献

- [1] 许洁, 刘星桥. 基于恒电压跟踪法和自适应占空比扰动法的最大功率点跟踪研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(9): 7-12.
Xu Jie, Liu Xingqiao. Research on MPPT based on constant voltage tracking method and adaptive duty cycle perturbation method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(9): 7-12.
- [2] 陈霞, 高琳. 基于滞环比较的自寻优扰动观察 MPPT 控制策略[J]. 可再生能源, 2018, 36(2): 229-235.
Chen Xia, Gao Lin. Self-optimizing perturbation and observation MPPT control strategy based on hysteresis comparison[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(2): 229-235.
- [3] 孙博, 梅军, 郑建勇. 局部阴影条件下最大功率点跟踪改进算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 115-119.

- Sun Bo, Mei Jun, Zheng Jianyong. Improved MPPT method under partial shading conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 115-119.
- [4] Haitthem Chaieb, Anis Sakly. A novel MPPT method for photovoltaic application under partial shaded conditions[J]. Solar Energy, 2018, 159: 291-299.
- [5] 余运俊, 刘涛, 王时胜, 等. 粒子群与电导增量法结合的光伏发电 MPPT[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(12): 2994-3000.
Yu Yunjun, Liu Tao, Wang Shisheng, et al. Global optimized photovoltaic MPPT algorithm based on PSO and incremental conductance method[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 2994-3000.
- [6] Ishaque K, Salam Z, Shamsudin A, et al. An improved particle swarm optimization(PSO)-based MPPT for PV with reduced steady state oscillation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, (27): 3627-3638.
- [7] 聂晓华, 王薇. 基于猫群算法的光伏阵列多峰 MPPT 控制策略[J]. 电力电子技术, 2016, 50(10): 39-41.
Nie Xiaohua, Wang Wei. Cat swarm optimization for MPPT of PV array under complex application environments[J]. Power Electronics, 2016, 50(10): 39-41.
- [8] 柴亚盼, 金新民, 童亦斌. 局部遮挡下光伏阵列的建模与仿真研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(12): 17-20.
Cai Yapan, Jin Xinmin, Tong Yibin. Modeling and simulation study on PV array under partial occlusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(12): 17-20.
- [9] 黄思源, 王鲁杨, 张浩. 基于光伏功率等效面积法的多峰最大功率追踪控制方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(18): 65-71.
Huang Siyuan, Wang Luyang, Zhanghao. Multi peak MPPT control method based on photovoltaic power equivalent area method[J]. Electrical measurement & Instrumentation, 2017, 54(18): 65-71.
- [10] 贾建芳, 杨瑞峰, 王莉. 混合遗传粒子群优化算法的研究[J]. 自动化仪表, 2013, 34(9): 1-3.
Jia Jianfang, Yang Ruifeng, Wang Li. Research on hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm[J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34(9): 1-3.

作者简介:



胡林静(1975—), 女, 内蒙古赤峰人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为新能源发电技术与热工过程控制。Email: hljnmgydx@163.com

刘凯(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电控制相关技术。

杨明文(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源控制技术。

收稿日期: 2018-05-27; 修回日期: 2018-07-03

(杜景飞 编发)