

基于GA和IPSO的微电网调度优化与对比分析

于新海^{1,2},王鑫¹,苏日古格^{1,3},张晓菊¹

(1.河套学院 机电工程系,内蒙古 巴彦淖尔 015000;

2.中国民航大学 民航航空器适航审定技术重点实验室,天津 300300;

3.河套学院 自动化研究与应用中心,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:微电网是一种将分布式电源集成到电网中的有效方法,微电网的优化运行可以有效提高可再生能源的利用效率。综合考虑微电网运行的经济性、不同时段分布式电源的波动性以及环境保护等多方面约束和要求创建目标优化模型,提出基于改进粒子群优化算法的调度优化方法,通过动态调整权重和认知因子得到最优解,并与遗传算法进行对比。算例分析表明,改进粒子群优化算法收敛速度更快,在解决分布式电源波动性和微电网经济调度优化方面更加合理有效。

关键词:微电网;经济调度;改进粒子群优化算法;遗传算法

中图分类号:TP18;TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23941

Microgrid Dispatching Optimization and Comparative Analysis Based on GA and IPSO

YU Xinhai^{1,2}, WANG Xin¹, SU Riguge^{1,3}, ZHANG Xiaoju¹

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hetao College, Bayannur 015000, Nei Monggol,

China; 2. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, Civil Aviation University

of China, Tianjin 300300, China; 3. Research and Application Center of Automation,

Hetao College, Bayannur 015000, Nei Monggol, China)

Abstract: Microgrid is an effective method to integrate distributed power supply into power grid. The optimal operation of microgrid can effectively improve the utilization efficiency of renewable energy. The objective optimization model was established, considering the economy of microgrid operation, the volatility of distributed power sources in different periods, environmental protection and other constraints and requirements. The scheduling optimization method based on improved particle swarm optimization (IPSO) algorithm was proposed. The optimal solution was obtained by dynamically adjusting weights and cognitive factors. The IPSO algorithm was compared with genetic algorithm. The analysis of example shows that the IPSO algorithm has faster convergence speed and is more reasonable and effective in solving the volatility of distributed power sources and the optimization of microgrid dispatching.

Key words: microgrid (MG); economic dispatch; improved particle swarm optimization (IPSO) algorithm; genetic algorithm (GA)

近年来,伴随着经济的快速进步,我国对电能的需求日益增大,“十四五”期间新能源技术的发展将对分布式电源(distributed generation, DG)相关技术提出更高要求。微电网(microgrid, MG)作为分布式电源并网的主要形式,得到了越来越多的关注^[1-4]。微电网结构较为复杂,涵盖多种类型的电源,具有较强的经济属性,经济性是推动

微电网蓬勃发展的重要因素,也是微电网调度的主要目标和依据。目前,基于运营成本考虑对微电网进行调度优化研究十分必要^[5-8]。

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法在微电网优化方面应用广泛。文献[7]通过成本与效益等多种因素,详细地论证了微电网的经济性,构建了一种以微电网中运行费用最少作

基金项目:国家自然科学基金(61901162);内蒙古自治区高等学校科研项目(NJZY20222);

河套学院科学技术研究项目(HYZZ201930)

作者简介:于新海(1987—),男,博士,副教授,Email: xhyu1987@163.com

为研究目标的函数,并且采用了粒子群优化算法针对该函数进行了求解,结果表明了微电网并网后,带来的经济性以及并网的可行性。文献[8]考虑蓄电池寿命,建立包含电池寿命的微电网多目标优化函数,并将其转换为单目标函数,最后,将其用于解决粒子群优化算法问题并验证模型。虽然基本粒子群优化算法具有并行高效的优化性能,通用性强,应用范围广,实现过程简单,但同时也具有收敛时间过长、全局搜索能力强而局部搜索能力差、易陷于局部最优解^[9-10]的缺点。遗传算法(genetic algorithm, GA)和改进粒子群优化(improved particle swarm optimization, IPSO)算法具有很好的收敛性,计算时间短,鲁棒性高,局部寻优能力较好,近年来在求解分布式电源、解决分时波动性方面有一定优势,一定程度地解决了微电网经济运行问题^[11]。本文拟通过遗传算法和改进粒子群优化算法两种手段进行微网调度优化并对比分析优化结果。

本文考虑了包括风、光、燃气轮机、火力发电设备、蓄电池及燃料动力电池等典型的微电网系统,综合电源的维护成本、燃料成本、环境保护成本以及电网交互成本,建立了典型的微电网系统的优化方案,采用改进粒子群优化算法和遗传算法求解其优化方案,得出优化周期内各电源出力情况,并分析和比较仿真结果,得到通用控制策略,并验证了改进粒子群优化算法的合理有效性。

1 微电网经济运行模型

1.1 目标函数

综合考虑微源的各种成本、费用以及并网后的购销电情况,建立微电网经济运行成本的目标函数,其表达式为

$$M(P) = \sum_{i=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N C_i[P(t)] + \sum_{i=1}^N OM_i[P(t)] + \sum_{i=1}^N CEM_i[P(t)] + C_p(t) \times P_p(t) - C_s(t) \times P_s(t) \right\} \quad (1)$$

式中: $M(P)$ 为微电网经济运行成本; $C_i[P(t)]$ 为燃气轮机以及火力发电装置的燃料成本; $OM_i[P(t)]$ 为燃气轮机、火力发电机组和分布式电源的运行保养成本; i 为微源类型的种类编号; $CEM_i[P(t)]$ 为燃气轮机、火力发电机组和分布式电源的环境

费用函数; $C_p(t)$ 为在时间 t 购电的价格; $C_s(t)$ 为在时间 t 售电的价格; $P_p(t)$ 、 $P_s(t)$ 分别为购、销的电量; N 为微源的数量; T 为整个优化周期。

1.2 约束条件

本文重点考虑了功率平衡、微源出力约束和蓄电池运行约束。

1) 功率平衡约束公式为

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_p - P_s = P_w \quad (2)$$

式中: P_i 为微源 i 的输出功率; P_p 为购入的电量; P_s 是卖出的电量; P_w 为总负荷。

2) 机组出力约束公式为

$$P_{i,\min} < P_i < P_{i,\max} \quad (3)$$

式中: $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为机组最小出力和最大出力。

3) 蓄电池运行约束公式为

$$SOC_{\min} < SOC_x < SOC_{\max} \quad (4)$$

$$-P_{c,\min} < P_B(t) < P_{f,\max} \quad (5)$$

式中: $SOC_{\min}$ 、 $SOC_{\max}$ 分别为蓄电池的荷电状态最小值与最大值; SOC_x 为任意时刻蓄电池的荷电状态; $P_B(t)$ 为 t 时刻蓄电池的充放电功率; $-P_{c,\max}$ 、 $P_{f,\max}$ 分别为蓄电池的最大充、放电功率。

2 基于波动性的出力与储能模型

2.1 风电机组与光伏设备

考虑风速和光照强度因素,风电机组和光伏设备发电功率也会受到影响,输出功率将存在波动性^[12]。基于波动性的风电机组和光伏设备的输出功率可分别表示为 P_w 和 P_{pv} ,如下式:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v_{CC} < v \leq v_{CR} \\ a + bv & v_{CR} < v \leq v_s \\ P_R v_s & v_s < v \leq v_{CC} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{pv} = Y_{pv} f_{pv} \cdot \frac{G_T}{G_{T,STC}} [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (7)$$

其中

$$a = \frac{P_R v_{CR}}{v_{CR} - v_s} \quad b = \frac{P_R}{v_s - v_{CR}}$$

式中: v_{CC} 为风电机组的切出风速; v_{CR} 为切入风速; v_s 为风电机组的额定风速; P_R 为1台风力发电设备的额定输出功率; Y_{pv} 为光伏面板的额定功率; f_{pv} 为归约处理因子; G_T 即当前一个时刻内的光伏模块平均太阳能辐射总量; $G_{T,STC}$ 为标准测试条件下的太阳辐射幅值(1 kW/m^2); α_p 为温度系数; T_c 为光伏模块的表层温度; $T_{c,STC}$ 为标准检测的温度(25°C)。

2.2 蓄电池模型

蓄电池的充放电是微电网经济性体现的重要环节。当发电机组产生更多的电力时,它会转移到蓄电池中充电,而多余的电力则会卖给电网;当负荷需求电能较多时,蓄电池先进行放电,若还不满足负荷需求,则向电网购电。蓄电池在 T 时间段的充、放电的最大功率计算公式如下:

$$P_{C_{\max},T} = \min \left[P_{C_{\max}}, \frac{E_{C_{\max}} - (1 - \mu_C) \cdot E_{C,t-1}}{\eta_C \cdot \Delta t} \right] \quad (8)$$

$$P_{F_{\max},T} = \min \left[P_{F_{\max}}, \frac{(1 - \mu_C) \cdot E_{C,t-1} - E_{F_{\min}}}{\Delta t} \cdot \eta_F \right] \quad (9)$$

式中: $P_{C_{\max},T}$ 为蓄电池在 T 时间段的充电最大功率; $P_{C_{\max}}$ 为充电的最大功率; η_C 为充电效率; Δt 为 $t-1$ 到 t 时刻之间的时间间隔; $E_{C_{\max}}$ 为蓄电池剩余最大容量; $E_{C,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻的剩余电池容量; μ_C 为蓄电池的放电率; $P_{F_{\max},T}$ 为蓄电池在 T 时间段的最大放电功率; $P_{F_{\max}}$ 为蓄电池的最大放电功率; η_F 为放电效率; $E_{F_{\min}}$ 为蓄电池的最小剩余容量。

3 算法解析

本文建立的优化模型是一个具有多个约束条件、一定波动性和随机负荷的非线性目标函数优化问题,智能优化算法在电力系统相关问题的解决中较为有效,故本文利用遗传算法和改进粒子群优化算法求解优化模型并对结果进行比对。

3.1 遗传算法

遗传算法通过对生态系统中的各种生态环境变化进行仿真,从而寻求出最佳的解决办法^[13]。该算法简单、通用、鲁棒性强,适合并行处理。它利用决策变量的编码作为一个操作对象,把适应程度直接当作搜索信息,并且可以利用概率搜索来代替确定性法则,只需解决影响搜索方向的目标函数及其对应的适配度函数。

本文采用遗传算法,具体流程如下:

- 1) 随机生成一定长度编码的多个初始种群;
- 2) 通过适应度函数,对每个个体来进行数值评估,选择具有较高适应性值的个体参与基因操作,淘汰适应性较低的个体;
- 3) 经一系列遗传操作(复制、交叉、变异),个体聚集在一起形成了新一代种群,直到满足条件则停止;
- 4) 遗传算法的结果基于后代中表现最佳的

个体。

3.2 基本粒子群优化算法

粒子群优化算法模拟鸟群觅食行为,并将要解决的问题的可行域看作鸟群飞行的空间,将每只鸟都抽象成一个没有体积和质量的粒子,用来表示问题的可行解^[14]。基本粒子群优化算法在后期的优化过程中,粒子容易过早地收敛到局部最优解,并且搜索速度慢^[15]。

3.3 改进粒子群优化算法

改进粒子群优化算法线性减少了基本粒子群优化算法的惯性权重,并对认知因子进行了调整^[16],这种调整使得粒子更加容易靠近最优解。粒子当前速度和位置的表达式如下:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1^k (P_{ij}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2^k (P_{gj}^k - X_{id}^k) \quad (10)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (11)$$

其中

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot t}{T_{\max}}$$

$$c_1 = \frac{(c_{1,\text{end}} - c_{1,\text{start}}) \cdot t}{T_{\max}} + c_{1,\text{start}}$$

$$c_2 = \frac{(c_{2,\text{end}} - c_{2,\text{start}}) \cdot t}{T_{\max}} + c_{2,\text{start}}$$

式中: $X_{id}^{k+1}, v_{id}^{k+1}$ 分别为粒子下一时刻的位置和速度; X_{id}^k, v_{id}^k 为粒子当前时刻的位置和速度; P_{ij}, P_{gj} 分别为当前迭代次数下的单个粒子最佳位置和粒子群平均最优位置; c_1, c_2 为异步学习因子,取 $c_{1,\text{start}}=2.5, c_{1,\text{end}}=0.5, c_{2,\text{start}}=0.5, c_{2,\text{end}}=2.5$; ω 为粒子惯性加权; $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别为最大惯性加权和最小惯性加权; t 为当前迭代次数; $T_{\max}$ 为最大迭代次数。

可以把式(10)划分为3个部分,第1部分表明了粒子先前的运动速度,用于确保它们全局的收敛特性;第2部分、第3部分都代表了这种算法所具备的局部收敛性。算法的全局收敛能力随着 ω 值增大而增强,相反, ω 值较小时,算法局部收敛能力强。通过采用线性递减的动态加权,可以使得改进粒子群优化算法在开始的全局搜索中能力较强,而在后程其局部寻优能力同样较强。

本文采用改进粒子群优化算法,具体流程如下:

- 1) 初始化。初始化的内容包括种群中每个粒子在不同时空的初始运动速度与位置、群空间区域、最大迭代次数以及惯性加权等参量;

- 2) 计算粒子适应度,并初始化 P_g 和 P_{gj} ;
- 3) 由式(10)、式(11)更新位置和速度,并重置群空间区域之外的粒子;
- 4) 根据目标函数评估粒子,找出单个粒子在整个总体的最优地点。如果满足迭代终止条件,搜索会被中断,输出搜索结果;如果没有达到终止条件,则返回步骤3)继续搜寻。

4 算例分析

4.1 微电网系统设备数据及参数

本文以内蒙古某地区一个典型单日的风光发电功率数据为例,如表1所示,设单个风力涡轮机的切入风速为3 m/s,切出风速为24 m/s;蓄电池荷电状态最小值 SOC_{min} 与最大值 SOC_{max} 分别为0.3和0.8,初始 SOC 为0.5。由此可以得到光伏、风力的发电功率曲线如图1、图2所示。

表1 典型单日照光和风力数据

Tab.1 Light and wind data of a typical day

时间段	光伏发电功率/kW	风力发电功率/kW
00:00—01:00	0	50
01:00—02:00	0	57
02:00—03:00	0	46
03:00—04:00	0	48
04:00—05:00	0	50
05:00—06:00	0	40
06:00—07:00	0	45
07:00—08:00	0	47
08:00—09:00	10	40
09:00—10:00	20	68
10:00—11:00	25	75
11:00—12:00	36	48
12:00—13:00	48	76
13:00—14:00	40	73
14:00—15:00	46	40
15:00—16:00	30	60
16:00—17:00	20	37
17:00—18:00	9	62
18:00—19:00	5	57
19:00—20:00	0	60
20:00—21:00	0	80
21:00—22:00	0	60
22:00—23:00	0	57
23:00—24:00	0	51

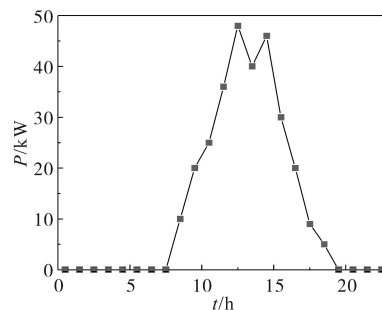


图1 光伏发电功率曲线

Fig.1 PV power curve

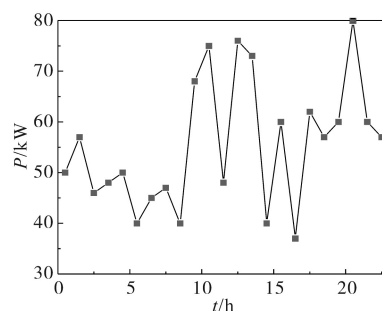


图2 风力发电功率曲线

Fig.2 Wind power curve

为了充分利用风光发电功率,并实现经济运行调度,按分时电价模式进行微电网与大电网交互。10:00—12:00,19:00—22:00为电网用电高峰时段,购电电价标准为-1.56元/(kW·h),售电电价标准为1.56元/(kW·h);23:00—06:00为用电低谷时段,购电电价的标准为-0.43元/(kW·h),售电电价的标准为0.43元/(kW·h);其余时段为电网平时段,购电电价标准为-0.7元/(kW·h),售电电价标准为0.7元/(kW·h)。

4.2 优化分析

运用Matlab软件计算得到遗传算法和改进粒子群优化算法的迭代收敛情况,如图3所示。

从图3可以看出,当总数相同且迭代次数相同时,两种求解算法的目标函数值都会随着迭代次数的增加而减小,而改进粒子群优化算法明显具备更强大的全局和局部搜索能力以及更快的收敛约束速率。

利用遗传算法和改进粒子群优化算法对随机负荷的风光互补多能量互补微电网的目标优化调度模型进行仿真和求解,解决方案的结果如图4、图5所示。图中,mt代表燃气轮机;dg代表分布式电源,包括风机和光伏阵列;bat代表储能电池;fc代表燃料电池;grid代表电网交互设备。

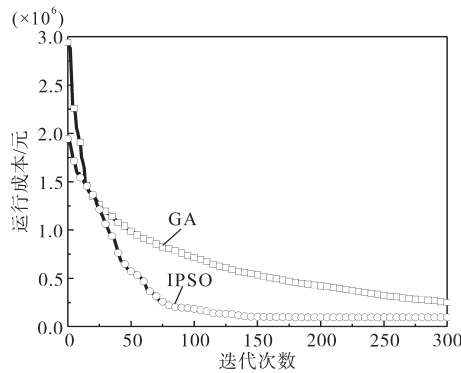


图3 两种算法的适应度收敛曲线

Fig.3 Fitness convergence curves of the two algorithms

对图4来说,使用遗传算法优化各微源输出调度,主要是利用分布式电源进行供能,前期采用燃料电池进行供能,到光照和风力充足时,利用分布式电源进行供能,并且很少和大电网进行交互,在部分用电高峰时期(19:00—22:00),由于售电价格较高,各个部分微源的出力都被增大,除了满足负荷需求,剩余的电能被出售给电网,电池放电。然而从图中可以看出,遗传算法虽然表现出调度优化特点,但在00:00—10:00期间,微电网与大电网之间的交互显然是不够的。

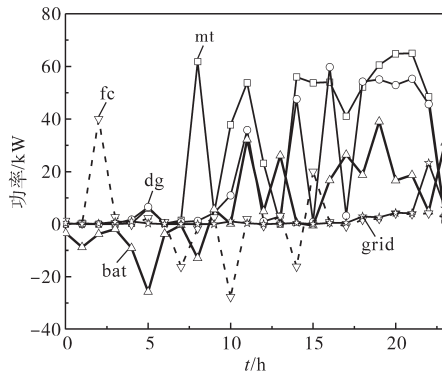


图4 遗传算法优化后各微源出力情况

Fig.4 Output of each micro source after optimization of the GA algorithm

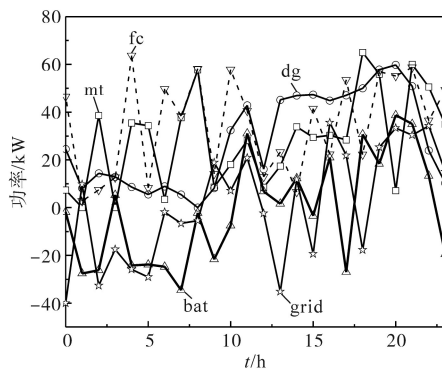


图5 改进粒子群优化算法优化后各微源出力情况

Fig.5 Output of each micro source after optimization of the IPSO algorithm

如图5所示,使用改进的粒子群优化算法优化各个微源的调度,在分布式电源供能较差时主要采用燃料电池及储能电池放电进行供能;随着光照和风力的增加,考虑到污染成本的增加,逐渐减少燃料电池和微型燃气轮机的输出,并主要使用分布式电源进行能源供应;在用电低谷时段(23:00—06:00),微源发电综合成本高于大电网采购成本,在满足负荷的需求下,此时应给蓄电池充电;在平时段,微源的发电成本介于购售电成本之间,所以蓄电池保持荷电状态;在用电高峰时段(10:00—12:00, 19:00—22:00),由于售电价格比其他时段较高,应当增加各微源出力,在满足负荷需求的基础上,将剩余电能出售给大电网,电池放电。显然基于改进粒子群优化算法,任何时段下微电网与大电网之间的交互性均要优于遗传算法。

本文在相同的参数条件下,不考虑风机光伏设备及蓄电池等的设备安装成本,进行两种算法的总成本比较,如图6所示,在追求总成本最优的情况下,改进粒子群优化算法进行的调度优化相比于遗传算法更能有效节约总成本。

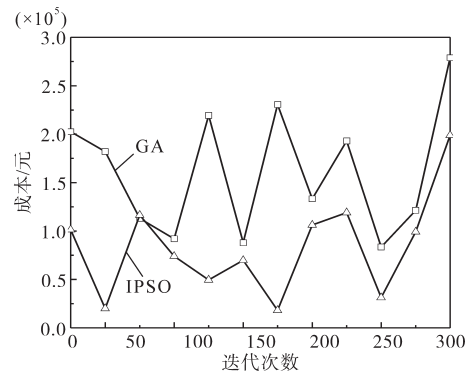


图6 两种算法对目标函数优化后总成本的多次比较

Fig.6 Comparison of the two algorithms on the total cost after optimization of objective function

5 结论

本文以包含风、光等新能源随机负载的互补式微电网为研究对象,构建了一种考虑了经济性、不同时段分布式电源的波动性以及环境保护等多方面约束和要求、可以优化的调度模型,以实现微电网运行总成本最低作为优化目标。通过对遗传算法和改进粒子群优化算法的比较发现,改进粒子群优化算法相比于遗传算法收敛性更好,并且能够更好地解决分布式能源的波动性问题,基于改进粒子群优化算法微电网与大电网

交互性更好、总成本更低。本文结论可为微电网经济运行不同智能算法选择提供参考。

参考文献

- [1] 马磊,张超,钟鸣,等.光储气微网优化运行研究[J].电气传动,2021,51(9):67-74.
Ma Lei, Zhang Chao, Zhong Ming, *et al.* Research on economical operation of the micro-grid with photovoltaic and natural gas [J]. Electric Drive, 2021, 51(9): 67-74.
- [2] 廖孟柯,焦煜,付林,等.微电网运行与发展研究[J].轻工科技,2021,37(4):61-62.
Liao Mengke, Jiao Yu, Fu Lin, *et al.* Research on microgrid operation and development[J]. Light Industry Science and Technology, 2021, 37(4): 61-62.
- [3] 姜玉霞,田艳军,李永刚.有功功率载荷波动对分布式发电并网逆变器稳定影响分析及其改进控制策略[J].电网技术,2020,44(2):646-654.
Jiang Yuxia, Tian Yanjun, Li Yonggang. Analysis of the influence of active power load fluctuation on the stability of distributed generation grid-connected inverter and improved control strategy[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 646-654.
- [4] 吴鸣,熊雄,季宇,等.微网群技术综述[J].储能科学与技术,2019,8(4):621-628.
Wu Ming, Xiong Xiong, Ji Yu, *et al.* Overview on multi-microgrid technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(4): 621-628.
- [5] 钱峰,皮杰,刘俊磊,等.微电网建模与控制理论综述[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(285):1044-1054.
Qian Feng, Pi Jie, Liu Junlei, *et al.* Review of microgrid modeling and control theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(285): 1044-1054.
- [6] 孙慧君,闫志彬,余蕾,等.微电网多目标优化运行综述[J].山东电力技术,2020,47(2):37-42.
Sun Huijun, Yan Zhibin, Yu Lei, *et al.* Review of multi-objective optimization operation of micro-grid[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(2): 37-42.
- [7] 洪博文.微网调度优化模型与方法研究[D].天津:天津大学,2014.
Hong Bowen. Research on dispatch model and method of microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [8] 蓝达成,崔双喜,樊小朝,等.计及蓄电池寿命的微电网群优化调度模型[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2021,46(2):72-81.
Lan Dacheng, Cui Shuangxi, Fan Xiaochao, *et al.* Optimal scheduling model of multi-microgrid group considering battery life[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 46(2): 72-81.
- [9] 马立新,徐嘉辉,杨天笑.基于MPSO算法含电动汽车的微电网优化调度[J].电网与清洁能源,2020,36(253):116-122.
Ma Lixin, Xu Jiahui, Yang Tianxiao. Optimal scheduling of microgrid with electric vehicles based on MPSO algorithm[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2020, 36(253): 116-122.
- [10] 李静雅,易庚,胡汉梅,等.基于改进鸡群算法的微电网协同优化运行研究[J].高压电器,2019,55(7):203-210.
Li Jingya, Yi Geng, Hu Hanmei, *et al.* Cooperative optimal operation of micro-grid based on improved CSO[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 203-210.
- [11] 王仕存,唐敦兵,朱海华,等.基于改进粒子群算法求解分布式多工厂生产调度问题[J].机械制造与自动化,2021,50(4):9-13.
Wang Shicun, Tang Dunbing, Zhu Haihua, *et al.* Improved particle swarm optimization algorithm for distributed multi-plants production scheduling[J]. Machine Building & Automation, 2021, 50(4): 9-13.
- [12] 龙嘉婷.含分布式电源的微电网的经济运行优化研究[D].南昌:南昌大学,2020.
Long Jiating. Research on economical operation of the micro-grid containing distributed generations[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [13] 葛继科,邱玉辉,吴春明,等.遗传算法研究综述[J].计算机应用研究,2008(10):2911-2916.
Ge Jike, Qiu Yuhui, Wu Chunming, *et al.* Summary of genetic algorithms research[J]. Application Research of Computers 2008(10): 2911-2916.
- [14] 王东,宋保业.基于PSO的永磁同步电机分数阶滑模控制器设计[J].电气传动,2020,50(7):8-12.
Wang Dong, Song Baoye. Design of fractional-order sliding mode controller for permanent magnet synchronous motor based on PSO[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 8-12.
- [15] 王凌云,徐嘉阳,丁梦.基于混沌的多Agent粒子群算法在微电网调度中的优化研究[J].电网与清洁能源,2017,33(8):1-7.
Wang Lingyun, Xu Jiayang, Ding Meng. Research on multi-agent particle swarm optimization based on chaos in microgrid optimal dispatch[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2017, 33(8): 1-7.
- [16] 周俊,陈璟华,刘国祥,等.粒子群优化算法中惯性权重综述[J].广东电力,2013,26(7):6-12.
Zhou Jun, Chen Jinghua, Liu Guoxiang, *et al.* Summary on inertia weight in particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(7): 6-12.

收稿日期:2021-08-16

修改稿日期:2021-09-04