

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.06.012

基于改进粒子群算法的微电网优化运行

孔爱良¹, 梁 硕¹, 李春来², 梁志峰³, 陈 艳⁴

(1. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 青海省光伏发电并网技术重点实验室, 青海 西宁 810000;
3. 国家电力调度控制中心, 北京 100031; 4. 国网江苏省电力公司扬州供电公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 为提高含分布式发电的微电网运行水平,应用基于混沌-模拟退火思想的粒子群算法对微电网的运行进行优化。针对微电网中各分布式电源特性,建立微电网的数学模型,建立了以运行成本和环境效益等运行指标最优为微电网优化运行的目标函数,并应用基于混沌算法结合模拟退火思想的改进粒子群优化算法对微电网多目标优化运行问题进行求解,得到微电网的最优运行方式。采用改进粒子群优化算法对某微电网进行24 h优化运行算例分析,结果表明该方法具有更好的寻优能力和更快的收敛速度。

关键词: 微电网;混沌理论;分布式电源;模拟退火思想;粒子群优化算法

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)06-0550-06

Optimizing micro-grid operation based on improved PSO

KONG Ailiang¹, LIANG Shuo¹, LI Chunlai², LIANG Zhifeng³, CHEN Yan⁴

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;
2. Qinghai Province Key Laboratory for Technology of Grid Connected Photovoltaic Power Generation, Xi'ning 810000, China;
3. Dispatching Control Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;
4. Yangzhou Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electrical Power Company, Yangzhou 225000, China)

Abstract: One of the important problems in the development of micro grid is related with its operation optimization including multiple distributed generators (DG). To improve the operation level of the micro grid, the modified particle swarm optimization (PSO) algorithm based on chaos theory and simulated annealing algorithm is proposed in the paper. The mathematical model regarding optimal operation of micro grid is established incorporating different operation indexes of the distributed generators, in which the optimized object function is assumed to be correlated with operation indexes such as operation cost and environmental benefit. The modified PSO algorithm is used to solve the multi-objective problem, with the optimized operation of the mirco-grid with DGs being obtained. A case study regarding 24 hours operation of one mico-grid shows that, the modified PSO algorithm appears to have enhanced optimization ability and convergence rate.

Key words: micro-grid; chaos theory; distributed generator; simulated annealing; particle swarm optimization

能源和环境问题目前是全球范围内备受关注的热点问题之一。分布式发电(Distribution Generator, DG)的大力发展,对于缓解日益严重的能源和环境问题具有一定的效果。由多种发电形式的分布式发电组成的微电网,一般具有对环境影响小、能源供应可靠性高和经济效益好等特点而受到广泛的关注^[1-3]。微电网运行既要达到环境友好,同时又要要有经济效益,其优化运行问题的求解是一个多目标多约束条件

收稿日期: 2016-09-12
基金项目: 青海省科技项目(2014-Z-Y34A)
作者简介: 孔爱良(1977—),男,江苏南京人,工程师,主要从事新能源发电与储能运行控制技术研究。E-mail: kongailiang@epri.sgcc.com.cn

的非线性优化问题^[3]。传统优化算法已难以解决多目标多约束条件的非线性优化问题。随着智能优化算法的发展,粒子群算法、神经网络和遗传算法(GA)等智能优化算法已经广泛应用于此类问题的求解,并取得良好的效果。但各种智能优化算法各有其利弊,针对微电网优化问题,寻找合适的求解算法是研究难点之一。文献[3]构建了计及运营成本、污染物排放及运营风险水平等微电网运营管理的多目标优化模型,并应用小生境多目标粒子群优化算法对其进行求解。文献[4]建立了计及运行费用、一氧化碳和氮氧化物排放量最小的多目标机会规划模型,应用随机模拟技术和 Pareto 最优解集处理多目标规划问题,并提出采用局部和全局记忆体的改进粒子群优化算法进行微电网多目标优化问题的求解。文献[5]建立了以日发电电量成本最低、日温室效应气体排放量最少以及日最大节点电压偏差最小为目标的微电网多目标运行优化模型,并提出应用克隆选择算法对微电网优化运行问题进行求解。文献[6]建立含储能的微电网优化运行的多目标优化模型,并提出应用改进自适应萤火虫算法进行求解,算例表明了算法的可行性。

作为智能优化算法之一,粒子群算法(PSO)适用于多目标优化问题,且其具有参数少、程序简单易实现等优点^[7-9]。但传统的 PSO 算法也存在一些缺点,如迭代收敛速度较慢,易陷入局部极值等^[7-9]。本文提出的结合混沌算法和模拟退火思想的改进粒子群优化算法可克服传统 PSO 算法的缺点,并将该算法应用于微电网的优化运行。将微电网的经济成本和环境效益等运行指标作为微电网优化运行的目标函数。算例分析表明,应用基于混沌-模拟退火思想的粒子群优化算法优化微电网的运行具有有效性和可行性。

1 微电网优化运行的数学建模

1.1 微电网的结构

典型微电网结构如图 1 所示^[10-11],包括各种分布式发电、负荷和储能装置等。其中分布式发电包括风电、光伏、燃料电池、微燃机和柴油机等。储能装置一般可选用蓄电池。

根据不同种类的分布式发电的电气特性建立相应的数学模型。风电和光伏的输出功率受自然因素影响,一般按自然出力计算,在微电网优化运行中不进行出力优化。因此,为简化处理,将风电和光伏等不可控的分布式电源等效为负值的负荷,并与微电网负荷合并称为广义负荷(GL)^[11],而将燃料电池、微燃机和柴油机等具有可控性的电源作为优化变量。

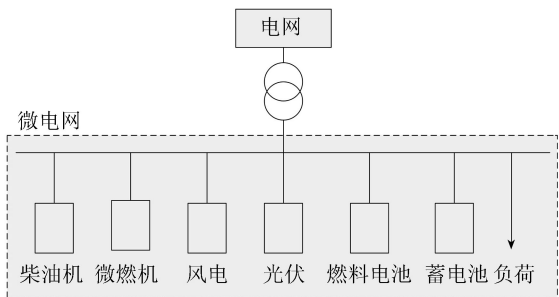


图 1 典型微网结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of typical micro-grid

1.2 微电网优化目标函数

1.2.1 运行成本

微电网运行首先考虑运行成本^[10-11],包括分布式电源的燃料成本和运行维护成本。

$$F_C = \sum_{i=1}^N [F_i(P_i) + F_{OMi}(P_i)] \tag{1}$$

式中: F_C ——微电网的运行成本; $F_i(P_i)$ ——各分布式发电的燃料成本; $F_{OMi}(P_i)$ ——各分布式发电(包括蓄电池)的运行维护成本; P_i ——第*i*个分布式发电的输出功率; N ——微电网中分布式发电的总数目。

1.2.2 环境保护折算成本

燃料电池、柴油发电机、微燃机等在发电过程中会排放二氧化碳(CO₂)、二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)等污染物。为了进行比较,可将各种污染物按环保成本进行折算,作为微电网的环境效益指标,并将其作为微电网优化运行建模的目标之一。环保折算成本由式(2)计算^[11]。

$$F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_j E_{i,j} P_i \tag{2}$$

式中: F_2 ——污染物按环保进行折算后的成本; M ——各种污染物类型的个数; α_j ——污染物进行环保折算的系数,元/kg; $E_{i,j}$ ——污染物的单位排放量,kg/kW; i ——第*i*个微电源; j ——第*j*种污染物。

表 1 中为污染物 CO₂、SO₂ 和 NO_x 环保折算成本以及燃料电池、柴油发电机和微燃机的排放系数^[12]。

表 1 环保折算成本和排放系数

Table 1 Conversion cost and Discharge factor

排放类型	环保折算成本/ (元·kg ⁻¹)	燃料电池排放系数/ (kg·kW ⁻¹)	柴油发电机排放系数/ (kg·kW ⁻¹)	微燃机排放系数/ (kg·kW ⁻¹)
NO _x	26.0400	4.5×10 ⁻⁶	2.18×10 ⁻²	4.4×10 ⁻⁴
SO ₂	6.1380	2.25×10 ⁻⁶	4.54×10 ⁻⁴	8.0×10 ⁻⁶
CO ₂	0.0868	4.275×10 ⁻³	1.40×10 ⁻³	1.6×10 ⁻³

综合微电网的运行成本和环保折算成本,微电网的优化运行目标函数可表达为

$$\min F = F_c + F_2 + \lambda P_l$$

(3)

式中: F ——综合成本; λ ——有功网损成本系数; P_l ——微电网网损。

由式(3)可见,微电网优化运行是一个多目标优化问题。

微电网优化运行还要遵守诸多约束,即微电网运行中的等式和不等式约束,其中等式约束为功率平衡方程,而不等式约束为各种限制,如电源出力限制、节点电压上下限以及储能单元容量限制等。

2 改进粒子群优化算法

2.1 传统的粒子群优化算法

PSO 算法具有诸多优点,如需要参数少、程序简单、方便实现等,因此备受关注。PSO 算法应用于实际优化问题求解时,一般可将优化问题的解看成一个 d 维搜索空间的粒子,任意 PSO 中的粒子都具有两个属性,即一个当前速度 $v_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d})$ 和一个当前位置 $x_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d})$ 。传统的 PSO 算法一般的求解过程为:(a)随机产生 PSO 粒子,具有位置和速度属性;(b)通过迭代来更新粒子,即更新速度(式(4))和位置(式(5));(c)在一次完整迭代后,各粒子本身都有一个最优解,称为个体极值,记为 $p_{best,i} = (p_{best,i,1}, p_{best,i,2}, \dots, p_{best,i,d})$,在一次迭代中,所有粒子中有一个最优解,称为全局极值,记为 $g_{best} = (g_{best,1}, g_{best,2}, \dots, g_{best,d})$;(d)不断地迭代,直到找到最优解。

第 $(k+1)$ 步,各粒子通过以下方法更新^[7-9]:

$$v_i(k+1) = \omega v_i(k) + c_1 r(p_{best,i}(k) - x_i(k)) + c_2 r(g_{best} - x_i(k))$$

(4)

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1)$$

(5)

式中: k ——迭代次数,一般可设置迭代上限; ω ——惯性权重系数; c_1, c_2 ——常数(通常取值在 $(0, 2]$ 之间); r —— $(0, 1)$ 之间的随机数; i ——粒子个数, $i = 1, 2, \dots, K$ 。

2.2 改进 PSO 算法

上述 PSO 算法有诸多优点,但同时也存在一些缺点,如:效率较低、容易陷入局部最优等^[7-9]。为克服这些缺点,很多专家学者提出了诸多改进的方法。周孝法等^[13]提出了惯性权重系数 w 自适应变化的改进 PSO 算法,通过 w 自适应变化使得适应度好的粒子在当前最优解附近做精细搜索,适应度差的粒子则在可行域附近以较大步伐做全局粗略探测,这样可增大寻找更好解的机会。但是该方法并没有解决初值问题和跳出局部最优的问题。因此,笔者在 w 自适应变化的基础上,提出在 PSO 算法中加入混沌算法进行初始化和模拟退火思想的跳出局部最优解的思路,以提高算法效率和全局搜索能力。

因混沌算法^[10,14]具有随机性、遍历性等特点,可利用其对粒子进行初始化,以提高初始粒子质量,提高算法效率。本文采用 Logistic 混沌系统^[10],其迭代公式为

$$u(k+1) = \mu u(k)(1 - u(k))$$

(6)

式中: μ ——控制参数, $\mu \in (2, 4]$ 。当 $\mu = 4$,且 $0 \leq u(0) \leq 1$ 时,Logistic 混沌系统就处于完全混沌状态,产生的序列 $\{u(k)\}$ 即为混沌系统的变量。

为避免陷入局部最优解,可在传统 PSO 算法中加入模拟退火思想^[15]。其主要原理是当粒子靠近局部最优解时,通过模拟退化从领域中随机产生另一个解,并与当前局部最优解进行比较,通过一定的规则确定采用随机产生的解还是局部最优解,从而可能找到真正的最优解。

2.3 改进 PSO 算法在微电网优化中的应用

综上所述,结合混沌理论和模拟退火思想的改进 PSO 算法,可有效提高 PSO 的搜索能力,将其应用于微

电网优化运行中的主要步骤如下:

- a. 应用混沌系统进行 PSO 的初始化。应用 Logistic 混沌系统的遍历、随机性等特点,产生初始群体具有广泛性,能有效提高初始粒子的质量。即首先产生一个 d 维随机量 u_0 ,并根据完全的混沌系统(式(6))得到具有混沌特性的随机量 $u_{i0}(i_0 = 1, 2, \cdots, K)$;然后将 u_{i0} 映射到微电网参数的取值范围,即可得到初始位置 $x_{i0}(0)$;再通过将式(3)的每次计算结果 F 作为适应度值进行评价,选择部分适应度好的作为 PSO 算法的初始群体,显然,这些初始粒子具有较高的质量;最后,随机产生这些保留粒子的初始速度 $v_i(0)$ 。
- b. 利用模拟退化思想跳出局部最优解。按式(5)更新各粒子的位置。新的位置是否保留,取决于模拟退火算法。具体地说,即通过计算更新前、后两位置的适应度值 F 的变化值 ΔF 。若 $\Delta F < 0$,则接受新位置的;若 $\Delta F > 0$,则按一定的概率来决定是否接受新位置。通过模拟退火思想,粒子可以按一定概率接受新位置,使粒子有机会跳出局部最优解。

3 算例分析

算例的微电网如图 2 所示^[11],具体参数见表 2^[11]。图 2 中,50 m、100 m 等表示距离。其中,微电网的系统电压限制在额定电压的 0.95 ~ 1.05 倍;蓄电池荷电范围为 5 ~ 250 kW · h,蓄电池效率设为 0.85。

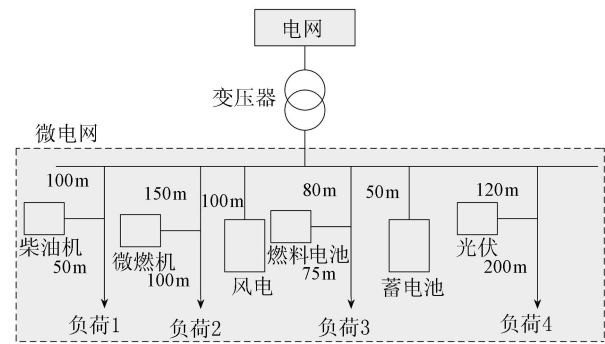


图 2 某微电网示意图

Fig. 2 Microgrid diagram for case study

微电网初始运行状态设定:微电网独立运行(孤岛);对于蓄电池来说,如果充放电过于频繁,会导致其寿命缩减。因此限定蓄电池充放电的时间段分别为:9:00—12:00,19:30—21:30,1:00—6:00。凌晨 1:00—6:00 属于用电低谷期,其他两个时段属于用电高峰期。

设置 PSO 参数如下:PSO 粒子群体数量为 70,最大迭代次数为 150, $c_1 = c_2 = 2.0$, $\omega_{\max} = 0.93$, $\omega_{\min} = 0.15$, $\varepsilon = 10^{-6}$ 。

以某微电网全天 24 h 运行数据为例。图 3 为风电和光伏的功率预测曲线,图 4 为总负荷和广义负荷预测曲线,图 5 为各馈线的负荷预测曲线。

燃料电池、微燃机和柴油机等可控电源燃料费用与输出功率关系曲线如图 6 所示。可控电源运行综合费用与输出功率关系曲线如图 7 所示。

从图 6、图 7 可知,在 0 ~ 135 kW 功率区间内微燃机的燃料费和综合费用都最高;燃料电池的燃料费用较柴油发电机高,但其运行维护成本最低,综合费用最低;柴油发电机的燃料费用最低,但其运行维护成本却最高,因此其综合费用居中。

利用改进的 PSO 算法进行优化计算,优化结果如图 8 所示。由图 8 可见,燃料电池、微燃机和柴油机等三者微电网优化后的运行中,燃料电池输出电能最多(为 1 346 kW),而微燃机最少(为 976 kW),柴油发电量为 1 023 kW · h,符合图 6 和图 7 的分析结果。图 9 为各分布式电源的成本分析。从图 8、图 9 可见,微电网运行优化后 24 h 的运行总成本为 2 568 元。

表 2 各分布式电源的参数
Table 2 Parameters of different DGs

电源	功率上限/ kW	功率下限/ kW	爬坡率上限/ (kW · min ⁻¹)	运行维护成本/ (元 · kW ⁻¹)
微燃机	130	15	3	0.036 40
柴油发电机	125	12	2	0.078 99
燃料电池	125	12	2	0.025 98
蓄电池	30	-30		0.027 48
光伏	40	0		
风力发电	40	0		

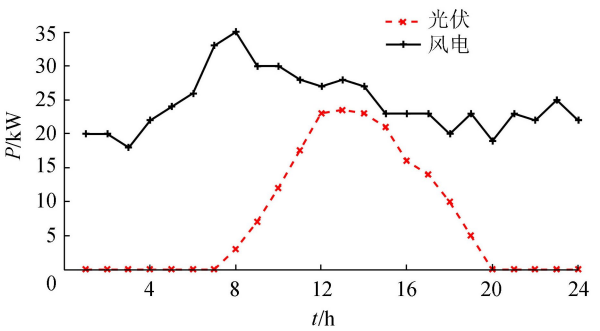


图 3 光伏和风电出力预测曲线
Fig. 3 Power prediction curves of photovoltaic and wind

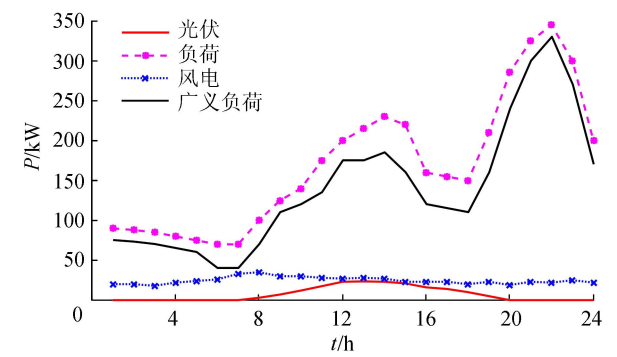


图4 总负荷和广义负荷预测曲线

Fig.4 Prediction curves of total load and generalized load

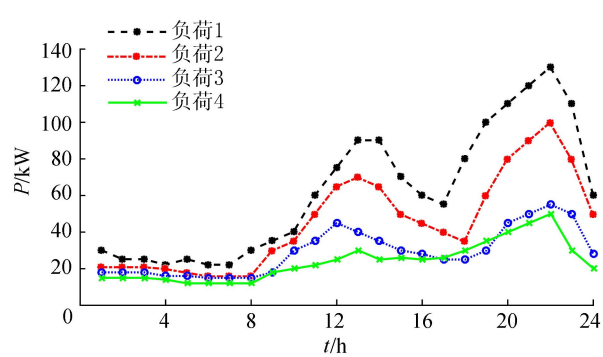


图5 各馈线负荷预测曲线

Fig.5 Prediction curves of each feeder load

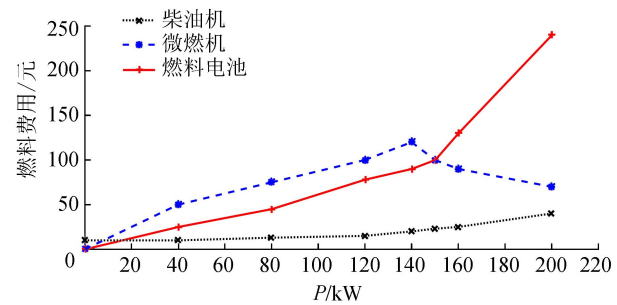


图6 分布式电源燃料费用与输出功率关系曲线

Fig.6 Relation curves between fuel cost of DGs and its output power

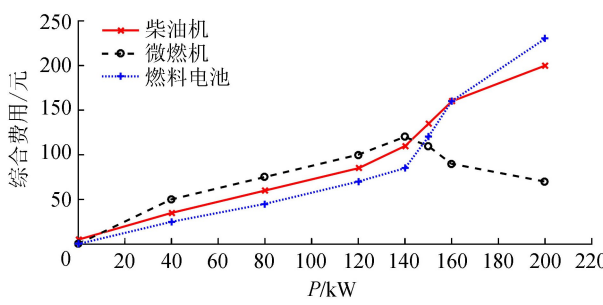


图7 分布式电源综合费用与输出功率关系曲线

Fig.7 Relation curves between total cost of DGs and output power

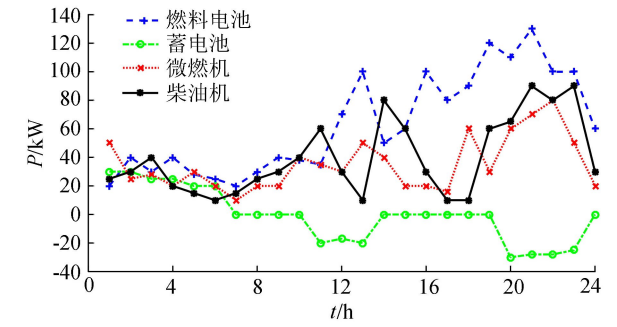


图8 各个电源输出功率曲线

Fig.8 Curves of power output from different DGs

为了验证本文提出的改进 PSO 算法的优势,分别应用改进 PSO 算法、传统 PSO 算法和遗传算法(GA)在相同条件下进行求解,表3列出了优化运行10次以后得到的统计结果。

由表3可知,本文提出的改进 PSO 算法的微电网优化运行总成本最低,平均运算时间最短,表明改进 PSO 算法具有更好的寻优能力,且有更快的收敛速度。

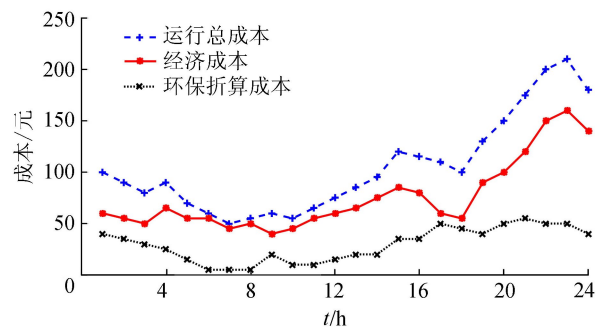


图9 微网运行成本曲线

Fig.9 Curves of DGs costs

表3 不同算法优化结果

Table 3 Optimized results using different algorithms

算法	运行总成本/元	平均运算时间/s
改进 PSO	2 560	10.3
传统 PSO	2 723	17.7
GA	2 683	18.1

4 结 论

a. 通过混沌理论、模拟退火思想等对传统的 PSO 算法进行改进,并与其他优化方法进行比较,结果表明,改进后的 PSO 算法在寻优性能和效率方面都有较大的提高。

b. 通过微电网算例验证了以运行成本和环保折算成本最小为多目标的优化模型的有效性。

参考文献:

[1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏,等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报,2014, 34(1): 57-64. (YANG Xinfa, SU Jian, LYU Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE,2014, 34(1):57-64. (in Chinese))

[2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107. (LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19):100-107. (in Chinese))

[3] 李存斌, 张建业, 李鹏. 考虑成本、排污及风险的微电网运营多目标优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1051-1058. (LI Chunbin, ZHANG Jianye, LI Peng. Multi-objective optimization model of micro-grid operation considering cost, pollution discharge and risk [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1051-1058. (in Chinese))

[4] 顾伟, 吴志, 王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (14): 177-185. (GU Wei, WU Zhi, WANG Rui. Multi-objective optimization of cmbined heat and power microgrid considering pollutant emission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 177-185. (in Chinese))

[5] 薛贵挺, 张焰, 刘玉娇, 等. 基于克隆选择算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备,2014,34(3): 16-21. (XUE Guiting, ZHANG Yan, LIU Yujiao, et al. Multi-objective operation optimization based on clone selection algorithm for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(3): 16-21. (in Chinese))

[6] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-14. (DING Ming, ZHANG Yinyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):7-14. (in Chinese))

[7] ABIDO M A. Optimal design of power system stabilizers using particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2002,17(3):406-413.

[8] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]//Anon. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia:IEEE,1995:1942-1948.

[9] 曹昕璐, 卫志农, 沈海平, 等. 考虑电网结构脆弱性的配电网网架优化规划[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):178-183. (CAO Xinyu, WEI Zhinong, SHEN Haiping, et al. Planning for distribution network structure optimization in consideration of its vulnerability[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015,43(2):178-183. (in Chinese))

[10] 王爽心, 韩芳, 朱衡君. 基于改进变尺度混沌优化方法的经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):90-95. (WANG Shuangxin, HAN Fang, ZHU Hengjun. Economic load dispatch based on improved mutative scale chaotic optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(24):90-95. (in Chinese))

[11] 李鹏, 徐伟娜, 周泽远, 等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3073-3080. (LI Peng, XU Weina, ZHOU Zeyuan, et al. Optimal operation of microgrid based on improved gravitational search algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(19):3073-3080. (in Chinese))

[12] MOHAMED F A, KOIVO H N. System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2010,32(5):398-407.

[13] 周孝法, 陈陈, 宋正强, 等. 基于改进 PSO 算法的 HVDC PI 控制器优化设计[J]. 高电压技术,2009, 35(2):408-414. (ZHOU Xiaofa, CHEN Chen, SONG Zhengqiang, et al. Optimal design for HVDC PI controllers based on improved PSO algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2):408-414. (in Chinese))

[14] CAPONETTO R, FORTUNA L, FAZZINO S, et al. Chaotic sequences to improve the performance of evolutionary algorithms [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(3): 289-304.

[15] 康立山, 谢云, 尤矢勇, 等. 非数值并行算法(第一册):模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 22-55.