

DOI: 10.7667/PSPC151381

基于鸟群算法的微电网多目标运行优化

曾 增, 彭春华, 王 奎, 张艳伟, 张明瀚

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了在微电网的运行中找到最理想的调度策略, 对于微电网的多目标优化问题, 采用传统智能算法求解易陷入局部最优而难于找到全局最优解, 因此采用一种生物启发式算法——鸟群算法, 对以运行成本及环境污染度为目标的微电网多目标优化模型进行求解。该算法模仿鸟群觅食、警觉、迁移的习性, 生成对应的种群更新策略, 兼具粒子群算法搜索效率高和微分进化算法稳定性好的优点。通过与两者寻优结果比较, 表明该算法具有较强的全局、局部搜索能力且收敛鲁棒性好的特点。

关键词: 鸟群算法; 粒子群算法; 微分进化算法; 微电网; 多目标优化

Multi-objective operation optimization of micro grid based on bird swarm algorithm

ZENG Ceng, PENG Chunhua, WANG Kui, ZHANG Yanwei, ZHANG Minghan

(School of Electrical & Electronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to find the best scheduling strategy in the operation of the micro grid, it is easy to fall into local optimal and difficult to find the global optimal solution by using traditional intelligent algorithm to solve the micro grid optimization problem, thus using a bio-inspired method named Bird Swarm Algorithm to solve a multi-objective optimization model for micro grid taking operation cost and environmental pollution as objectives. The algorithm puts forward the corresponding strategies of population renewal imitating the birds' foraging behavior, vigilance behavior and flight behavior. It has the advantages in high efficiency as Particle Swarm Optimization (PSO) and stability as Differential Evolution algorithm (DE). It shows strong global and local search ability and high robustness when compared with PSO and DE.

Key words: bird swarm algorithm; particle swarm optimization, differential evolution algorithm; micro grid; multi-objective optimization

0 引言

随着国民经济的迅猛发展,用电负荷逐年增加,传统一次能源(煤、石油、天然气)日益枯竭,新型可再生能源(风能、太阳能、潮汐能、生物质能等)得到越来越广泛的使用。各种分布式电源的接入给电力系统注入了新鲜的血液,但是由于风速和光照强度受气候及天气的影响很大,导致风机和光伏阵列出力具有明显的间歇性和不确定性,对原电力网络的电能质量和供电可靠性带来一定的影响^[1],为解决这一问题,微电网应运而生^[2]。

目前,针对微电网的优化问题研究主要集中在微电网的经济性,环保性和可靠性方面^[3-5],采用遗传算法、粒子群算法、微分进化算法等群智能优化算法对模型进行求解。文献[6]建立了同时考虑运行

成本、电压偏差及微电网削峰填谷能力的微网多目标优化模型,应用层次分析法通过设置各目标的权重将多目标问题转换为单目标问题,然而单一目标的优化结果不能清晰地反映各目标之间的矛盾关系,且权重的设置主观性较强,不便于进行实际调度。文献[7]采用粒子群算法研究了除包含运行成本和排放成本外,计及用户停电成本的微电网经济运行问题,然而粒子群算法中由于当某个粒子处于最优解的位置时,会导致成群的粒子聚集在该处,从而使得算法寻优收敛速度较慢且容易过早陷入局部最优,必须多次运行才能求得理想最优解。文献[8]采用协同进化遗传算法研究了冷热电联产型的微电网经济环保调度问题,使用群体寻优目标函数和精英寻优目标函数寻求分阶段经济调度最优解,较仅采用群体寻优目标函数方法优化出力的综合成本更

小。文献[9]提出用克隆选择算法对微电网多目标运行优化问题进行求解,但该算法中的参数克隆数对程序运行时间和优化结果均会产生影响,二者互为约束不能同时达到最好,具有一定局限性。

文献[10]构建了包含运行成本最低、二氧化碳排放最少、污染物处理费用最低的多目标微电网系统经济调度模型,采用带精英策略的非支配排序遗传算法求解,但仅考虑二氧化碳的排放,实际上二氧化硫和氮氧化物对空气的污染不容忽视。文献[11]采用人工蜂群算法对电力系统的多目标优化问题进行研究,该算法利用外部存档技术来保存进化过程中已经找到的 Pareto 最优解,并在每次迭代后更新,避免收敛于局部最优,提高了寻优性能,但采用该算法所求最优解分散性较大,不方便从中选择一个解作为最终决策方案。对于具有高度复杂性和不确定性而需要深度寻优的微网多目标优化运行来说,采用传统智能算法往往会导致寻优不彻底而陷入早熟从而寻找不到全局最优解,因此,构造高效又精确的算法显得至关重要。

鸟群算法(Bird Swarm Algorithm,BSA)是一种生物启发式智能算法,它的进化过程模拟鸟类觅食、警觉和迁移的行为,在求解非凸、不可微的复杂问题时,较于当前常用的粒子群算法、微分进化算法具有明显的优越性^[12]。本文采用 PSO、DE 和 BSA 对微电网的多目标优化问题进行求解,并对所得结果的 Pareto 前沿进行对比分析,体现出 BSA 良好的全局和局部搜索能力,可为其他优化问题提供参考。

1 微电网多目标优化模型

本文建立了包含风力发电机(Wind Turbine, WT)、光伏阵列(Photovoltaic array, PV)等不可控清洁发电单元,微型燃气轮机(Micro Turbine, MT)、柴油发电机(Diesel Generator, DE)等可控非清洁发电单元及储能电池(Energy Storage Battery, ES)的微电网并网运行模型,在最大限度地利用风能和光能等清洁能源的前提下,通过对 MT 和 DE 的出力、低压配电网传输功率及储能电池充放电策略进行优化,使微电网的运行最经济最环保。

1.1 各发电单元模型

1.1.1 微型燃气轮机燃烧成本模型

微型燃气轮机燃烧成本如式(1)所示。

$$F_{MT} = Q \frac{1}{C} \frac{P_{MT}}{\eta_{MT}} \quad (1)$$

式中: F_{MT} 为燃烧成本; Q 为天然气的价格; C 为天然气的低热值; P_{MT} 、 η_{MT} 分别为 MT 输出功率

和效率。

1.1.2 柴油发电机燃烧成本模型

柴油发电机燃烧成本如式(2)所示。

$$F_{DE} = \alpha + \beta P_{DE} + \gamma P_{DE}^2 \quad (2)$$

式中: F_{DE} 为燃烧成本; α 、 β 、 γ 为燃烧成本系数; P_{DE} 为 DE 输出功率。

1.2 目标函数

运行成本是衡量微电网经济运行的重要指标,主要包含机组的燃料成本、维护成本及低压配电网购电成本。同时,随着可持续发展战略的贯彻实施,环境效益也日益受到重视。本文定义污染度用以衡量 MT、DE 及从低压配电网吸收功率等效排放的 CO₂、SO₂、NO_x 等污染气体对环境的危害程度。由于 PV 和 WT 新能源机组运行中不产生污染气体,因此不考虑其污染度。目标函数表达式如下所示。

$$F_1 = \sum_{t=1}^{24} (C_{Ft} + C_{Mt} + C_{Gt}) \quad (3)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^{24} (K_1 M_{1t} + K_2 M_{2t} + K_3 M_{3t}) \quad (4)$$

其中,

$$C_F = F_{MT} + F_{DE} \quad (5)$$

$$C_M = M_{PV} P_{PV} + M_{WT} P_{WT} + M_{MT} P_{MT} + M_{DE} P_{DE} \quad (6)$$

$$M_{1t} = T_1 P_{MTt} + T_2 P_{DEt} + T_3 P_{Gridt} \quad (7)$$

$$M_{2t} = S_1 P_{MTt} + S_2 P_{DEt} + S_3 P_{Gridt} \quad (8)$$

$$M_{3t} = N_1 P_{MTt} + N_2 P_{DEt} + N_3 P_{Gridt} \quad (9)$$

式中: C_{Ft} 、 C_{Mt} 分别为微电源的燃料费用和维修费用; M_{PV} 、 M_{WT} 、 M_{MT} 、 M_{DE} 分别为 PV、WT、MT、DE 的维护成本系数; C_{Gt} 为 t 时间内从低压配电网的购电费用; K_i 为 CO₂、SO₂、NO_x 对大气的危害程度; M_{it} 分别为三种污染气体的排放量; T_i 、 S_i 、 N_i 分别为三种污染气体在 MT、DE 和电网发电形式下的排放系数。

1.3 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_{ES} + P_{Grid} = P_L \quad (10)$$

式中: P_i 为各微电源有功出力; n 为微电源数量; P_{ES} 为储能电池充放电功率,正值表示充电,负值表示放电; P_{Grid} 为微电网从低压配电网吸收的有功功率; P_L 为微电网负荷。

(2) 微电源出力约束

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{max} \quad (11)$$

式中: P_{min} 、 P_{max} 分别为微电源出力下限和上限。

(3) 联络线传输功率约束

$$0 \leq P_{\text{Grid}} \leq P_{\text{Gridmax}} \quad (12)$$

式中: P_{Gridmax} 为微电网与低压配电网之间允许的最大传输功率。

(4) 爬坡速率约束

增负荷时:

$$P_{\text{MT}}(t) - P_{\text{MT}}(t-1) \leq R_{\text{MTup}} \quad (13)$$

$$P_{\text{DE}}(t) - P_{\text{DE}}(t-1) \leq R_{\text{DEup}} \quad (14)$$

减负荷时:

$$P_{\text{MT}}(t-1) - P_{\text{MT}}(t) \leq R_{\text{MTdown}} \quad (15)$$

$$P_{\text{DE}}(t-1) - P_{\text{DE}}(t) \leq R_{\text{DEdown}} \quad (16)$$

式中, R_{MTup} 、 R_{MTdown} 、 R_{DEup} 、 R_{DEdown} 分别对应 MT 和 DE 的上下爬坡速率限值。

(5) 储能电池充放电约束

为保证储能电池的寿命, 充放电必须满足以下条件。

$$0.2S_{\text{max}} \leq S(t) \leq S_{\text{max}} \quad (17)$$

$$P_{\text{ES}}(t) \times \Delta t \leq 0.2S_{\text{max}} \quad (18)$$

式中: S_{max} 为储能电池的最大容量; Δt 为一次充放电时间间隔。

2 鸟群算法

2.1 基本原理

鸟群算法是由 Xian-Bing Meng 等人根据自然界鸟群觅食、警觉和迁移等生物行为于 2015 年提出的一种新型生物启发式算法。该算法具有分散搜索, 保持种群多样性, 避免陷入局部最优的特点, 其模仿的生物行为可简化为如下规则:

(1) 每一只鸟自由选择觅食或保持警觉行为。

(2) 若选择觅食, 每一只鸟即时记录并更新其所经过的最佳觅食位置, 同时将此信息分享至整个种群, 并记录种群最佳觅食位置。

(3) 若保持警觉, 每只鸟均试图飞往种群的中心, 此行为受种群间的竞争影响, 食物储备多的鸟比储备少的有更大的概率飞往中心。

(4) 鸟群会周期性地飞往另一区域。鸟群之间会分享所寻觅的食物信息, 这一习性使得种群更有利于地生存下去。种群中食物储备最多的称为食物生产者, 储备最少的称为乞食者, 其它鸟随机作为二者之一。当鸟群从一个区域飞往另一区域, 各只鸟的身份将发生改变。

(5) 生产者积极寻找食物, 乞食者随机跟随一位

生产者寻找食物。

规则(1)可制定为一个随机决策, 当等概率产生的(0, 1)之间随机数大于常数 P 时, 鸟觅食, 否则保持警觉。

每一只鸟根据自己和种群的觅食经验寻找食物, 规则(2)可由下式表示。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + (p_{i,j} - x_{i,j}^t) \times C \times \text{rand}(0,1) + (g_j - x_{i,j}^t) \times S \times \text{rand}(0,1) \quad (19)$$

式中: $x_{i,j}^t$ 为鸟当前所在位置; $p_{i,j}$ 为第 i 只鸟所经过的最佳位置; g_j 为种群最佳位置; C 、 S 为两个正常数, 分别称为认知系数及社会进化系数。

对于规则(3), 鸟试图飞往种群的中心位置, 这不可避免会与其它鸟产生竞争, 因此, 每一只鸟不会直接飞到种群中心。这种行为可由下式表示。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + A1 \times (\text{mean}_j - x_{i,j}^t) \times \text{rand}(0,1) + A2 \times (p_{k,j} - x_{i,j}^t) \times \text{rand}(-1,1) \quad (20)$$

$$A1 = a1 \times \exp\left(-\frac{pFit_i}{\text{sumpFit} + \varepsilon} \times N\right) \quad (21)$$

$$A2 = a2 \times \exp\left(\left(\frac{pFit_i - pFit_k}{|pFit_i - pFit_k| + \varepsilon}\right) \times \frac{pFit_k \times N}{\text{sumpFit} + \varepsilon}\right) \quad (22)$$

式中: k 是 $[1, N]$ 之间的随机整数, 且 $k \neq i$; N 为种群规模; $a1$, $a2$ 是 $[0, 2]$ 之间的常数; $pFit_i$ 为第 i 只鸟的适应度值; sumFit 为整个种群的适应度之和; ε 用来避免零分割, 是计算机里最小的常数; mean_j 为种群的平均适应度值。

为逃避追捕或寻找食物, 鸟群会定期飞往其他区域, 设迁移周期为 FQ , 当到达另一区域后, 它们会重新觅食。一些作为生产者的鸟开始寻找食物, 其他鸟跟随生产者寻觅食物。生产者和乞食者可由规则(4)从种群中筛选, 生产者和乞食者的行为可由下式描述。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + x_{i,j}^t \times \text{randn}(0,1) \quad (23)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + (x_{k,j}^t - x_{i,j}^t) \times FL \times \text{rand}(0,1) \quad (24)$$

式中: $\text{randn}(0,1)$ 代表产生服从期望值为 0, 标准差为 1 的高斯分布的一个随机数; $k \in [1, N]$, 且 $k \neq i$; FL ($FL \in [0, 1]$) 为乞食者随同生产者觅食的概率。

2.2 算法流程

针对本文采用的微电网多目标优化模型, 结合鸟群算法求解的流程图如图 1 所示, 具体流程如下所述。

① 初始化鸟群算法各参数, 在满足各种约束条件下产生种群, 初始化各类型机组每一时段出力,

每个个体对应一套调度方案。

② 计算各目标适应度值,判断各个体的支配关系,筛选出非劣解,并从中随机选取个体作为全局最优解。

③ 根据鸟群的生物行为对应的更新策略对种群进行更新,同时限定各机组出力使得满足约束条件。

④ 计算新种群的适应度值,判断支配关系形成新的非劣解,并与旧非劣解合并,剔除重复个体,更新历史最优解。

⑤ 判断是否满足终止条件。若满足,输出最终非劣解集,否则迭代次数加 1,回到③继续进化种群。

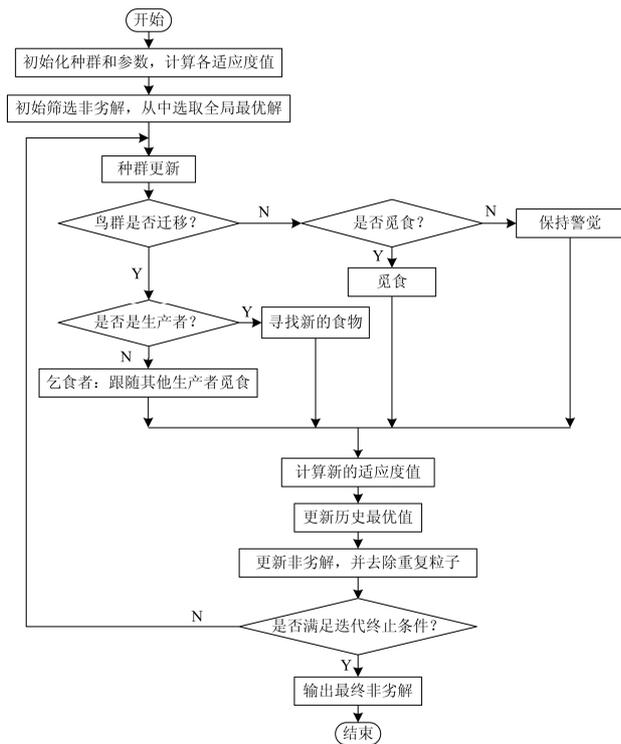


图 1 BSA 流程图

Fig. 1 Flow chart of BSA

3 算例分析

为验证本文所提算法的有效性,以含光伏阵列、风力发电机、微型燃气轮机、柴油发电机、储能电池和负荷的微电网系统为例进行多目标优化调度,其结构如图 2 所示,其中 S1 至 S7 为负荷。

MT、DE 及电网的各污染物排放量如表 1 所示,单位 $g/kW \cdot h$ 。由文献[13]根据三种气体的环境价值计算出其对大气的污染度系数分别为 0.067, 0.4, 0.533。

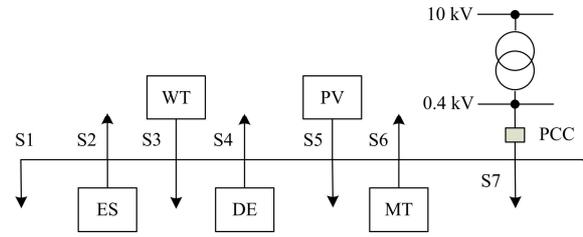


图 2 微电网结构图

Fig. 2 Structure diagram of micro grid

表 1 污染气体排放系数

Table 1 Emission coefficient of pollution gas

对象	CO ₂	SO ₂	NO _x
MT	725	2.28	1.82
DE	1143	8.79	3.74
电网	889	3.15	2.35

微电网购电价格如表 2 所示。

表 2 微电网购电电价

Table 2 Power price of micro grid purchase

名称	时段	价格/(元/ kW · h)
平时段	07:00-10:00	0.49
	15:00-18:00	
	21:00-23:00	
峰时段	10:00-15:00	0.83
	18:00-21:00	
谷时段	23:00-次日 7:00	0.17

全天负荷如图 3 所示。

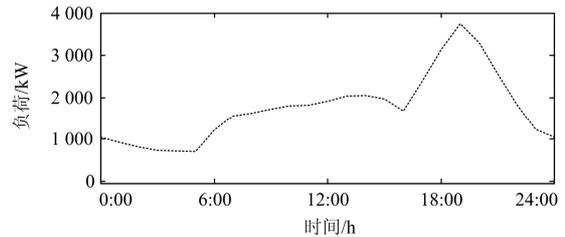


图 3 全天负荷曲线

Fig. 3 Daily load curve

根据太阳辐射强度及风速预测 PV、WT 出力如图 4 所示。

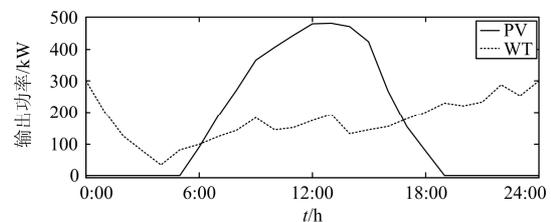


图 4 PV、WT 出力曲线

Fig. 4 PV and WT power curve

为充分利用清洁的新能源, PV 和 WT 采用最大功率点跟踪模式(Maximum Power Point Trace, MPPT), 微电网完全消纳其输出功率, MT、DE 额定功率均为 600 kW, ES 最大容量为1000 kW·h, 最大输出功率为 200 kW, 最小储能量为 200 kW·h。

本文所用 PSO 参数为: $c1 = c2 = 1.5$, 惯性因子 ω_{max} 、 ω_{min} 分别为 1.2 和 0.1; DE 参数为: 缩放因子 $F = 0.5$, 交叉概率 $C = 0.3$; BSA 参数为: $c1 = c2 = 1.5$, $C = S = 1$, $FQ = 5$; 三种算法种群规模均为 100, 迭代次数均为 500, 进行多目标优化求解所得结果如图 5 所示, 对比三图可知, 采用 BSA 所得 Pareto 前沿比采用 PSO 和 DE 更加光滑完整, 非劣解分布更加广泛, 且更接近真实最优解, 对微电网的经济环保运行调度提供了更全面合理的选择。

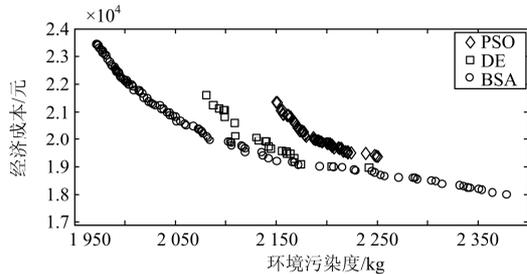


图 5 PSO、DE 和 BSA 所求非劣解

Fig. 5 Pareto solutions of PSO, DE and BSA

对于非劣解所形成的 Pareto 前沿, 可通过参数 Δ 判断解的优劣性, Δ 表征所得解的均匀程度, 其值越大, 说明解分布越不均匀, 越小则越均匀。 Δ 可由式(25)算出^[14]。

$$\Delta = \frac{df + dl + \sum_{i=1}^{N-1} |di - \bar{d}|}{df + dl + (N-1)\bar{d}} \quad (25)$$

式中: 各参数示意如图 6 所示, df 和 dl 表示 Pareto 前沿的两端点解与其相邻解之间的距离; di 表示除端点解之外相邻非劣解之间的距离; \bar{d} 为所有 di 的平均值。

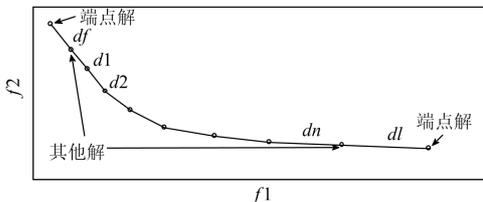


图 6 分布特性度量

Fig. 6 Distribution characteristics metric

由于两目标函数值相差较大, 因此先将三种算法所求非劣解进行归一化, 再分别代入式(25), 所得 Δ 分别为 0.9690、0.9698 和 0.9088, 可见采用 BSA

比用 PSO 和 DE 所得解更加均匀, 便于筛选出最优折中方案。

在电力系统的实际运行中, 调度方案一般只有一个, 因此需要在众多 Pareto 非劣解中选择一个解作为决策者实施的最终方案。由文献[15]所提模糊集理论确定最优折中解, 对 BSA 的非劣解集进行处理, 所得运行成本为 19 732 元, 污染度为 2106 kg, 具体调度方案如图 7 所示。

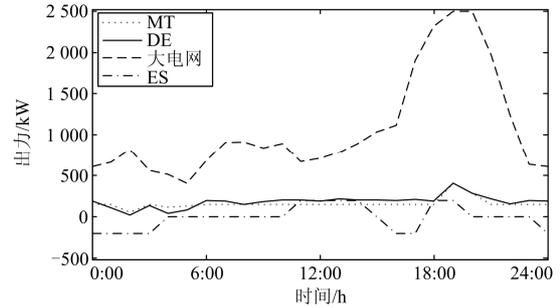


图 7 最优折中方案出力

Fig. 7 Power of optimal compromise solution

4 结论

本文构建了以微电网运行成本及环境污染度为目标的微电网多目标优化模型, 并采用鸟群算法进行求解。该算法是 PSO 和 DE 的有效结合, 较于二者具有更强的最优解搜索能力, 通过与 PSO 和 DE 寻优效果的算例对比, 充分体现了该算法的高效性。今后的工作方向将着重于对求解模型的改进, 本文光伏和风机出力采用预测值, 与实际值有一定偏差, 可将此偏差考虑在内完善模型, 使得优化调度结果更具有实用价值。

参考文献

- [1] MENDEZ Q V H, RIVIER A J, GOMEZ S R T. Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 533-540.
- [2] LASSETER R H, PAIG I P. Micro grid: a conceptual solution[C] // IEEE Power Electronic Specialists Conference, Aachen, 2004.
- [3] 杨毅, 雷霞, 叶涛, 等. 考虑安全性与可靠性的微电网电能优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3080-3088.
YANG Yi, LEI Xia, YE Tao, et al. Micro grid optimization scheduling considering security and reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3080-3088.
- [4] LIA G C. Solve environment economic dispatch of smart micro grid containing distributed generation system: using

- chaotic quantum genetic algorithm[J]. *Electrical Power and Energy System*, 2012, 43(1): 779-787.
- [5] MOHAMED F A, KOIVO H. System modeling and online optimal management micro grid using mesh adaptive direct search[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 2010, 32(5): 398-407.
- [6] 杨毅, 雷霞, 徐贵阳, 等. 采用PSO-BF算法的微电网多目标电能优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(13): 13-20.
YANG Yi, LEI Xia, XU Guiyang, et al. Multi-objective optimization scheduling of micro grid using PSO-BF algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(13): 13-20.
- [7] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(17): 25-31.
LU Jinling, MIAO Yuyang, ZHANG Chengxiang, et al. Power system optimal dispatch considering wind farms based on improved multi-objective particle swarm algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(17): 25-31.
- [8] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(5): 85-89.
SONG Xiaoying, WANG Yansong. Economic and environmental dispatch of micro grid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(5): 85-89.
- [9] 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 of micro grid based on clonal selection algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(3): 16-21.
- [10] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(1): 365-373.
ZHUANG Huaidong, WU Hongbin, LIU Haitao, et al. Multi-objective economic dispatch of micro grid system considering electric vehicles[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(1): 365-373.
- [11] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(8): 1-7.
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(8): 1-7.
- [12] MENG X B, GAO X Z, LU L H. A new bio-inspired optimization algorithm: bird swarm algorithm[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligent*, 2015.
- [13] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(25): 17-25.
MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an island micro grid using improved bacterial foraging algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(25): 17-25.
- [14] DEB K, PRATAPA, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [15] FARINA M, AMOTA P. A fuzzy definition of 'optimality' for many-criteria optimization problem[J]. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Part A*, 2004, 34(3): 315-326.

收稿日期: 2015-08-07; 修回日期: 2016-01-20

作者简介:

曾 增(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网的优化运行; E-mail: 476108626@qq.com

彭春华(1973-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微电网优化运行与控制、智能优化算法。E-mail: chinapch@163.com

(编辑 张爱琴)