

采用 PSO-BF 算法的微电网多目标电能优化调度

杨毅, 雷霞, 徐贵阳, 吴泓俭, 卢杨

(电力电子节能技术与装备重点实验室(西华大学), 四川 成都 610039)

摘要: 考虑到微电网中各分布式电源的特点以及充分发挥分布式发电技术在经济、环境和能源方面的优势, 在满足系统约束条件下, 提出了一种综合考虑微电网的运行成本、电压偏差以及微电网削峰填谷能力的微电网多目标经济调度模型。同时针对粒子群算法(PSO)在求解优化问题时易陷入局部最优的缺点, 提出一种粒子群-细菌觅食算法(PSO-BF)用于求解微电网电能优化调度问题。仿真结果表明该算法具有较强的全局、局部搜索能力且收敛速度快、精度高的特点。

关键词: 微电网; 粒子群-细菌觅食算法; 优化调度; 运行优化; 多目标

Multi-objective optimal dispatch of microgrid using particle swarm optimization combined with bacterial foraging algorithm

YANG Yi, LEI Xia, XU Gui-yang, WU Hong-jian, LU Yang

(Key Laboratory of Power Electronic Energy-saving Technology & Equipment, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Given the features of each distributed power in the microgrid and the purpose of maximizing the advantages of the techniques of distributed generation which are shown in the aspects of economy, environment and energy, after meeting the constraints from the system, this paper proposes an economic dispatching model of the multi-objective microgrid which is an integrated consideration of the running costs, voltage bias and the capability of cutting the summit and filling the peak valley of the microgrid. Meanwhile, it's easy to sink into the shortage of partial optimization while coping with the issue of optimization when the calculation of PSO is adopted, in order to avoid this shortage this paper proposes PSO-BF to solve the problem of optimal dispatch in the microgrid. Moreover, the emulating results show that the calculation of PSO-BF has the features of the whole and partial searching capabilities, fast convergence and high accuracy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007006).

Key words: microgrid; particle swarm optimization combined with bacterial foraging algorithm; optimal dispatch; operation optimization; multi-objective

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0013-08

0 引言

为了充分利用分布式发电(Distributed Generation, DG)所带来的经济效益, 减少其对大电网的冲击, 微电网的概念被提了出来^[1]。微电网技术在减少集中输电过程中的线路损耗、改善大电网的峰谷性能、提高供电可靠性以及减少对环境的污染等方面得到越来越多的关注, 为可再生能源的充分利用创造了良好的环境。但是, 微电网具有复杂、多样的能源结构、电源类型和控制方式, 如何妥善

地管理微电网中 DG 的运行以实现微电网灵活、高效、经济、环保的运行, 仍存在诸多问题^[2-3]。

微电网的优化调度是微电网规划中需要重点考虑的问题, 国内外的学者在这一方面取得了一些理论和实践方面的成果。文献[4]研究了微电网分别处于孤网运行与联网运行时的经济性, 并运用基于实数编码的改进自适应遗传算法对其进行数值求解。文献[5]提出了综合考虑运行成本和污染物排放成本的微电网经济调度模型, 并利用混沌量子遗传算法求解微电网经济调度模型。文献[6]综合考虑了微型燃气轮机的发电效率、制热效率和污染排放特性, 建立了运行费用、CO 排放量以及 NO_x 排放量最小的多目标机会规划模型。文献[7]考虑 DG 安装成本、运行维护成本以及与大电网交互成本, 建立了以微

基金项目: 国家自然科学基金项目(51007006); 电力电子节能技术与装备重点实验室开放基金(szjj2014-015); 四川省教育厅重点项目(11za002)

电网的运行成本最小为目标函数。为了充分发挥分布式电源发电优势,维护系统稳定,改善电压质量,提高系统的可靠性,文献[8]提出以电压偏差最小、系统网损最小以及分布式电源运行效率最大的多目标函数模型,并利用小生境进化的多目标免疫算法求解该多目标模型。文献[9]考虑分布式电源故障、负荷需求以及用电性质的微电网停电损失,提出以投资运行费用和停电损失之和最小的微电网电能优化模型。但以上文献中都未考虑分布式电源出力对大电网削峰填谷的影响。

本文研究了含风机、光伏阵列以及其他分布式电源的微电网电能优化调度方法,并结合微电网的特点,综合考虑分布式电源约束,建立了微电网运行费用最小、电压偏差最小、微电网削峰填谷能力最大以及综合效益最大的多目标电能优化调度模型。针对 PSO 易早熟收敛、局部搜索能力弱的缺点,本文在前述工作的基础上,结合细菌觅食算法(BFA)局部搜索能力强的特点,提出了一种 PSO-BF 算法用于求解微电网电能优化调度问题,并通过算例进行验证分析。

1 并网运行方式下微电网优化调度模型

1.1 目标函数

本文考虑微电网系统包含有风机(wind turbine, WT)、光伏(photovoltaic cell, PV)、燃料电池(fuel cell, FC)和微型燃气轮机(micro turbine, MT)四种分布式电源,建立了包含运行费用指标、电压偏差指标以及配电网负荷曲线均方差的微电网多目标优化调度模型。因此,微电网电能优化调度的多目标函数表示为

$$F = \min(CFI, \Delta VI, LSI) \quad (1)$$

式中: F 为目标函数值; CFI 为微电网运行费用指标; ΔVI 为微电网系统电压偏差指标; LSI 为微电网削峰填谷的能力指标。

本文利用加权系数法将多目标函数转化为综合目标函数^[10]。因此,微电网多目标电能优化调度的目标函数表示为

$$\min F = \omega_1 \cdot CFI + \omega_2 \cdot \Delta VI + \omega_3 \cdot LSI \quad (2)$$

式中, ω_i 为指标 i 的权重系数。

1) 微电网运行费用指标 CFI 最小

$$\min CFI = \frac{CF_{DG}}{CF_{non_DG}} \quad (3)$$

式中, CF_{DG} 、 CF_{non_DG} 分别为考虑与不考虑分布式电源出力时微电网运行成本。计算公式为

$$CF = \sum_{i=1}^N (FC_i(P_i) + OM_i(P_i) + CE(P_i) + STC_i) + PE - SE \quad (4)$$

式中: N 为分布式电源类型数目; P_i 为第 i 种分布式电源的出力; FC_i 为第 i 种分布式电源的燃料费用; OM_i 为第 i 种分布式电源的维护费用; CE_i 为第 i 种分布式电源污染物处理费用; STC_i 为第 i 种分布式电源启动费用; PE 为微电网从主网购电成本; SE 为微电网向主网的售电成本。 FC 、 OM 、 CE 、 PE 、 SE 的计算公式为

$$\begin{cases} FC = \sum_{i=1}^N Kf_i \cdot P_i; & PE = C_p \cdot \max(P_L - \sum_{i=1}^N P_i) \\ OM = \sum_{i=1}^N Kom_i \cdot P_i; & SE = C_s \cdot \max(\sum_{i=1}^N P_i - P_L) \\ CE = \sum_{j=1}^K \alpha_j \sum_{i=1}^N \beta_{ij} \cdot P_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: Kf_i 为第 i 种分布式电源的单位燃料费用; Kom_i 为第 i 种分布式电源的单位维护费用; K 为污染物排放类型(CO_2 、 SO_2 和 NO_x); α_j 为处理第 j 种污染物的单位费用(\$/kg); β_{ij} 为第 i 种电能生产方式下所排放的第 j 种污染物的排放系数(g/kWh); C_p 和 C_s 分别为当前时间段下微电网的购电电价和微电网售电电价。

2) 微电网系统电压偏差指标 ΔVI 最小

$$\min \Delta VI = \frac{\Delta V_{DG}}{\Delta V_{non_DG}} \quad (6)$$

式中, ΔV_{DG} 、 ΔV_{non_DG} 分别为考虑与不考虑分布式出力时微电网系统电压偏差。计算公式为

$$\Delta V = \sum_{i=1}^m \Phi(|\Delta V_i| - \delta V_i) \quad (7)$$

式中: m 为微电网的节点数; ΔV_i 为节点 i 的电压偏差量; δV_i 为节点 i 允许的最大节点电压偏差; 函数 Φ 的计算公式为

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & x > 0 \end{cases} \quad (8)$$

3) 配电网负荷曲线均方差指标 LSI 最小

微电网并入大电网后,为了更好地发挥微电网对低压配电网(Distribution Network, DN)削峰填谷作用,减少大电网中常规机组的开停机次数以及旋转备用容量,使 DN 的负荷曲线尽量平坦。因此, DN 负荷曲线均方差指标的计算公式为

$$\min LSI = \frac{LS_{DG}}{LS_{non_DG}} \quad (9)$$

式中, LS_{DG} 、 LS_{non_DG} 分别为考虑与不考虑 DG 出力时 DN 负荷曲线的均方差。利用负荷均方差评价微

电网对 DN 削峰填谷作用的计算公式为

$$LS = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T [(LD_i + P_{\text{link},i}) - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T LD_j]^2} \quad (10)$$

式中: T 为一日中负荷数据点的个数; LD_i 为主网在时刻 i 的负荷; $P_{\text{link},i}$ 为时刻 i 的联络线交换功率。

1.2 约束条件

1) 分布式电源出力约束

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

式中, $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为分布式电源出力下限和上限。

2) 微电网功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_{\text{link}} = P_L + P_{\text{loss}} \quad (12)$$

式中, P_i 、 P_{link} 、 P_L 、 P_{loss} 分别为分布式电源出力、微电网与主网电能交互功率、微电网负荷以及微电网系统网损。

3) 联络线传输功率约束

$$P_{\text{link},\min} \leq P_{\text{link}} \leq P_{\text{link},\max} \quad (13)$$

式中, $P_{\text{link},\min}$ 、 $P_{\text{link},\max}$ 分别为联络线的传输功率下限和上限。

4) 微电网线路传输功率约束

$$P_{\text{line},\min} \leq P_{\text{line}} \leq P_{\text{line},\max} \quad (14)$$

式中, $P_{\text{line},\min}$ 、 $P_{\text{line},\max}$ 分别为微电网线路的传输功率下限和上限。

5) 微电网系统潮流方程约束^[11]

$$\begin{cases} P_{s,i} = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{s,i} = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{s,i}$ 、 $Q_{s,i}$ 为各个节点有功、无功功率; V_i 为节点 i 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵元素的实部和虚部; θ_{ij} 为线路 ij 两端的相角差。

2 PSO-BF 混合算法

2.1 粒子群算法

粒子群算法是由美国的 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的, 源于对鸟群和鱼群群体觅食运动行为的模拟, 它是一种全局优化进化算法。粒子就是通过自己的经验和同伴中最好的经验来决定下一步的运动。粒子群算法中每一个粒子都是代表问题的一个潜在解, 每个粒子对应一个由粒子位置决定的适应度值。粒子的速度决定了粒子运动的方向和距离, 速度随自身及其他粒子的移动经验进行动态调整, 从而实现个体在可解空间中的寻优^[12-13]。PSO

算法的更新公式为

$$\begin{cases} V_i = w \cdot V_i + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (pbest_i - X_i) + \\ \quad c_2 \cdot \text{rand} \cdot (gbest_i - X_i) \\ X_i = X_i + V_i \end{cases} \quad (16)$$

式中: V_i 是粒子的速度; X_i 是粒子的位置; $pbest$ 是每个粒子到目前为止发现的最好位置; $gbest$ 是整个群体中所有粒子发现的最好位置; rand 是介于(0、1)之间的随机数; X_i 是粒子的当前位置; c_1 和 c_2 是学习因子。

2.2 细菌觅食算法

细菌觅食算法(BFA)是由 Passino 于 2002 年基于细菌觅食行为过程而提出的一种仿生随机搜索算法。该算法有群体智能算法的并行搜索、易计算局部极小值等优点。BFA 模拟细菌群体的行为, 包括三层循环, 外层是驱散操作, 中间层是繁殖操作, 内层是趋化操作。算法的核心是趋化操作, 它对应着细菌在寻找食物过程中所采取的方向选择策略, 一定程度上决定了算法的收敛性。在趋化过程中细菌的运动模式包括翻转和前进。翻转是细菌向任意方向移动单位步长, 其更新的公式为

$$\begin{cases} P(i, j+1, k, l) = P(i, j, k, l) + c(i)\phi(i) \\ \phi(i) = \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \end{cases} \quad (17)$$

游动阶段

$$P(i, j+1, k, l) = P(i, j, k, l) + c(i) \quad (18)$$

式中: $P(i, j, k, l)$ 表示个体 i 在第 j 代趋向第 k 代繁殖第 i 代驱散时的位置; $c(i)$ 表示步长; $\phi(i)$ 表示翻转的方向; $\Delta(i)$ 为翻滚阶段变向中生成的随机向量。

2.3 PSO-BF 算法流程

粒子群算法虽具有相当快的逼近最优解的速度, 但容易产生早熟收敛、局部寻优能力较差且容易陷入局部最优。细菌觅食算法的优势是细菌个体利用趋化过程可以找到其所在邻域内最优值, 避免细菌在探索过程中错过了更优解所在的区域, 但环境感知能力较弱且收敛速度慢。因此, 本文设计的 PSO-BF 算法弥补了 PSO 和 BFA 的缺陷, 在 PSO 算法局部搜索时, 加入 BFA 的趋化过程, 且趋化过程不再是沿着任意方向, 而是向着更优位置的方向以较大的步伐和有目的的方向操作, 增强了 PSO-BF 算法的局部搜索能力。因此, PSO-BF 算法趋化过程的更新公式为

$$\begin{cases} V_i = w \cdot V_i + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (pbest_i - X_i) + \\ \quad c_2 \cdot \text{rand} \cdot (gbest_i - X_i) \\ P(i, m+1, n, M) = P(i, m, n, M) + c(i)V(i) \end{cases} \quad (19)$$

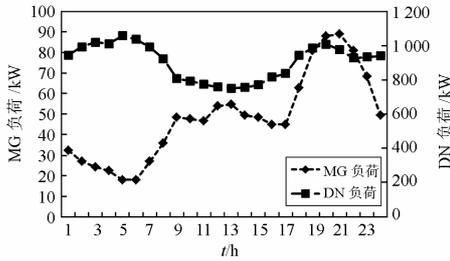


图3 微电网和配网 24 h 负荷曲线

Fig. 3 24-hour load curve of microgrid and distribution network

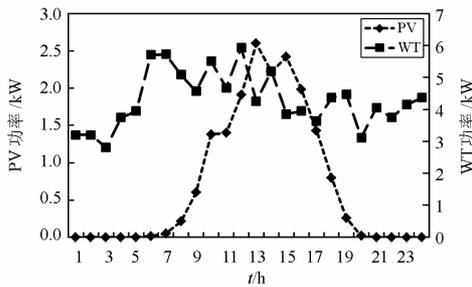


图4 微电网 24 h 光伏和风机出力曲线

Fig. 4 24-hour photovoltaic and wind turbine power curves of microgrid

本文采用 6 时段 3 级分时电价标准^[14], 分时电价如表 1 所示。微电网中各分布式电源的参数如表 2 所示。MT、FC 以及 DN 的温室气体的排放系数和污染物处理费用系数^[15-16]如表 3 所示。

表 1 微电网购电及售电价

Table 1 Power purchase price and sale price of microgrid

交易方式	价格/(¥/kWh)		
	峰时段	平时段	谷时段
购电	0.83	0.49	0.17
售电	0.65	0.38	0.13

表 4 不同算例下的各目标函数的权重系数和 24 h 总函数值

Table 4 Weight coefficient of each objective function and 24-hour total function values in different examples

算例	标度			权重			运行费用/¥	$\delta_{CF}/\%$	电压偏差/V	$\delta_{\Delta 1}/\%$	负荷均方差	$\delta_{LS}/\%$
	S_{1-2}	S_{1-3}	S_{2-3}	ω_1	ω_2	ω_3						
1	—	—	—	1	0	0	525.15	—	392.97	—	107.23	—
2	—	—	—	0	1	0	1 130.92	+115.35	343.76	-12.52	106.07	-1.08
3	—	—	—	0	0	1	1 147.21	+118.45	370.79	-5.64	77.42	-27.80
4	1	1	1	0.334	0.333	0.333	624.27	+18.87	379.76	-3.36	96.97	-9.57
5	3	3	1	0.600	0.200	0.200	546.22	+4.01	383.87	-2.32	104.28	-2.75
6	3	5	3	0.692	0.231	0.077	540.73	+2.97	384.56	-2.14	104.57	-2.48
7	5	5	1	0.714	0.143	0.143	542.64	+3.33	384.42	-2.18	104.49	-2.56
8	5	9	3	0.751	0.178	0.071	540.72	+2.96	384.63	-2.12	104.56	-2.49
9	9	9	1	0.818	0.091	0.091	540.72	+2.96	384.63	-2.12	104.56	-2.49

注: δ_* 为算例 2-9 函数值相对于算例 1 的变化量; 标度 $S_{x,y}$ =1,3,5,9 分别表示为目标 x 相对于目标 y 同等重要, 稍微重要, 明显重要, 极端重要。

表 2 各分布式电源的参数

Table 2 Parameters of each distributed generation

类型	功率/kW		管理费用/(¥/kWh)	使用寿命/年
	下限	上限		
光伏电池	0	20	0.009 6	20
风机	0	12	0.029 6	10
燃料电池	0	30	0.029 3	10
燃气轮机	0	30	0.088 0	10

表 3 温室气体排放和处理参数

Table 3 Parameters of greenhouse gas emission and process

类型	排放系数(g/kWh)			处理系数/(¥/kg)
	MT	FC	DN	
CO ₂	724.6	489.4	1 230	0.023
NO _x	0.2	0.014	2.35	8.0
SO ₂	0.004	0.003	0.42	6.0

4 仿真结果

本文采用 Matlab 7.6 软件进行编程仿真, 在 PSO-BF 算法中取种群规模 $s=20$, 变量维数 $p=3$, 最大迭代次数 150 次, 最大趋化代数 $N_c=20$, 最大前进步数 $N_s=3$, 学习因子 $c_1=0.12$, $c_2=0.12$ 。标准 PSO 算法中, 种群的规模数为 $s=20$, 最大迭代次数 150 次, 学习因子 $c_1=0.12$, $c_2=0.12$ 。

4.1 不同权重对调度结果的影响

根据并网运行方式下微电网的调度原则, 选取目标函数的权重系数时应重点考虑微电网经济效益。本文利用文献[17]的层次分析法求得多目标函数的权重系数, 并以上述的微电网为例, 利用 PSO-BF 算法求解不同算例下微电网各目标函数值如表 4 所示。

从表 4 可以看出, 采用不同的权重系数会影响微电网的各目标函数值, 可根据运行经验由决策者适当调整权重系数, 以适应不同运行方式下的优化要求。

1) 算例 1 中考虑运行成本最小的微电网模型在一定程度上减少微电网的运行费用, 但是增大了微电网电压偏差以及减小微电网削峰填谷作用, 不利于微电网稳定运行。

2) 算例 2 中考虑节点电压偏差最小的微电网模型, 虽减少了系统的节点电压偏差, 但微电网的运行成本相对于算例 1 增加了 115.35%, 对微电网经济优化运行是不利的。

3) 算例 3 中考虑削峰填谷作用最大的微电网模型, 在一定程度上增加了对主网电能的供应, 对主网削峰填谷起到了较好的效果, 但微电网的运行费用相对于算例 1 增加了 118.45%。

4) 算例 4~9 中考虑微电网综合效益最大的调度模型, 当运行费用的权重系数在 0.60~0.82 之间变化时, 增大运行费用的权重对微电网调度的结果影响不大。虽算例 5~9 的运行费用相对于算例 1 增加了 2.96%~4.01%, 但其节点电压偏差和负荷均方差分别减少了 2.1%~2.4%和 2.4%~2.8%。因此, 算例 5~9 的运行费用在可接受的范围内, 且对微电网安全运行以及主网削峰填谷有利。因此, 本文选择算例 5~9 作为微电网综合效益最大目标函数进行优化结果分析。

4.2 运行成本最小的微电网调度(算例 1)

当微电网只考虑运行成本最小时, 利用 PSO-BF 算法优化后各分布式电源出力以及目标函数值如图 5 所示。

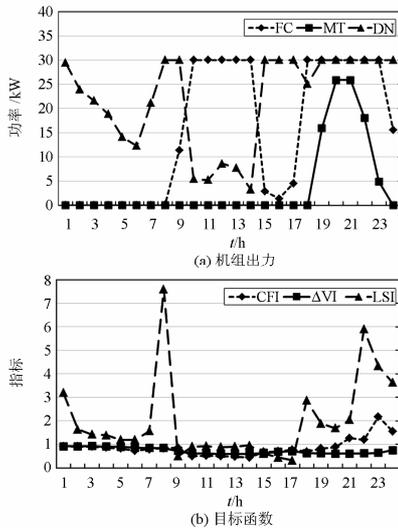


图 5 算例 1 中机组出力与目标函数值

Fig. 5 Power of units and objective function value in example 1

当微电网只考虑运行成本时, 从图 5 可以看出, 在 21~24 时段 CFI 指标大于 1, 其余时段小于 1, 这是由于在 21~24 时段负荷高峰时段, 为满足负荷需求, 微电网通过启动发电成本较高的 MT 机组, 导致此时段的发电成本较高。在 1~24 时间段内的 ΔVI 指标都小于 1, 而大部分时间段内 LSI 指标都大于 1, 只有少部分时间段内 LSI 指标是低于 1 的。说明当分布式电源加入微电网后, 有利于减少微电网的节点电压偏差, 但在 DN 负荷高峰时段, 微电网内部不足的负荷需要由 DN 提供, 大大增加了 DN 供电的负担, 导致 DN 负荷均方差增加, 此时微电网对 DN 削峰填谷作用是不利的。

4.3 综合效益最大的微电网调度(算例 5)

考虑微电网综合效益最大时, 以算例 5 为例, 利用 PSO-BF 算法优化后的分布式电源出力以及目标函数值如图 6 所示。从图 6 可以得出如下结论:

1) 在 07:00~08:00 时间段内, DN 负荷相对较大, 而微电网内部负荷相对较低, 微电网在满足自身负荷情况下, 通过增加分布式电源出力向 DN 售电; 在 09:00~17:00 时间段内, DN 的负荷相对较低, 微电网内部的负荷全部由 DN 和 FC 提供, 达到微电网系统的经济运行目的。在 18:00~22:00 时段内, 微电网系统优先调用 FC 和 MT 发电, 不足的负荷由 DN 提供, 对比图 5 可知, 考虑微电网综合最大时, 可以削减 DN 峰期负荷, 发挥微电网对 DN 削

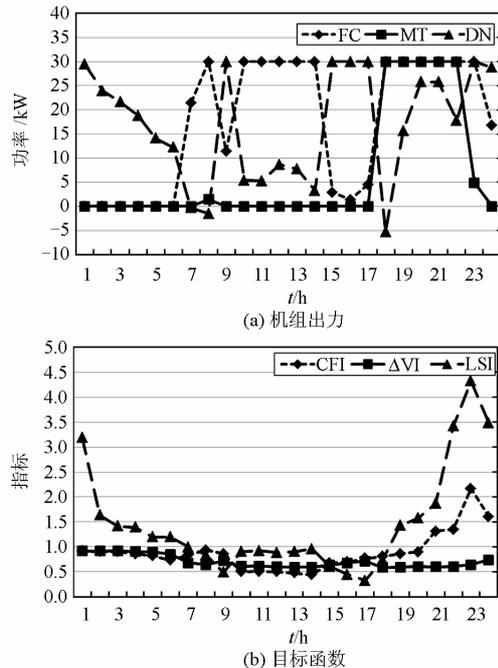


图 6 算例 4 中机组出力与目标函数值

Fig. 6 Power of units and objective function value in example 4

峰填谷能力。

2) 在整个时间段内, 算例 5 中 LSI 指标相对于算例 1 有所降低。但微电网为了达到削峰填谷作用, 在 DN 负荷峰时段, 微电网增加了分布式电源出力, 减少了向 DN 购电电量, 由于该时间段内的微电网单位发电费用大于微电网的购电电价, 微电网运行费用相对于算例 1 有所增加, 对微电网经济运行是不利的。因此, 通过微电网与 DN 之间的协调可以达到微电网综合效益最大化。

4.4 PSO-BF 与 PSO 算法比较

PSO 与 PSO-BF 算法在目标函数上测试 20 次, 通过对比 PSO 与 PSO-BF 算法在微电网经济调度收敛情况如图 7 所示。

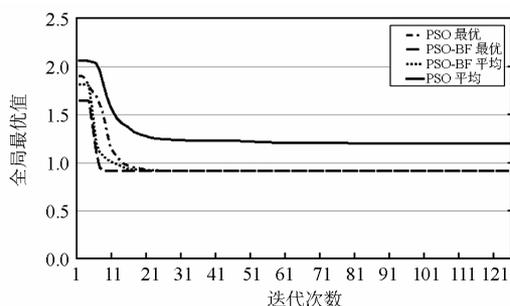


图 7 PSO 和 PSO-BF 算法的收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of PSO and PSO-BF algorithms

从图 7 中可以看出, PSO-BF 算法引入 BFA 算法趋化过程加快了粒子的收敛速度, 并且 PSO-BF 算法在搜索精度上优于 PSO 算法。同时, 驱散算子的引入减少了粒子陷入局部最优的概率, 保证了 PSO-BF 算法有较好的收敛特性。从而验证了 PSO-BF 具有优异的全局搜索能力和局部搜索能力, 且搜索精度高、收敛速度快、不易陷入局部最优的优点。因此, PSO-BF 算法在微电网经济调度中具有很好的应用价值。

5 结论

本文研究了微电网并网运行方式下的电能优化调度问题, 在满足负荷需求与分布式电源出力限制的前提下, 同时考虑了微电网发电成本、节点电压偏差以及微电网削峰填谷能力三个因素, 提出了微电网多目标经济调度模型, 并利用本文提出的 PSO-BF 算法求解不同权重系数下的微电网多目标经济调度模型。主要结论如下:

1) 不同权重系数下的微电网调度模型影响分布式电源的出力以及微电网的运行成本、电压偏差和微电网削峰填谷能力三个指标值, 决策者可以选

取不同的权重系数合理地安排分布式电源出力, 控制电网运行在安全、稳定、经济的范围内。

2) PSO-BF 算法具有较好的全局和局部搜索能力, 具有收敛速度快, 收敛精度高的特点, 通过求解微电网电能优化调度问题, 验证了该算法的有效性。因此, 该算法具有广泛的应用领域和前景。

参考文献

- [1] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution[C] // IEEE Power Electronic Specialists Conference, Aachen, 2004.
- [2] BEGOVIC M, PREGJE U A, ROHATGI A, et al. Impact of renewable distributed generation on power systems[C] // Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2001.
- [3] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 196-201. CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Microgrid energy management model based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 196-201.
- [4] 林伟, 陈光堂, 邱晓燕, 等. 基于改进自适应遗传算法的微电网负荷优化分配[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 49-55. LIN Wei, CHEN Guang-tang, QIU Xiao-yan, et al. Optimal load distribution of microgrid based on improved self-adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 49-55.
- [5] LIAO G C. Solve environmental economic dispatch of smart microgrid containing distributed generation system using chaotic quantum genetic algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 42(1): 779-787.
- [6] 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 combined heat and power microgrid considering pollutant emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 177-185.
- [7] MOHAMED F A, KOIVO H N. Microgrid online management and balancing using multi-objective optimization[C] // Power Tech 2007, Lausanne, Switzerland: 2007.
- [8] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能

- 量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.
- WANG Xin-gang, AI Qian, XU Wei-hua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.
- [9] 言大伟, 韦钢, 胡吟, 等. 可靠性与经济性相协调的微电网能量优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 18-23.
- YAN Da-wei, WEI Gang, HU Yin, et al. Microgrid energy optimization with coordination of reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 18-23.
- [10] 喻洁, 黄学良, 夏安邦. 基于分区协调优化的环境经济调度策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 129-136.
- YU Jie, HUANG Xue-liang, XIA An-bang. Environmental economic dispatch based on sub-area coordinated optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 129-136.
- [11] 胡吟, 韦刚, 言大伟, 等. 分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 100-105.
- HU Yin, WEI Gang, YAN Da-wei, et al. Optimization allocation of distributed generations embedded in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 100-105.
- [12] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143.
- LI Xin-bin, ZHU Qing-jun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 137-143.
- [13] 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 Jin-ling, MIAO Yu-yang, ZHANG Cheng-xiang, 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.
- [14] 曹培, 王媚, 郭创新, 等. 智能微网运行的低碳综合效益分析[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 15-20.
- CAO Pei, WANG Mei, GUO Chuang-xin, et al. Analysis on low-carbon integrative benefits of smart microgrid operation[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 15-20.
- [15] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Environmental benefits of distributed generation with and without emission strading[J]. Energy Policy, 2007, 35(6): 3395-3409.
- [16] 魏学好, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53-56.
- WEI Xue-hao, ZHOU Hao. Evaluating the environmental value schedule of pollutants mitigated in China thermal power industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1): 53-56.
- [17] 翁嘉明, 刘东, 何维国, 等. 基于层次分析法的配电网运行方式多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 56-61.
- WENG Jia-ming, LIU Dong, HE Wei-guo, et al. Multi-objective optimization of distribution network operation mode based on AHP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 56-61.

收稿日期: 2013-09-18; 修回日期: 2014-03-10

作者简介:

杨毅(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网优化运行; E-mail: yangyi24sincere@136.com

雷霞(1973-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力市场、调度自动化、配电自动化等。