

基于自然选择-杂交PSO算法的微电网并网多目标优化调度

由于微电网中的分布式电源具有较强的波动性和随机性,对微电网的并网运行产生很大影响。为充分消纳可再生能源,在综合考虑各分布式电源发电成本和环境治理费用的基础上,计及微电网并网收益、新能源发电补贴,结合分时电价机制,建立并网运行方式下的微电网多目标优化调度模型。针对现有标准粒子群算法中可能存在的局部收敛及速度慢等问题,提出基于自然选择-杂交的改进粒子群算法,应用于微电网并网的优化调度研究中,并结合实际微电网工程案例,验证所提出方法的合理性与有效性。

王凌云^{1,2} 徐嘉阳^{1,2} 丁梦^{1,2}/1.三峡大学电气与新能源学院 2.三峡大学新能源微电网湖北省协同创新中心

0 引言

微电网是一种新颖的电网络结构,在未来将会成为智能电网的重要组成部分,其以灵活多变的方式接入各类分布式电源,充分发挥分布式电源的优势,可以参与电力系统的运行。微电网中的分布式电源包括微型燃气轮机、光伏电池、风力发电和生物质能发电等,可以根据需要选择与电网并网运行或离网运行。并网时,微电网与大电网交互,大电网可以作为微电网的重要支撑,以保证微电网内部稳定;离网时,微电网由内部微源独立供电,由储能装置如蓄电池、飞轮储能等参与微电网的优化调度,以保证系统内部可靠性^[1-3]。

微电网的理论近年来已经取得了一定的成果,但是在微电网并网优化调度方面仍存在一些问题^[4-5]。文献[6]应用了

机会约束规划理论建立了热电联产型微电网的运行优化模型,并利用粒子群算法求解,但作者没有考虑环境污染的问题。文献[7]提出了一种微电网负荷优化分配的模型,考虑了电力系统运行约束条件、负荷需求,各种类型微源的燃料成本、维护成本和起动成本,并运用一种基于实数编码的改进自适应遗传算法对其进行数值优化计算,但是没有考虑各时段之间的协调配合。文献[8]讨论了多种因素对系统经济运行结果的影响,并建立包含钠硫电池的微电网经济优化模型。

本文在计及分时电价机制的基础上,综合考虑微电网发电成本、环境污染治理费用、并网收益及新能源发电补贴等多个因素,建立并网运行方式下的微电网多目标优化调度模型。针对标准粒子群算法的不足,提出基于自然选择-杂交的改进粒子群算法,应用于微电网并网的优化调度研究中,并结合实际微电网工程案例,验证所提出方法的合理性与有效性。

1 微电网并网优化调度模型

1.1 优化目标函数

本文以微电网总的发电成本最小、环境污染治理费用最小和并网收益最大,建立优化调度目标函数

$$\min F = \lambda_1 F_a + \lambda_2 F_b - \lambda_3 F_c \quad (1)$$

式中, F 为微电网并网运行总成本; F_a 为发电成本; F_b 为环境成本; F_c 为微电网并



王凌云/副教授

关键词/Keywords

微电网·
并网优化·
发电补贴·
杂交·
改进粒子群·

国家自然科学基金(51407104)项目,三峡大学研究生科研创新基金(SDYC2016043)项目。

网收益。 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为发电成本、环境污染治理成本及并网收益的权重比例系数。 λ 值的不同表示对运行总成本影响的差异大小。

(1) 微电网发电成本

微电网发电成本包括各微电源的燃料费用和运行维护费用,即

$$F_a = \sum_{t=1}^T [C_f(t) + C_m(t)] \quad (2)$$

式中, T 为调度周期, $T=24$; $C_f(t)$ 为 t 时段各微电源的燃料成本; $C_m(t)$ 为 t 时段各微电源运行维护费用。

1) 燃料费用 C_f

$$C_f(t) = c_{f,MT} P_{MT}(t) + c_{f,DE} P_{DE}(t) \quad (3)$$

式中, $c_{f,MT}$ 、 $c_{f,DE}$ 分别为微型燃气轮机和柴油发电机的燃料费用单价,元/kW·h; $P_{MT}(t)$ 、 $P_{DE}(t)$ 分别为微型燃气轮机和柴油发电机在 t 时段的发电功率, kW。

2) 运行维护费用 C_m

$$C_m(t) = c_{m,WT} P_{WT}(t) + c_{m,PV} P_{PV}(t) + c_{m,MT} P_{MT}(t) + c_{m,DE} P_{DE}(t) + c_{m,BA} |P_{BA}(t)| \quad (4)$$

式中, $c_{m,WT}$ 、 $c_{m,PV}$ 、 $c_{m,MT}$ 、 $c_{m,DE}$ 和 $c_{m,BA}$ 分别为风机、光伏、微型燃气轮机、柴油发电机和蓄电池的运行维护费用单价,元/kW·h; $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 为 t 时段风机、光伏的输出功率, kW; $P_{BA}(t)$ 为蓄电池在 t 时段的充放电功率, kW。

(2) 环境成本

在微电网中各微电源投入使用的过程中会产生如 NO_x 、 SO_2 和 CO_2 等气体污染物,将此类气体污染物治理费用计为环境成本,即

$$F_b = \sum_{t=1}^T [c_{p,MT} P_{MT}(t) + c_{p,DE} P_{DE}(t)] \quad (5)$$

$$c_{p,MT} = \lambda_{MT,CO} \sigma_{CO} + \lambda_{MT,SO} \sigma_{SO} + \lambda_{MT,NO_x} \sigma_{NO_x} \quad (6)$$

$$c_{p,DE} = \lambda_{DE,CO} \sigma_{CO} + \lambda_{DE,SO} \sigma_{SO} + \lambda_{DE,NO_x} \sigma_{NO_x} \quad (7)$$

式中, $c_{p,MT}$ 、 $c_{p,DE}$ 分别为微型燃气轮机和柴油发电机的污染气体治理单价,元/kW·h; $\lambda_{MT,CO}$ 、 $\lambda_{MT,SO}$ 和 λ_{MT,NO_x} 分别为微型燃气轮机生产单位电能的各污染物气体量, g/kW·h; $\lambda_{DE,CO}$ 、 $\lambda_{DE,SO}$ 和 λ_{DE,NO_x} 分别为柴油发电机产生单位电能的各污染物气体量, g/kW·h; σ_{CO} 、 σ_{SO} 和 σ_{NO_x} 分别为各污染物治理费用

单价,元/kg。

(3) 并网收益

微电网并网收益由微电网与大电网电能交易收益、可再生能源发电补贴两部分组成。

$$F_c = C_{grid} + C_{bt} \quad (8)$$

式中, C_{grid} 为整个调度周期内微电网与大电网电能交易的总收益; C_{bt} 为整个调度周期内微电网获得的总补贴收益。

1) 电能交易收益 C_{grid}

$$C_{grid} = \sum_{t=1}^T c_{grid}(t) |P_{grid}(t)| \quad (9)$$

$$c_{grid}(t) = \begin{cases} c_{buy}(t) & P_{grid}(t) \geq 0 \\ c_{sell}(t) & P_{grid}(t) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{grid}(t)$ 为 t 时段微电网与大电网的交互功率, kW; $c_{grid}(t)$ 为 t 时段微电网与大电网电能交易价格,元;当 $P_{grid}(t) \geq 0$ 时,取分时购电价格,元;当 $P_{grid}(t) < 0$,取分时售电价格,元。

2) 补贴收益 C_{bt}

政府为鼓励可再生新能源的建设投产,根据现有国家政策,特别是对风力发电及光伏发电实行分布式发电补贴。

$$C_{bt}(t) = c_{bt,WT} P_{WT}(t) + c_{bt,PV} P_{PV}(t) \quad (11)$$

式中, $c_{bt,WT}$ 、 $c_{bt,PV}$ 分别为风力发电和光伏发电的单位补贴价格,元/kW·h; $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 分别为 t 时段风力发电和光伏发电的发电功率, kW。

1.2 约束条件

(1) 系统功率平衡约束

由于电能的产生、传输和使用是在瞬间内完成的,所以在任意时段发电设备发出的功率必须与用电设备所消耗的功率完全一致^[13]。

$$P_{load}(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{DE}(t) + P_{BA}(t) + P_{grid}(t) \quad (12)$$

式中, $P_{load}(t)$ 为微电网中负荷 t 时段所需的总功率; $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 分别为微电网中风力和光伏在 t 时段的发电功率; $P_{MT}(t)$ 、 $P_{DE}(t)$ 分别为微型燃气轮机、柴油发电机在 t 时段的发电功率; $P_{BA}(t)$ 为蓄电池在 t 时段对微电网充放电功率; $P_{grid}(t)$ 为微电网与大电网在 t 时段的交互功率。

(2) 各微源的出力上下限约束

各分布式微电源由于自身结构及各类电力电子器件的限制,其输出功率限定在一定范围内^[13]。

$$P_{MT}^{\min}(t) \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{\max}(t) \quad (13)$$

$$P_{DE}^{\min}(t) \leq P_{DE}(t) \leq P_{DE}^{\max}(t) \quad (14)$$

$$P_{BA}^{\min}(t) \leq P_{BA}(t) \leq P_{BA}^{\max}(t) \quad (15)$$

式中, $P_{MT}(t)$ 、 $P_{DE}(t)$ 分别为微型燃气轮机、柴油发电机在 t 时段的实际发电功率; $P_{BA}(t)$ 为蓄电池在 t 时段的充放电功率; $P_{MT}^{\max}(t)$ 、 $P_{MT}^{\min}(t)$ 分别为微型燃气轮机在 t 时段出力的上/下限; $P_{DE}^{\max}(t)$ 、 $P_{DE}^{\min}(t)$ 分别为柴油发电机在 t 时段出力的上/下限; $P_{BA}^{\max}(t)$ 、 $P_{BA}^{\min}(t)$ 分别为蓄电池在 t 时段出力的上/下限。

(3) 与大电网交互的联络线约束

微电网与大电网之间是通过联络线进行双向功率传输。由于联络线自身存在容量限制,因此微电网与主网的交互功率应满足约束。

$$|P_{grid}(t)| \leq P_{grid}^{\max}(t) \quad (16)$$

式中, $P_{grid}^{\max}(t)$ 为联络线的容量上限。

(4) 蓄电池运行约束

在一个调度周期内,储能装置的初始荷电状态应与调度完成后的荷电状态一致。也就是在一个调度周期内储能装置的充放电总和为零。

$$W_{BA}(0) = W_{BA}(T) \quad (17)$$

即

$$\sum_{t=1}^T P_{BA}(t) = 0 \quad (18)$$

式中, $W_{BA}(0)$ 、 $W_{BA}(T)$ 分别为在一个调度周期 T 前后的蓄电池电量; $P_{BA}(t)$ 为蓄电池在 t 时段对微电网的充放电功率。

2 基于自然选择-杂交改进PSO算法的模型求解

2.1 粒子群算法

PSO算法思想源于鸟群捕食,属于进化算法的一种,相较其他智能算法具有记忆性、参数少、实数编码和收敛快等优点。与模拟退火法相似,它也是通过对适应度的评价来获取解的质量。最优化问题的解被抽象为一些无质量与体积的微

粒。 n 个待优化参数抽象为空间 R^n 中的第 i 个粒子的位置 $X^i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,n})$,并赋予速度 $V^i = (v_{i,1}, \dots, v_{i,n})$ 。以优化的目标函数值为适应度值,并得出最优个体(pbest)、种群最优个体(gbest)^[14-16]。

通过以下公式来更新速度和位置,即

$$v_{i,j}(k+1) = \omega v_{i,j}(k) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(k)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(k)] \quad (19)$$

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1) \quad (20)$$

式中, $j=1,2,\dots,n$; ω 为惯性权重; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 范围内的均匀随机数; c_1 、 c_2 为非负的常数,称为学习因子,也称加速常数。

通过上述的更新公式,在每次迭代的过程中,通过比较相邻粒子的目标函数值,求出粒子的局部最优值。然后对所有的局部最优值进行比较,将比较的最小值定义为当前的全局最优值。

$$P_{pbest,i}^{k+1} = \begin{cases} f(X_i^{k+1}) & \text{if } f(X_i^{k+1}) < P_{pbest,i}^k \\ P_{pbest,i}^k & \text{if } f(X_i^{k+1}) \geq P_{pbest,i}^k \end{cases} \quad (21)$$

$$P_{gbest}^k = \min \{P_{pbest,1}^k, P_{pbest,2}^k, \dots, P_{pbest,i}^k, \dots, P_{pbest,n}^k\} \quad (22)$$

式中, $P_{pbest,i}^k$ 、 $P_{pbest,i}^{k+1}$ 分别为第 k 代和第 $k+1$ 代的局部最优值; f 为待优化目标函数; P_{gbest}^k 为全局最优值。经上述可知,粒子每一次更新就计算一次适应度值,通过比较新粒子的适应度值和个体最优、群体最优,更新 P_{pbest} 、 P_{gbest} 位置。经过有限次迭代,寻找到最小目标函数值,其对应的粒子位置就是所求目标函数的最优解。

2.2 PSO算法的改进

本文研究的微电网优化调度问题具有多目标、非线性和高维度等特点,要求所采用算法能够快速、准确地到达全局最优。而现有的标准PSO算法在解决一些高维度、较为复杂问题时,时常会遇到早熟和收敛的问题,也就是说种群在没有找到全局最优时,已经聚集到某局部最优点而停滞不动。另一方面,标准PSO算法在接近或进入最优点区域时的收敛速度也比较缓慢,特别是在后期的寻优结果不够理想。这主要是由于粒子收敛到局部极小,缺乏有效的方法使粒子远离局部极小点。为了克服以上不足,提出以下改进措施。

(1) 惯性权重的改进

惯性权重 ω 体现的是粒子当前速度继承先前速度的主要程度。一个较大的惯性权重有利于全局搜索，而一个较小的惯性权重则更利于局部的搜索。为了更好地平衡全局搜索与局部搜索，采用线性递减惯性权重^[14]，即

$$\omega(k) = \omega_{\text{star}} - (\omega_{\text{star}} - \omega_{\text{end}})k / T_{\text{max}} \quad (23)$$

式中， ω_{star} 为初始惯性权重； ω_{end} 为最大迭代次数时的惯性权重； k 为当前迭代次数； T_{max} 为最大迭代次数。

(2) 加速因子的改进

参数 c_1 决定粒子个体历史对运动轨迹的影响， c_2 决定种群的全局经验对运动轨迹的影响。在标准PSO中，一般取值 $c_1 = c_2 = 2$ ，本文采用时变加速因子

$$\begin{cases} c_1 = (c_{1f} - c_{1e})k / T_{\text{max}} + c_{1e} \\ c_2 = (c_{2f} - c_{2e})k / T_{\text{max}} + c_{2e} \end{cases} \quad (24)$$

式中， c_{1e} 、 c_{1f} 、 c_{2e} 和 c_{2f} 分别为 c_1 、 c_2 在优化过程开始和结束的取值。

(3) 基于自然选择与杂交的PSO算法

基于自然选择的PSO算法是借鉴遗传算法的机理，在每一次迭代中，根据粒子群的适应值不同，对粒子群进行排序，用群体中较好的一半粒子的位置和速度替换较差的一半粒子，同时保留原有个体所记忆的历史最优值。在标准PSO中加入自然选择操作，可以提高粒子群整体的适应度值，有利于迅速收敛至全局最优，也可有效节约运行时间。本文采取轮盘赌选择法，各个体的选择概率和其适应度成线性关系。假设群体大小为 n ，其中个体 i 的适应度值为 f_i ，则个体 i 被选择的概率为

$$p_i = 1 - f_i / \sum_{i=1}^n f_i \quad (25)$$

计算出群体中个体的选择概率后，需要进行多轮选择。每一次产生一个在 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数，被选个体以该随机数作为指针来予以确定。

同时，本文采用杂交方法改进PSO算法的局部收敛性。杂交是指在算法中，每代种群根据杂交概率选取一定数量的粒子放入杂交池进行

随机两两杂交，同时产生相同数目的子代粒子(child)，父代粒子(parent)被子代粒子代替。子代粒子的位置和速度则由父代粒子经过算术交叉得到^[17]。

$$\begin{cases} \text{child}(x) = p\text{parent}_1(x) + (1-p)\text{parent}_2(x) \\ \text{child}(v) = \frac{\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)}{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|} |\text{parent}_1(v)| \end{cases} \quad (26)$$

式中， p 为 $0 \sim 1$ 的随机数。 $\text{child}(x)$ 、 $\text{child}(v)$ 、 $\text{parent}(x)$ 及 $\text{parent}(v)$ 分别为子代和父代的位置、速度变量。

基于自然选择-杂交的改进PSD算法流程图如图1所示。

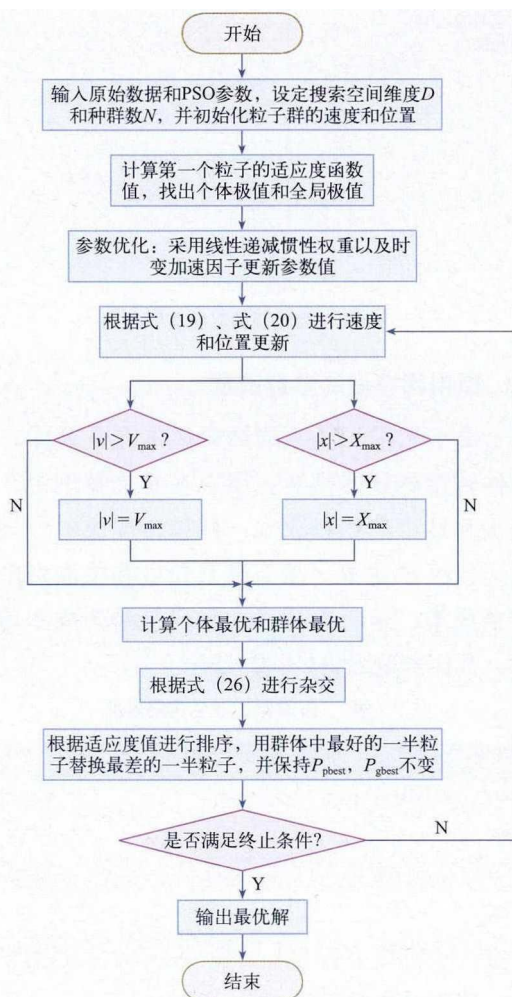


图1 基于自然选择-杂交的改进PSO算法流程图

通过选择操作将较差的粒子予以淘汰，并用最好的一半粒子的速度和位置值代替最差的一半粒子的速度和位置值，以此保证迭代过程中粒子

的优异性,使粒子群能够锁定最优解的范围,并快速准确地寻优。

3 算例分析

本文研究的微电网包括100 kW光伏、100 kW风力、50 kW微型燃气轮机、60 kW柴油发电机和20 kW磷酸铁锂蓄电池,负荷常规运行在并网模式下。微电网与上级大电网有能量交互,其微电网系统拓扑结构如图2所示。

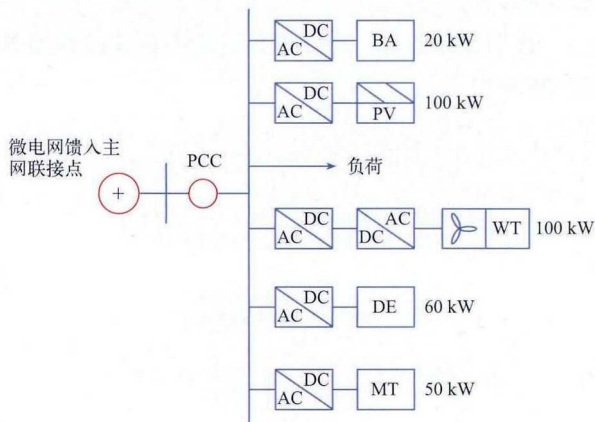


图2 微电网的系统拓扑结构

3.1 微电网模型的参数设置

由于光伏和风力的燃料成本几乎为零,没有气体和污染物的排放。所以在本文算例中,不计光伏和风力的燃料成本、环境治理成本,只考虑其运行维护成本。微型燃气轮机和柴油发电机的发电成本、运行维护成本和环境治理成本均需考虑,具体参数如表1~表3所示。

表1 各微源的发电费用系数

微源	额定功率/kW	燃料费用/(元/kW·h)	运维费用/(元/kW·h)
WT	100	0	0.045
PV	100	0	0.009 6
MT	50	0.211	0.128
DE	60	0.324	0.196
BA	20	0	0.045

3.2 算法的参数设置

本系统中调度周期为1天,以1 h作为一个计算时段,将全天分为24 h。标准PSO算法与基于自然选择-杂交的改进PSO算法中的种群规模都为 $N=60$,最大迭代次数都设置为 $T_{\max}=100$ 。标准PSO

表2 各微源环境治理成本系数

污染物种类	微型燃气轮机 (g/kW·h)	柴油发电机 (g/kW·h)	治理费用 (元/kg)
CO ₂	724.6	489.4	0.023
NO _x	0.2	0.014	8.0
SO ₂	0.004	0.003	6.0

表3 微电网向主网购售电价格表

峰平谷时段	峰时段	平时段	谷时段
具体时段		08:00~	
	11:00~	10:00,	
	15:00,	16:00~	00:00~
	19:00~	18:00,	07:00
	21:00	22:00~	
23:00			
微电网购电价格/(元/kW·h)	1.21	0.69	0.43
微电网售电价格/(元/kW·h)	0.64	0.38	0.13

算法中的两个学习因子 $c_1=c_1=2$,惯性权重 $\omega=0.8$;基于自然选择-杂交的改进PSO算法中, $c_{1e}=2.5$, $c_{1f}=0.5$, $c_{2e}=0.5$, $c_{2f}=2.5$,初始惯性权重 $\omega_{\text{star}}=0.9$,结束惯性权重 $\omega_{\text{end}}=0.4$,杂交池比例大小为0.8,杂交概率取0.5。

3.3 仿真结果分析

本文在考虑微电网中各微源的发电费用、运行维护费用和环境治理费用的同时,考虑系统功率平衡约束、微电源的输出功率限制以及与大电网交互的购售电约束条件,分别利用标准PSO算法和基于自然选择-杂交的改进PSO算法对微电网的调度进行优化。

(1) 算法对比

采用目标函数的适应值评价解的质量,用函数计算次数衡量算法优化速度。对比结果如图3、表4所示。可以看出,基于自然选择-杂交的改进PSO算法在计算次数达到约35次时收敛于最优解(678.10元);标准PSO算法在初始阶段就陷入局部最优解,目标函数计算至约50次时收敛于最优解(795.98元)。

由此得知,基于自然选择-杂交的改进PSO算法相较于标准PSO算法不仅提高了收敛速度,而且利用自然选择和杂交过程提高了改进算法的全局

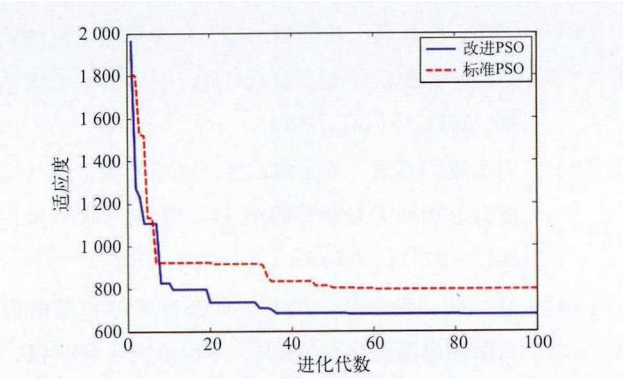


图3 两种算法的收敛性比较

表4 改进算法前后优化结果对比

	基于自然选择-杂交的	
	标准PSO算法	改进PSO算法
微电网运行总成本/元	795.98	678.10

收敛能力。

(2) 各微源出力

以本校新能源微电网科研平台为研究对象，根据实验室光伏和风电预测模型预测日发电量，及当日24 h的负荷用电量，如图4所示。

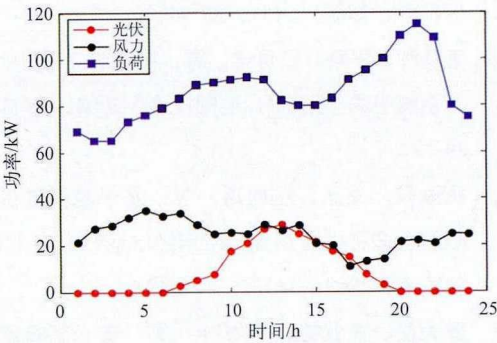


图4 负荷、风力和光伏的预测曲线

图5给出了各微源的出力曲线，由于微型燃气轮机和柴油发电机的发电成本相对较高，因此应当在风机和光伏发电不能满足负荷需求时才予以使用，并且由于负荷及风机、光伏的出力不确定性，导致了微型燃气轮机和柴油发电机有较大的功率波动情况。

图5中，蓄电池出力为正值表示蓄电池放电，负值表示蓄电池充电。可以看出，在负荷高峰期，蓄电池放电，在负荷低谷期，蓄电池充电，起到了良好的削峰填谷的作用。同时，在分布式发电如风机、光伏有较大波动的时候，蓄电池也

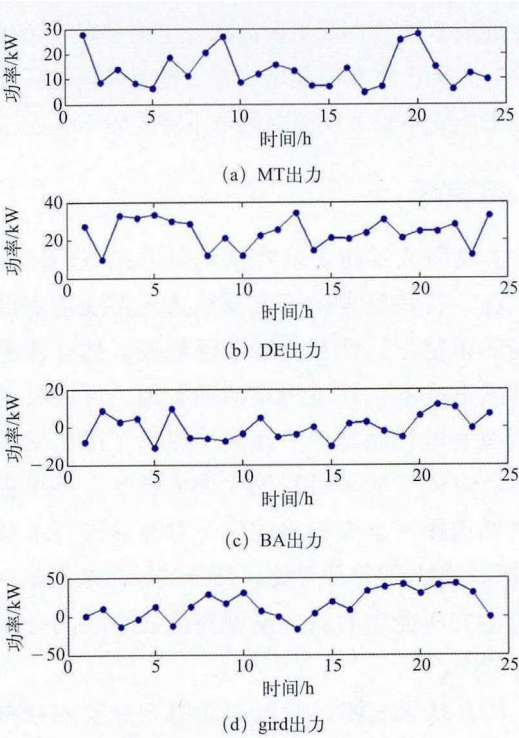


图5 微电网并网运行下各微源出力

可以起到很好的平抑波动的作用，有效保证了微电网内部的稳定性。主网出力为正值表示微电网向大电网购电，负值表示微电网向大电网售电。这表明通过微电网与大电网的交互，利用峰、谷时段的电价差获得一部分收益来降低微电网的运行成本。

(3) 微电网经济成本

为分析微电网经济成本，本文将微电网并网运行和主网独立供电进行比对。不同运行方式下的经济成本如表5所示。

表5 不同运行方式下的经济成本

成本类型	(单位：元)	
	并网运行	主网独立供电
发电成本	448.69	0
环境成本	12.65	0
新能源补贴	-138.62	0
电能交易	355.38	0
目标函数	678.10	1 657.73
单位电能成本	0.328 7	0.803 5

由表5可知，微电网在并网运行下的单位电能成本为0.328 7元/kW·h，而主网独立供电时的单位电能成本较高为0.803 5元/kW·h。这是由于分布式

发电的成本较低且获得新能源发电的补贴,另外微电网与主网产生双向能量交互,使得并网运行下的单位电能成本较主网独立供电下降了59.1%。

4 结束语

本文研究了微电网并网运行方式下的优化调度问题,在满足各微源自身约束及系统功率供需平衡的前提下,计及分时电价机制,综合考虑微电网发电成本、环境污染治理费用、并网收益及新能源发电补贴等多个因素,提出了微电网在并网运行方式下的多目标优化调度模型,并采用基于自然选择-杂交的改进粒子群算法进行求解。通过与标准PSO算法对比,结合实际微电网案例验证了本文所提出的数学模型与优化算法的合理性和有效性。

仿真结果表明,微电网能够充分发挥分布式电源特点,在并网运行方式下的单位能耗较于主网独立供电优势明显。另外,基于自然选择-杂交的改进粒子群算法具有收敛速度快,能有效跳出局部最优点,更好地满足微电网调度要求。

参考文献

- [1] 张文亮,刘壮志,王明俊,等.智能电网的研究进展及发展趋势[J].电网技术,2009,33(13):1-11.
- [2] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等.智能电网技术综述[J].电网技术,2009,33(8):1-7.
- [3] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.
- [4] 盛鹍,孔力,齐智平,等.新型电网-微电网(Microgrid)研究综述[J].继电器,2007,35(12):75-81.
- [5] 杨志淳,乐健,刘开培,等.微电网并网标准研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(2):66-71.
- [6] 王锐,顾伟,吴志.含可再生能源的热电联供型微电网经济运行优化[J].电力系统自动化,2011,35(8):22-27.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 周念成,邓浩,王强钢,等.光伏与微型燃气轮机混合微网能量管理研究[J].电工技术学报,2012,27(1):74-84.
- [10] 刘柏良,黄学良,李军.计及可时移负荷的海岛微网电源优化配置[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4250-4258.
- [11] 洪博文,郭力,王成山,等.微电网多目标动态优化调度模型与方法[J].电力自动化设备,2013,33(3):100-107.
- [12] 陈健,王成山,赵波,等.考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J].电力系统自动化,2012,36(20):25-31.
- [13] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
- [14] 杨维,李歧强.粒子群优化算法综述[J].中国工程科学,2004,6(5):87-94.
- [15] 袁晓辉,王乘,张勇传,等.粒子群优化算法在电力系统中的应用[J].电网技术,2004,28(19):14-19.
- [16] 杨佩佩,艾欣,崔明勇,等.基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J].电网技术,2009,33(20):38-42.
- [17] 舒大松,黄挚雄,李军叶,等.基于削峰填谷的微电网并网运行的优化调度[J].中南大学学报:自然科学版,2015(6):2044-2051.
- [18] Mohan V, Singh J G, Ongsakul W, et al. Economic and network feasible online power management for renewable energy integrated smart microgrid[J]. Sustainable Energy Grids & Networks, 2016(7):13-24.
- [19] Akbarpour M, Shirvani R E, Lohi M, et al. Optimal operation of a microgrid in the power market environment by PSO algorithm[J]. Life Science Journal, 2012,9(4):160-170.

(收稿日期:2017-03-28) **EA**