

考虑经济性的多微电网优化调度研究

何力, 吕红芳

(上海电机学院电气学院, 上海市 浦东新区 201306)

Research on Optimal Dispatching of Multi-Microgrid Considering Economy

HE Li, LÜ Hongfang

(College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Pudong New Area, Shanghai 201306, China)

摘要: 多微电网并网方式主要有单独并网方式和联合协调并网方式, 这 2 种并网方式下微电网内部的微电源工作状态不同导致发电成本不同。为了减少发电成本, 在满足相关微电源约束条件的前提下, 建立一种考虑经济性的多微电网能量优化调度模型和单微电网的优化调度模型。由于传统人工鱼群算法精度低, 收敛速度慢, 提出一种基于模拟退火算法改进的人工鱼群(the artificial fish swarm algorithm based on simulated annealing algorithm, SA_AFSA)算法, 该算法克服了传统鱼群算法的缺点。结合具体算例, 通过该算法来求解单微电网和多微电网经济性优化调度问题, 并比较 2 种并网方式下的发电成本。实验结果表明, 在仅考虑经济性的前提下, 多微电网联合协调并网的发电成本低于单微电网单独并网。

关键词: 多微电网; 单独并网; 联合协调并网; 优化调度; SA_AFSA 算法; 发电成本

ABSTRACT: The mode of multi-micro-grid connection mainly has single grid connected mode and joint coordinated grid connection mode. The different working state of micro power supply inside the two types of grid connection leads to different generating cost. To reduce the cost of power generation, an optimal scheduling model of multi micro grid energy and an optimal scheduling model for single micro grid were established on the premise of satisfying the constraints of the related micro power supply. Due to the low accuracy and slow convergence rate of the traditional artificial fish swarm algorithm, an improved artificial fish swarm algorithm (SA_AFSA algorithm) based on simulated annealing algorithm was proposed, which

overcomes the shortcoming of the traditional fish swarm algorithm. Combined with a specific example, the algorithm is used to solve the economic optimal scheduling problem of single micro-grid and multi-micro-grid, and the cost of power generation under two grid connection modes was compared. The experimental results show that under the premise of only considering the economy, the cost of generation and coordination of multi micro-grid is lower than that of single micro-grid.

KEY WORDS: multi-micro-grid; single grid connection; joint coordination and grid connection; optimal scheduling; SA_AFSA algorithm; generation cost

0 引言

微电网是一种单一可控制的独立发电系统, 它包括分布式发电(distributed generation, DG)、负荷、储能装置和控制装置这些部分^[1]。其中 DG 包括受自然环境影响的风机(wind turbine, WT)和光伏(photovoltaic, PV)、柴油发电机、燃料电池等可控的分布式电源^[2]。多微电网系统是微电网系统的延伸和深化, 在多微电网并网时, 对多微电网调度提出了更高的要求。多微电网经济调度需要考虑各时段之间的内在联系, 从而达到系统优化运行的目的^[3]。微电网系统的运行特性、分布式电源类型、电能质量约束等, 与传统电力系统有比较大的差别, 而且多微电网系统中分布式电源数量远大于微网系统, 另外可再生能源出力存在很大的随机性和波动性^[4]。因此研究其经济调度问题具有重要意义。

微电网能量优化调度有 3 个目标: 经济性、环保性、自治性^[5]。经济性是微电网首要考虑的

基金项目: 上海市经济和信息化委员会专项资金项目 (12AZ22)。

Project Supported by Special Funds Project of Shanghai Economic and Information Committee (12AZ22).

目标, 所以本文就经济性建立相应的多微电网和单微电网的目标函数和制定相应的约束条件, 并提出基于模拟退火算法改进的人工鱼群算法(the artificial fish swarm algorithm based on simulated annealing algorithm, SA_AFSA)。并用 SA_AFSA 算法到多微电网和单微电网中对各个可控微电源出力进行优化调度, 并通过算例来比较单微电网独立并网和多微电网联合协调并网的发电成本。

1 微电网能量优化调度模型建立

微电网运行方式主要有 2 种: 并网运行和离网运行^[6]。离网指的是微电网脱离大电网独立运行, 它主要考虑运行的可靠性和安全性, 而并网运行时, 由于有大电网作为依托, 因此考虑的是优化调度问题^[7]。微电网中有不同的微电源, 这些微电源的运行方式不尽相同, 发电成本不尽相同, 在制定微电网优化调度策略时不能忽视这些微电源的运行特性。本节从经济性来建立单微电网和多微电网的优化调度模型。

1.1 单微电网经济性能量优化模型建立

微电网运行最先需要考虑的因素是经济性^[8]。在忽略需求侧响应的前提下, 建立经济性优化模型。

1.1.1 优化目标

$$f = \min(f_{\text{fuel,DE}} + f_{\text{fuel,FC}} + f_{\text{m}} + f_{\text{s}} + f_{\text{dbuy}} - f_{\text{dsell}}) \quad (1)$$

式中: f 为发电总费用; $f_{\text{fuel,DE}}$ 为柴油发电机的燃油费用; $f_{\text{fuel,FC}}$ 为燃料电池的燃料费用; f_{m} 为运行维护费用; f_{s} 为柴油发电机启停费用; f_{dbuy} 为微电网向大电网购电费用; f_{dsell} 为微电网向大电网售电费用。

$$f_{\text{fuel,DE}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{DE}}} \sum_{t=1}^T u_{\text{DE}}^{i,t} [a_i (P_{\text{DE}}^{i,t})^2 + b_i P_{\text{DE}}^{i,t} + c_i] \quad (2)$$

$$f_{\text{fuel,FC}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{FC}}} \sum_{t=1}^T u_{\text{FC}}^{i,t} (C_{\text{fuel}} \frac{1}{L_{\text{HV}}} \frac{P_{\text{FC}}^{i,t}}{-0.023 \times P_{\text{FC}}^{i,t} + 0.6735}) \quad (3)$$

$$f_{\text{m}} = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_i} a_{\text{m},i} P_{\text{gen}}^{i,t} \quad (4)$$

$$f_{\text{s}} = \sum_{i=1}^{N_2} K_{\text{s}} n_i \quad (5)$$

$$f_{\text{dbuy}} = \sum_{t=1}^T q_{\text{dbuy}}^t P_{\text{dbuy}}^t \quad (6)$$

$$f_{\text{dsell}} = \sum_{t=1}^T q_{\text{dsell}}^t P_{\text{dsell}}^t \quad (7)$$

式中: N_{DE} 表示柴油发电机数量; T 表示周期; $u_{\text{DE}}^{i,t}$ 表示柴油发电机 i 在 t 时刻的启停状态; $P_{\text{DE}}^{i,t}$ 表示柴油发电机 i 在 t 时刻所发的电量; a_i 、 b_i 、 c_i 为燃料成本消耗特性系数; N_{FC} 代表燃料电池数量; $u_{\text{FC}}^{i,t}$ 表示燃料电池 i 在 t 时刻的启停状态; C_{fuel} 代表单位体积的天然气价格; L_{HV} 表示天然气低热值; $P_{\text{FC}}^{i,t}$ 表示燃料电池 i 在 t 时刻所发的电量; N_1 表示微电源的数量; $a_{\text{m},i}$ 代表微电源 i 运行维护费用的特性系数; $P_{\text{gen}}^{i,t}$ 表示微电源 i 在 t 时刻所发的电量; N_2 表示可控微源的数量; K_{s} 表示微电源启停 1 次所需费用; n_i 表示可控微电源启停次数; q_{dbuy}^t 为在 t 时刻微电网向大电网购电的电价; P_{dbuy}^t 为在 t 时刻微电网向大电网购买的电能; q_{dsell}^t 为在 t 时刻微电网向大电网售电的电价, P_{dsell}^t 为在 t 时刻微电网向大电网出售的电能。

1.1.2 决策变量

1) 连续变量。在 t 时刻微电源 i 的出力 $P_{\text{gen}}^{i,t}$, 微电网与大电网能量交易量 P_{dbuy}^t 和 P_{dsell}^t 。

2) 整数变量。柴油发电机启停标志 $u_{\text{DE}}^{i,t}$, 如果柴油发电机 i 在 t 时刻正常工作则 $u_{\text{DE}}^{i,t}=1$, 否则 $u_{\text{DE}}^{i,t}=0$; 燃料电池启停标志 $u_{\text{FC}}^{i,t}$, 如果柴油发电机 i 在 t 时刻正常工作则 $u_{\text{FC}}^{i,t}=1$, 否则 $u_{\text{FC}}^{i,t}=0$;

1.1.3 约束条件

1) 有功功率平衡。

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_{\text{gen}}^{i,t} + P_{\text{dbuy}}^t - P_{\text{dsell}}^t = \sum_{i=1}^{N_c} P_{\text{demand}}^{i,t} \quad (8)$$

式中: N_c 表示用户的个数; $P_{\text{demand}}^{i,t}$ 表示用户 i 在 t 时刻的电能需求。

2) 微电源出力上下限。

$$P_{\text{gen}}^{i,t,\min} \leq P_{\text{gen}}^{i,t} \leq P_{\text{gen}}^{i,t,\max} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{gen}}^{i,t,\min}$ 表示微电源 i 在 t 时刻发出的最小电量; $P_{\text{gen}}^{i,t,\max}$ 表示微电源 i 在 t 时刻发出的最大电量。

3) 发电机爬坡约束。

$$-P_{i,\text{down}}^{\max} \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq P_{i,\text{up}}^{\max} \quad (10)$$

式中: $P_{i,\text{down}}^{\max}$ 表示发电机 i 最大减出力速率; $P_{i,\text{up}}^{\max}$ 表示发电机 i 最大增出力速率。

4) 蓄电池能量约束。

$$E_{\min} \leq E_0 \leq E_{\max} \quad (11)$$

$$\begin{cases} -P_{\text{charge}}^{i,\max} \leq -P_{\text{charge}}^{i,t} \\ P_{\text{discharge}}^{i,t} \leq P_{\text{discharge}}^{i,\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T (P_{\text{charge}}^{i,t} + P_{\text{discharge}}^{i,t}) = 0 \quad (13)$$

式中: $E_{\min}$ 代表储能单元可储存能量的最小值; $E_{\max}$ 代表储能装置可储存能量的最大值; E_0 代表储能装置初始所储存的能量; $P_{\text{charge}}^{i,\max}$ 代表蓄电池 i 充电上限; $P_{\text{discharge}}^{i,\max}$ 代表蓄电池 i 放电上限; $P_{\text{charge}}^{i,t}$ 表示蓄电池 i 在 t 时刻充电量; $P_{\text{discharge}}^{i,t}$ 表示蓄电池 i 在 t 时刻放电量。

对储能单元进行周期控制时, 必须确保在一个周期的始末储能单元能量相等。即

$$E_0 = E_T \quad (14)$$

式中 E_T 为末期所储存的能量。

1.2 多微电网经济性能优化模型建立

多微电网系统的能量优化调度是多微电网系统能量管理的一个重要策略^[9]。在综合考虑多微电网系统的燃料成本、运行维护成本、能量交互成本, 电机启停成本等前提下, 建立多微网系统的经济运行模型。

1.2.1 优化目标

$$F = \min \sum_{i=1}^N (f_{\text{DE}}^i + f_{\text{FC}}^i + f_{\text{m}}^i + f_{\text{s}}^i + f_{\text{buy}}^i - f_{\text{sell}}^i) \quad (15)$$

其中:

$$f_{\text{DE}}^i = \sum_{j=1}^{N_{\text{DE}}} \sum_{t=1}^T [a_{i,j} (P_{\text{DE}}^{i,j,t})^2 + b_{i,j} P_{\text{DE}}^{i,j,t} + c_{i,j}] \quad (16)$$

$$f_{\text{FC}}^i = \sum_{j=1}^{N_{\text{FC}}} \sum_{t=1}^T C_{\text{fuel}} \frac{1}{L_{\text{HV}}} \frac{P_{\text{FC}}^{i,j,t}}{-0.002 \ 3 \times P_{\text{FC}}^{i,j,t} + 0.673 \ 5} \quad (17)$$

$$f_{\text{m}}^i = \sum_{j=1}^{N_{\text{gen}}} \sum_{t=1}^T a_{\text{m}}^{i,j} P_{\text{gen}}^{j,t} \quad (18)$$

$$f_{\text{s}}^i = \sum_{j=1}^{N_{\text{s}}} K_{\text{s}} n_j \quad (19)$$

$$f_{\text{buy}}^i = \sum_{k=1, k \neq i}^N (q_{\text{grid-MGi}}^t P_{\text{grid-MGi}}^t + q_{\text{MGk-MGi}}^t P_{\text{MGk-MGi}}^t) \quad (20)$$

$$f_{\text{sell}}^i = \sum_{k=1, k \neq i}^N (q_{\text{MGi-grid}}^t P_{\text{MGi-grid}}^t + q_{\text{MGi-MGk}}^t P_{\text{MGi-MGk}}^t) \quad (21)$$

式中: N 为微电网数量; $P_{\text{DE}}^{i,j,t}$ 表示微电网 i 中的柴油发电机 j 在 t 时刻所发出的电量; $P_{\text{FC}}^{i,j,t}$ 表示微电网 i 中的燃料电池 j 在 t 时刻所发出的电量; $q_{\text{grid-MGi}}^t$ 表示在 t 时刻微电网 i 向大电网的单位购电价格; $P_{\text{grid-MGi}}^t$ 表示微电网 i 向大电网购买的电能; $q_{\text{MGk-MGi}}^t$ 表示在 t 时刻微电网 i 向微电网 k 的单位购电价格; $P_{\text{MGk-MGi}}^t$ 表示微电网 i 向微电网 k 购买的电能; $q_{\text{MGi-grid}}^t$ 表示在 t 时刻微电网 i 向大电网的单位售电价格; $P_{\text{MGi-grid}}^t$ 表示微电网 i 向大电网出售的电能; $q_{\text{MGi-MGk}}^t$ 表示在 t 时刻微电网 i 向微电网 k 的单位售电价格; $P_{\text{MGi-MGk}}^t$ 表示微电网 i 向微电网 k 出售的电能。

1.2.2 约束条件

优化调度模型的约束条件主要有 6 个。

1) 有功功率平衡。

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_{\text{gen}}^{i,t} + P_{\text{grid-MGi}}^t + P_{\text{MGk-MGi}}^t - P_{\text{MGi-MGk}}^t - P_{\text{MGi-grid}}^t = \sum_{i=1}^{N_2} P_{\text{demand}}^{i,t} \quad (22)$$

2) 微电源出力上下限与公式(9)一致。

3) 发电机爬坡约束与公式(10)一致。

4) 蓄电池能量约束与公式(11)~(12)一致。

5) 微电网与微电网间的能量交互约束。

$$0 \leq P_{\text{MGk-MGi}}^t \leq k_1 P_{\text{MGk-MGi}}^{\max} \quad (23)$$

$$0 \leq P_{\text{MGi-MGk}}^t \leq k_2 P_{\text{MGi-MGk}}^{\max} \quad (24)$$

式中: $P_{\text{MGk-MGi}}^{\max}$ 表示微电网 i 向微电网 k 最大购电量; $P_{\text{MGi-MGk}}^{\max}$ 表示微电网 i 向微电网 k 最大售电量。

6) 能量交互互斥约束。

$$k_1 k_2 = 0 \quad (25)$$

其中 k_1 、 k_2 只能取 0 或者 1。

2 算法设计

2.1 人工鱼群算法

通常情况下, 当发现食物点时, 鱼会自行或者跟随同伴前往该点。因此该点周围会聚集大量的鱼群。人工鱼群算法 (artificial fish swarm algorithm, AFSA) 受到这一特点的启发, 通过构建人工鱼的方式来模拟真实情况下鱼群的觅食、聚群、追尾及随机行为, 从而寻找最优解^[10]。

觅食行为指的是水中的鱼一般情况下会自由地游动, 但是如果发现食物点时, 它会快速地向该点游动的行为^[11]。

聚群行为指的是为了在游动过程中提高自身的生存率和抵御风险的能力, 鱼会自然地聚集成群的行为^[12]。聚群行为包括 3 个规则: 1) 分隔规则, 避免与临近的鱼距离过分狭小; 2) 对准规则, 与鱼群的平均方向保持相同; 3) 内聚原则, 应该移向临近伙伴的中心。

追尾行动指的是当一条鱼或者多条鱼发现食物点时, 邻近的鱼会跟随着游向该点的行为^[13]。

随机行为指的是单独的鱼大范围地随机游动的行为。这样通过大范围地寻找, 能够快速锁定食物点和临近伙伴位置^[14]。

2.2 模拟退火算法

模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法来源于固体退火原理, 不断地加热固体并让它的温度足够高, 再让它缓缓冷却^[15]。固体在加热时, 随着温度的升高, 里面的粒子从有序排列变成无序排列, 内能变大; 而缓缓冷却固体时, 温度下降, 粒子逐渐恢复有序排列。在每个温度下, 粒子都能到达稳定状态, 当在常温时到达的稳态, 称这种稳态为基态, 同时内能最小。根据 Metropolis 准则, 粒子在温度 T 时趋于平衡的概率为 $e^{-\Delta E/kT}$, 其中 E 为温度 T 时的内能, ΔE 为其改变量, k 为 Boltzmann 常数^[16]。用固体退火模拟组合优化问题, 将内能 E 作为目标函数值 f , 温度 T 作为控制参数 X , 即得到解组合优化问题的模拟退火算法^[17]。

2.3 基于 SA 算法的改进 AFSA

由于传统的人工鱼群算法步长和视野不会随着算法的进行而改变, 因此该算法求解精度低, 局部搜索能力弱且易陷入局部最优。针对以上的缺点, 本文将模拟退火算法中的 Metropolis 判别准则引入觅食行为中, 并将改进后的算法称为 SA_AFSA 算法。该算法保持了传统的 AFSA 的优点外, 同时解决了人工鱼漫无目的随机游动以及容易陷入局部最优值的问题, 使算法的运行效率和求解质量得到大幅提升。

2.3.1 人工鱼觅食行为的改进

传统的人工鱼群算法的觅食行为指的是如果当人工鱼反复尝试 Try_number 次后还未满足条件, 那么他就会随机前进一步。Try_number 的设置会使人工鱼群算法在一定程度上可以跳出局部最优点, 从而具有全局寻优的能力。然而 Try_number 取值难以确定, 或大或小都会直接影响到算法的精度。因此, 本文引入模拟退火算法中的 Metropolis 判别准则, 算法如下文所述。

人工鱼当前状态为 X_i , 在其视野范围内随机选择一个状态 X_j :

```
if( $Y_j < Y_i$ ) { 直接移动到  $X_j$  }
```

```
else
```

```
{ double  $t = i / L_{\max}$ ; // 定义 double 类型变量  $t$ ,
```

$L_{\max}$ 为人工鱼寻优的最大迭代数, i 为当前的迭代次数

```
double  $r = \text{random}()$ ; // 求得 0-1 之间的随机数  $r$ 
```

```
if( $e^{-t} > r$ )
```

```
{ 以概率  $e^{-t}$  随机移动一步 }
```

```
else
```

```
{ 将人工鱼移动到  $X_i$  视野内的最优伙伴  $X_j$  处 }
```

```
}
```

由于解决的是求最小值问题, 改进后的人工鱼觅食行为可以表述为: 当 $Y_j < Y_i$, 直接移动到 X_j 处, 这样可以使寻优的速度提高; 当 $Y_j > Y_i$, 人工鱼随机移动一步的概率为 e^{-t} , 没有参与随机移动的人工鱼就会寻找其视野范围内最优同伴所在的位置, 并且向它游去, 这样可以避免人工鱼的退化。当算法处于前期运行时, 由于 e^{-t} 的值较大,

因此人工鱼以随机移动为主,算法非常容易跳出局部最优解;当算法处于运行中后期, e^{-t} 的值逐渐变小,随机移动变得很弱,人工鱼更倾向于向视野内最优同伴处移动,这样算法就可以搜索到全局的最优解并向它靠拢。因此在前期,改进后的算法能够跳出局部最优解,从而具有全局寻优的能力;在后期可以提高求解精度。

2.3.2 模拟算子的引入

因为受到 AFSA 本身视野、人工鱼随机行为和步长大小的制约,AFSA 求解出来的最优解往往是最优解的近似值,误差较大。想减小误差以提高算法精度很困难。为此本文将 ASFA 和 SA 在低温下的局部搜索进行有机融合,利用 SA 具有质量高、初值鲁棒性强、局部搜索能力强的优点,使求解问题的精度得到提升。即在每一代中,人工鱼通过各种行为来寻找全局最优解所对应的状态 X_i ,然后将该状态进行模拟退火操作,实现局部寻优。这 2 个过程齐头并进。这样可以提高运行速率。同时退火操作存在一定几率接受较差解,可以解决人工鱼群算法陷入局部最优解的问题。本文也将退火的结果与人工鱼公告板进行对比,以更新公告板的值。

2.3.3 SA_AFSa 算法求解微电网优化调度过程

根据 1.1 和 1.2 节所建立的微电网优化调度模型,待优化的参数为各个分布式电源的出力大小;优化变量为鱼群的空间位置;空间位置所对应的目标函数的函数值直接反应了该位置的优劣。鱼群可以通过觅食、聚群、追尾及随机行为来不断更新自己所在的位置,直到寻找到最佳位置,该位置即为微电源的最优出力值。微电网能量优化调度的 SA_AFSa 算法流程如下文所述。

1) 读取风机和光伏的出力、负荷大小、柴油发电机、蓄电池和燃料电池的出力上下限、大电网的分时电价。

2) 设定人工鱼群规模 M 、每条人工鱼的初始位置,每条人工鱼的位置代表微电源的出力大小。初始视野 Visual 和步长 Step、拥挤度 δ 、最大迭代次数 $L_{\max}$;模拟退火算子中的退火初始温度 T_0 、温度冷却参数 α 、每个温度下的迭代次数 L 。

3) 每条人工鱼通过聚群、追尾、改进的觅食

和随机行为更新自己的位置;

4) 计算每条人工鱼的食物浓度,并与公告板进行比较,若较好,则将其赋值给公告板;

5) 寻找本代中食物浓度最高的人工鱼 X_i 进行模拟退火算法,结束后将结果保存到 X_i ,并将退火的结果与公告板进行比较,若较好,则将其赋值给公告板;

6) 检查终止条件(通常为达到预定迭代次数或足够好的食物浓度或函数值),如果满足终止条件,则输出最优解,总的算法终止;否则转第 3) 步。

3 微电网能量优化调度算例分析

3.1 算例系统及相关参数

算例中的多微电网系统结构如图 1 所示,分布式电源参数、可控微电源参数及大电网分时电价见表 1—3。

本算例设定谷时时间段为 00:00~07:00,平时时间段为 07:00~12:00,14:00~18:00,21:00~23:00,

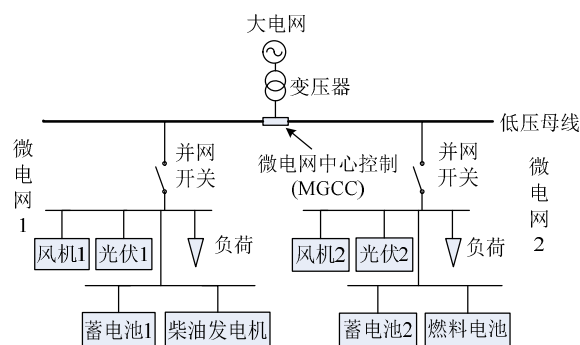


图 1 多微电网系统结构图

Fig. 1 Multi-microgrid system structure diagram

表 1 分布式电源参数

Tab. 1 Distributed power parameters

类型	出力下限/ kW	出力上限/ kW	运行维护费用/ (元/(kW·h))	启停费用/ (元/次)
柴油发电机	0	60	0.06	0.9
光伏 1	0	60	0.03	—
风机 1	0	80	0.05	—
蓄电池 1	-30	30	0.05	—
燃料电池	0	40	0.03	0.7
光伏 2	0	40	0.03	—
风机 2	0	130	0.05	—
蓄电池 2	-30	30	0.05	—

表 2 可控微电源参数

Tab.2 Parameters of controllable micropower supply

类型	柴油发电机	燃料电池
$a_{i,j}$	0.001	—
$b_{i,j}$	0.140	—
$c_{i,j}$	6	—
L_{HV}	—	9.3
C_{fuel}	—	4.2

表 3 大电网分时电价表

Tab.3 Time sharing meter for large power grid

项目	价格/(元/(kW·h))		
	峰时	平时	谷时
购电	0.83	0.49	0.17
售电	0.65	0.38	0.13

峰时时间段为 12:00~14:00, 18:00~21:00。微网之间能量交互费用为 0.45 元/(kW·h)。

微电网 1 和微电网 2 的负荷和间歇性分布式电源出力如图 2、图 3 所示。

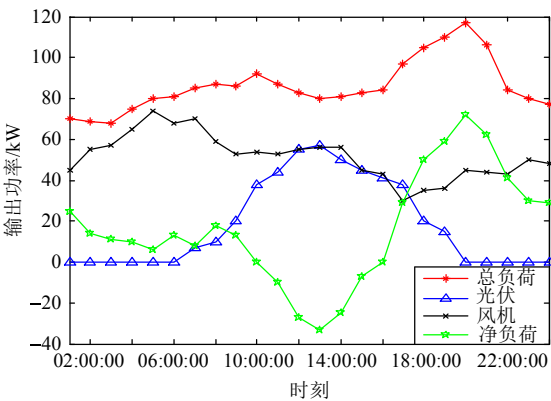


图 2 微电网 1 负荷和间歇性分布式电源出力图
Fig. 2 Microgrid1 load and intermittent distributed power output diagram

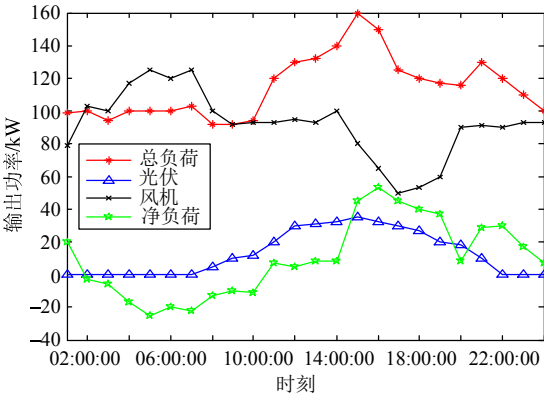


图 3 微电网 2 负荷和间歇性分布式电源出力图
Fig. 3 Microgrid2 load and intermittent distributed power output diagram

3.2 单微电网经济性分析

3.2.1 微电网 1 经济性分析

结合柴油发电机发电成本和大电网分时电价, 并通过 SA_AFSA 算法优化, 可以得出以下结论。

1) 当柴油发电机处于低谷时段时, 柴油发电机发电成本明显大于大电网购电成本。

2) 当柴油发电机处于平时时段时, 柴油发电机发电量小于 22.42kW 时, 发电成本高于大电网售购电成本; 当柴油发电机的发电量大于 44.17kW 时, 发电成本小于大电网的售购电成本; 当柴油发电机发电量介于 22.42 kW 和 44.17 kW 之间时, 发电成本高于售电成本, 低于购电成本。

3) 当柴油发电机处于峰时时段时, 柴油发电机发电量小于 9.67 kW 时发电成本高于大电网售购电成本; 当柴油发电机的发电量大于 13.75kW 时, 发电成本小于大电网的售购电成本; 当柴油发电机发电量介于 9.67kW 和 13.75kW 之间时, 发电成本高于售电成本, 低于购电成本。

4) 净负荷小于 0 时, 应该给蓄电池充电。

柴油发电机、大电网、蓄电池出力优化如图 4 所示。

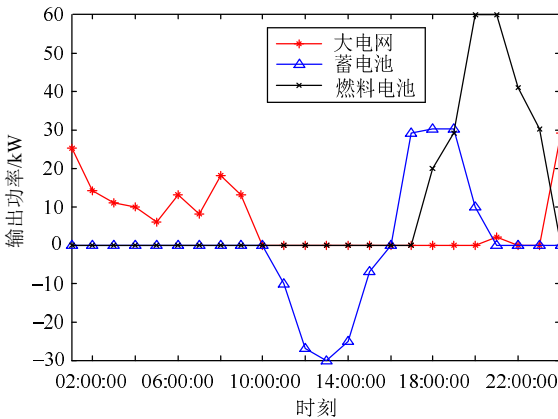


图 4 各微电源出力优化
Fig. 4 Power supply optimization

3.2.2 微电网 2 经济性分析

结合大电网分时电价和燃料电池发电成本, 并通过 SA_AFSA 算法优化, 可以得出以下结论。

1) 当处于低谷时段或平时时段时, 由于大电网购电成本低于燃料电池的发电成本, 应以向大电网购电为主。

2) 当处于高峰时段时,如果柴油发电机发电量小于 9.67 kW 时,微电网 1 应以向大电网购电为主;如果柴油发电机发电量大于 9.67 kW 时,微电网 1 应以柴油发电机发电为主;燃料电池发电量小于 56kW 时,发电成本低于向大电网购电成本,微电网 2 以燃料电池发电为主。

3) 净负荷小于 0 时,应该给蓄电池充电。

燃料电池、大电网、蓄电池出力优化如图 5 所示。

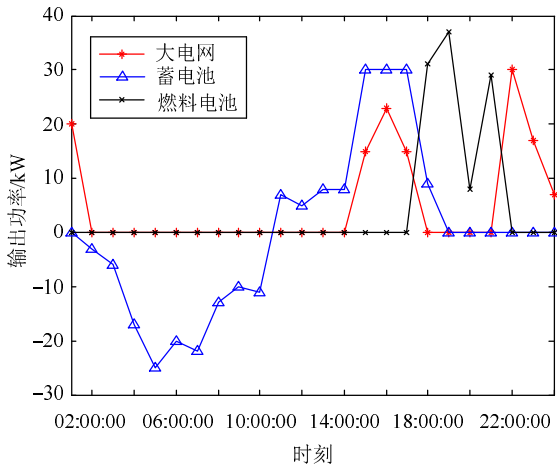


图5 各微电源出力优化

Fig. 5 Power supply optimization

3.3 多微电网联合调度经济性分析

结合大电网分时电价、可控微电源的发电成本及微电网之间的能量交互成本,并用 SA_AFSA 算法优化,可以得出以下结论。

1) 由于低谷时段时,大电网的电价最低,因此直接向大电网购电以满足自己的用电需求,并且将蓄电池充满能量。

2) 由于平峰时段大电网售电成本一般,因此尽量减少向大电网售购电;此时以微电网与微电网之间能量交易为主。

3) 由于高峰时段大电网的售购电成本最高,因此可以向大电网售电,不要向大电网购电,此时应该优先从蓄电池中取电,如果满足不了用电需求,则利用可控微电源进行发电以满足用电需求。

联合协调并网时微电网 1 和微电网 2 的出力优化结果如图 6, 图 7 所示。

2 种方式下的微电网发电成本如表 4 所示。

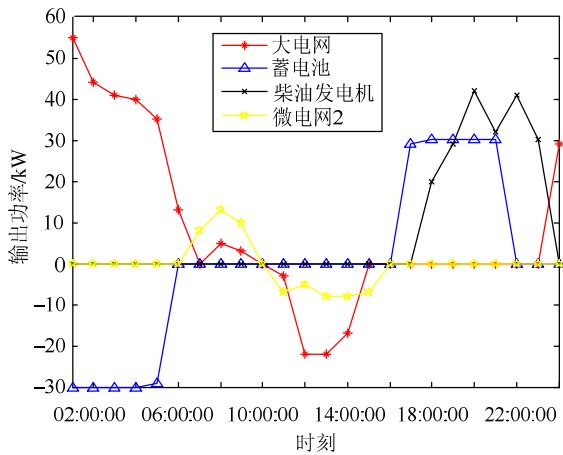


图6 微电网 1 出力优化结果

Fig. 6 Optimization results of microgrid1 output

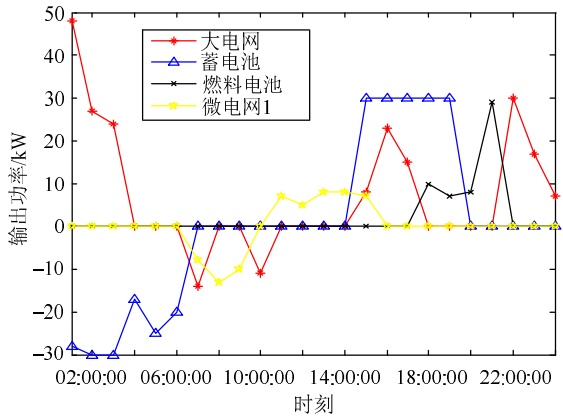


图7 微电网 2 出力优化结果

Fig. 7 Optimization results of microgrid2 output

表 4 2 种方式下的微电网发电成本

Tab. 4 Cost of microgrid power generation under two ways

并网方式	微网 1、2 单独并网		微网 1、2 联合协调并网	
	微电网 1	微电网 2	微电网 1	微电网 2
运行成本/元	214.25	257.60	164.53	235.02

4 结论

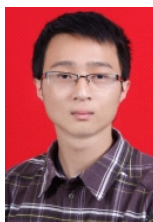
针对微电网经济性进行分析,建立单微电网和多微电网经济性的数学模型,采用 SA_AFSA 算法对单微电网独立并网时的经济性进行优化,然后再对多微电网联合协调并网进行优化。实验结果表明,多微电网联合协调并网时微电网 1 和微电网 2 的发电成本较单独并网时的发电成本分别降低了 49.72 元和 22.58 元,总运行成本降低了 72.3 元。可知多微电网联合协调并网的优化调度结果优于单微电网独立并网时的优化调度结果。

参考文献

- [1] 覃健, 魏兵, 袁天昊. 微网冷热电联供系统研究综述[J]. 发电与空调, 2013, 34(4): 48-50,53.
- [2] 庄雅妮, 杨秀媛, 金鑫城. 风光储联合发电运行技术研究[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 296-303.
- [3] Gregoratti D, Matamoros J. Distributed energy trading: The multiple-microgrid case[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2551-2559.
- [4] 赵敏, 陈颖, 沈沉, 等. 微电网群特征分析及示范工程设计[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1469-1476.
- [5] 赵磊, 曾芬钰, 王霜, 等. 基于经济性与环保性的微电网多目标优化调度研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 127-132.
- [6] Toma L, Tristiu I, Bulac C, et al. Optimal generation scheduling strategy in a microgrid[C]//2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific. Busan, South Korea: IEEE, 2016: 491-496.
- [7] Nikmehr N, Ravadanegh S N. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [8] 戴仲覆, 陈涛, 于文俊. 一种在微网动态经济调度中考虑风电随机性的方法[J]. 发电与空调, 2013, 34(5): 1-5,27.
- [9] 程启明, 黄山, 程尹曼, 等. 基于改进型量子遗传算法的微网经济优化运行[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 136-145.
- [10] 王培崇, 李丽荣, 高文超, 等. 应用佳点集的混合反向学习人工鱼群算法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(7): 199.
- [11] 龚波, 曾飞艳. 一种改进人工鱼群算法对 BP 神经网络的优化研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(1): 86.
- [12] 刘荣荣. 基于自适应人工鱼群算法的微电网优化运行的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [13] 任可强, 高晓林, 谢斌. 基于 AFSA 和 PSO 融合优化的 AdaBoost 人脸检测算法[J]. 小型微型计算机系统, 2016(4): 861.
- [14] 李君, 梁昔明. 人工鱼群算法收敛速度改进优化仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(1): 232-238.
- [15] 简亮. 基于改进遗传模拟退火算法的生产调度研究[D]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2017.
- [16] 陈磊, 毛亚林, 吕兴兵, 等. 基于 MATLAB 的非导数优化仿真[J]. 制冷空调与电力机械, 2005(1): 36-38.
- [17] 何庆, 吴意乐, 徐同伟. 改进遗传模拟退火算法在 TSP 优化中的应用[J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 219-225.

收稿日期: 2018-04-29。

作者简介:



何力

何力(1993), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化调度, 527239749@qq.com;

吕红芳(1978), 女, 博士, 副教授, 研究方向为无线传感器网络、信息融合技术、智能制造与控制。

(责任编辑 车德竞)