

[微电网]

# 基于改进微分进化算法的微网多目标优化的研究

文/沈阳工业大学 喻宏伟 关新阮 鹏 魏诗萌 刘德华

针对含多种微电源的微网模型，其中包括 $SO_2$ 、 $CO_2$ 和 $NO_x$ 的排放成本以及运行维护费用，利用改进微分进化算法搜寻最优解，并为达到更强的搜寻能力和收敛速度，在各个阶段使用不同的变异策略。仿真结果表明，该方法的确有利于微电网优化运行。

微电网（Micro-Grid）也译为微网，是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置、负荷、监控和保护装置组成的小型发电系统。它的研发和推广可以有力推动分布式电源与可再生能源大量并入电网，微电网相比于传统电网拥有独特的优势，例如减少环境污染，降低投资成本等。更重要的是，分布式电源并网对大电网的影响可以通过微电网的控制模块来降低，有效提高能源利用效率。

微电网由电力电子设备和大电网连接，分布式发电（Distributed Generation，DG）装置根据使用技术的不同，可分为热电冷联产发电、内燃机组发电、燃气轮机发电、小型水力发电、风力发电、太阳能光伏发电和燃料电池等。其中，由于光伏和风电受环境影响较大，供电过程中会出现时断时续、不稳定的情况，难以调节。至于剩余其他分布式电源，供电过程连续稳定，可以调节，用以提高电网工作运行的经济性。在系统负荷约束和分布式电源正常运行的约束下，微网系统的最优运行是通过分布式电源出力进行合理有效地安排，使微网系统的发电成本最小化。总而言之，微电网可实现对负荷多种能源形式的高可靠供给，是实现主动式配电网的一种有效方式，使传统电网向智能电网过渡成为可能。

## 系统模型

构成微电网的分布式能源各式各样，包括不可再生能源发电的燃气轮机、燃料电池和内燃机组，还包括可再生能源发电的光伏电池和风力发电机，以及控制、存储和电力负荷，如图1所示。微电网结构非常灵活，类似于大型电网的发电、配电等功能，为用户提供正常的供电。微网不仅可以与公共连接点连接到大电网，采用并网运行模式；还可以在大电网的电能质量降低或因故障影响微电网内负荷正常用电时，采用孤岛运行模式。

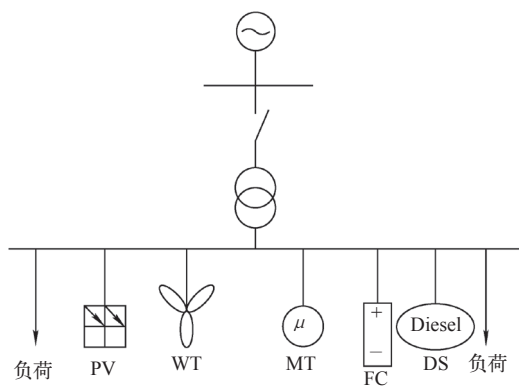


图1 总体架构图

## 微分进化算法

微分进化算法作为一种优秀的进化算法，在

优化过程中具有良好的收敛性和鲁棒性。算法采用决策变量的实数编码,以目标函数值作为搜索准则,同时结合了点搜索和概率搜索技术。该算法不需要初始化信息,具有自组织、自适应和自学习的能力。适用于单目标优化、混合整数非线性规划、多目标优化、噪声系统优化和动态系统优化等问题。

微分进化算法和遗传算法一样,同属于进化算法,但是微分进化是比较新的基于群体的随机优化方法。它具有简单、快速及鲁棒性好等特点。微分进化算法和其他进化算法的不同,主要表现在变异算子的选取上,它是由多对向量的差值取到的。其主要用于实参数优化问题,在非线性和不可微的连续空间问题上优于其他进化方法。

微分进化算法秉承着进化算法的特性,模拟生物的进化,根据适者生存的法则,通过多次迭代,找到搜索控件内的最优解。微分进化算法的初始化种群,交叉和选择操作等机理与其他算法相似。

### 改进微分进化算法

微分进化算法利用混合变异策略以及采用不同的由混合变异策略生成的变异算子来增加该算法的全局搜索能力和计算速度,并动态地改变该算法在搜索过程中的控制参数。

#### (1) 混合变异策略

为了增加算法收敛速度,以及算法的全局收敛性,搜索原理是采用不同的混合变异策略来处理不同的收敛阈值,首先当阈值 $V_{R1}$ 较小时收敛,则采用DE/rand/1变异策略,若阈值 $V_{R1}$ 较大时收敛,则采用DE/best/1策略,直至阈值 $V_{R2}$ 较小时收敛。

#### (2) 动态的调制控制参数

微分算法的收敛性受控制参数的影响很大,选择合适的动态参数至关重要。一个相对稳定的交叉因子 $CR$ 在0.3~0.8之间。缩放因子 $F$ 也很重要,对其进行合理的动态选择

$$F = \max(F_{\min}, 1 - S_{\min}^k / S_{\max}^k)$$

式中, $F_{\min}$ 是 $F$ 的下界,即为0.4; $S_{\min}^k$ 是当前种群的最优个体; $S_{\max}^k$ 是当前种群最差个体对应的适应值。

#### (3) 基于改进微分进化算法的微电网优化运行求解

首先,设置每个分布式电源购电的功率及其产生的有功功率的最大值和最小值。最后设置其算法参数。本文选择的参数包括种群的规模 $N_p$

$=32$ ,交叉因子 $CR=0.5$ ,收敛阈值 $V_R=10^{-6}$ ,缩放因子 $F=0.6$ ;在改进微分进化算法中, $V_{R1}=10^{-3}$ , $V_{R2}=10^{-6}$ , $F_{\min}=0.4$ 。

算法流程图如图2所示。

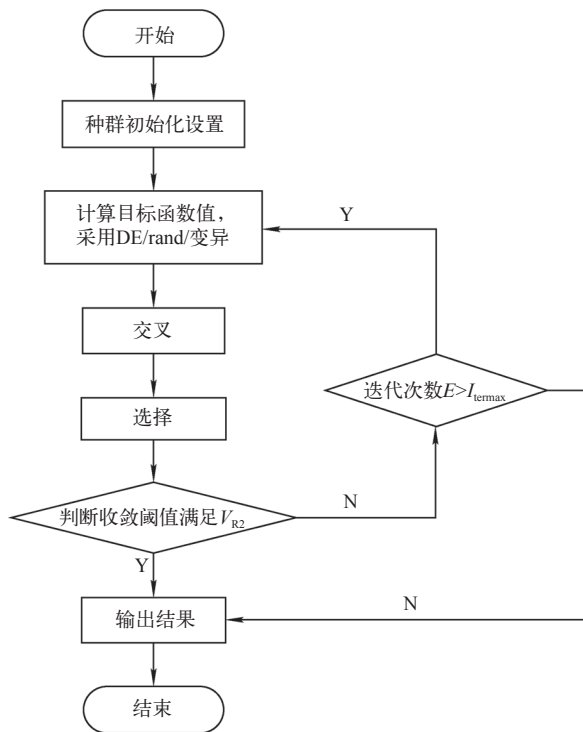


图2 微电网优化运行流程图

### 算例分析与仿真结果

本文构建了一个与大电网并网的微电网系统,该系统中包括了风电、光伏、柴油发电机、微型燃气轮机以及蓄电池,同时求解了如图3所示的典型日负荷曲线。

本文忽略风力发电(WT)和光伏发电(PV)的发电、运行维护以及排放成本,因为风力发电(WT)和光伏发电(PV)基本不排放气体和污染物而且发电成本较低,文中需要考虑发电、运行维护以及排放成本的是柴油发电机(DS)、燃料电池(FC)和微型燃气轮机(MT)。

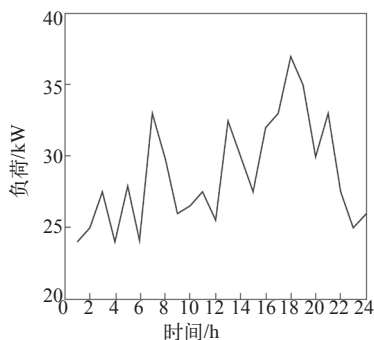


图3 日负荷曲线

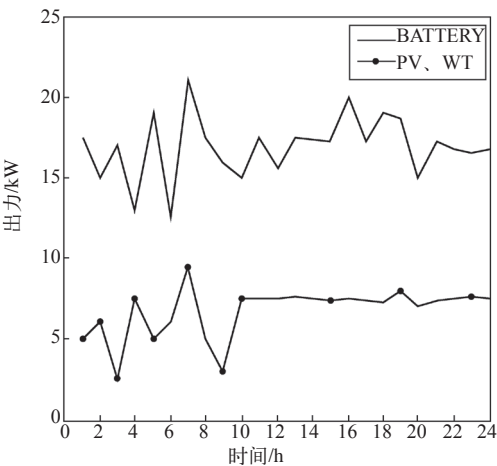


图4 WT、PV和蓄电池的出力曲线

本文采用燃料电池（FC）、柴油发电机（DS）和微型燃气轮机（MT）来补充由于风力发电（WT）和光伏发电（PV）的输出功率小于负荷需求的负荷并使成本降低。本文所涉及的微电网的电源参数如表1～表3所示。

表1 微电源的类型及其对应参数

| 微电源类型   | 系数/(m <sup>3</sup> /kW·h) | 出力上限/kW | 出力下限/kW |
|---------|---------------------------|---------|---------|
| DS      | 0.012 483 10              | 6       | 0       |
| MT      | 0.006 72                  | 4       | 0       |
| FC      | 0.003 99                  | 4       | 0       |
| 联络线功率约束 | —                         | 9       | 0       |

表2 微电源的类型及其排放参数 (单位: kg)

| 参数          | CO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| FC          | 1.092           | 0.0071          | 0.03            |
| MT          | 1.662           | 0.008           | 0.44            |
| DS          | 1.421           | 0.454           | 21.8            |
| 惩罚价格 (元/kg) | 0.014           | 0.89            | 4.2             |
| 排放限值        | 22              | 4.54            | 3.4             |

表3 不同时期的购售电价格 (单位: 元/kW·h)

|                | 峰时期  | 平时期  | 谷时期  |
|----------------|------|------|------|
| C <sub>b</sub> | 0.92 | 0.51 | 0.17 |
| C <sub>s</sub> | 0.62 | 0.38 | 0.09 |

优化之后的微型燃气轮机（MT）、燃料电池（FC）和柴油发电机（DS）不同时段的出力曲线和总成本曲线如图5，图6所示。为了降低微电网每小时的总成本，需要考虑到排放、发电和运行维护等各项成本。

从图5可以看出，随着负荷不断减小，最好的组合是燃料电池与微型燃气轮机，如果条件允许的话，最好都用燃料电池。在负载高峰时，打开柴油发电机，用它发电以满足负荷需求。柴油发电机是最后的选择，因为它们的成本很高。因

此，在除它们之外的发电设备还有空余容量时，就不要考虑柴油发电机了。至于蓄电池，不能完成长期调节任务，主要是因为发电容量不足。

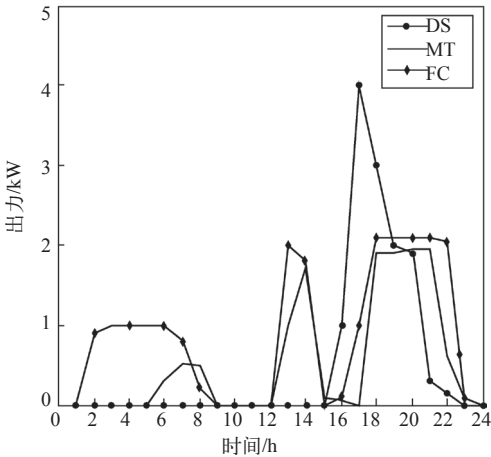


图5 优化后MT、FC和DS机组小时出力

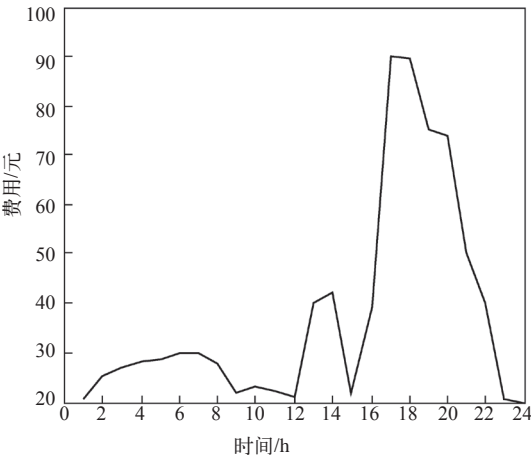


图6 优化后的各小时总成本

结束语

通过对柴油发电机、燃料电池和微型燃气轮机的发电能力的认识并对它们进行合理的优化重组，以达到对负荷和环境的需求。首先将风力发电和光伏等可再生能源作为优先发电组合，其次采用高效率 and 低排放组合，最后采用低排放成本的分布式电源发电组合。在优化组合的同时还要考虑约束函数的作用，以折射出小型发电系统的约束。由运行分析图可知，基于改进微分进化算法的仿真结果符合预期要求，还给出了各个分布式电源的最优组合出力。EA

(收稿日期: 2019.01.08)

(编辑: 朱金凤)