

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.06.023

# 基于经济性与环保性的微电网多目标优化调度研究

赵磊<sup>1</sup>, 曾芬钰<sup>1</sup>, 王霜<sup>1</sup>, 杨宝泉<sup>2</sup>

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 华能济宁运河电厂, 山东 济宁 272057)

**摘要:** 微电网的研究及发展归根结底是为了应对目前能源、资源紧张, 环境污染等一系列问题, 因此微电网不仅要满足基本供电需求, 还应提高其经济性与环保性。文中主要通过建立分布式电源模型及多目标优化模型对微电网内的分布式电源进行优化调度, 根据对微电网的具体要求运用遗传算法进行优化计算, 进行最优配置。算例结果通过24 h内不同优化的结果进行对比, 得到最优配置, 验证了模型在微电网多目标优化方面的有效性, 从而达到对微电网整体性最优。

**关键词:** 微电网; 经济性; 环保性; 优化调度; 改进遗传算法

## Research on Multi-objective Optimal Operation of Microgrid Based on Economic and Environmental Protection

ZHAO Lei<sup>1</sup>, ZENG Fenyu<sup>1</sup>, WANG Shuang<sup>1</sup>, YANG Baoquan<sup>2</sup>

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Jining Yunhe Power Plant of Huaneng, Shandong Jining 272057, China)

**Abstract:** Ultimately, the research on microgrid is to find the good solution for coping with the series issues from scarcity of both energy and natural resource to sever environmental deterioration nowadays, and so on. The microgrid's development is not only to meet the basic demand of power supply, but also to enhance both the economy and the environmental protection. Through the establishment of the environmental protection model and economic model, the optimization of distributed power supply has been achieved by optimized operation for distributed generation of this system, and then by optimizing the computing model using genetic algorithm, which are on the condition of being constrained. The results of example are compared by different optimized results within 24 hours and get the optimization. As a consequence, the optimization of the whole microgrid has been improved accordingly, so as to achieve the whole optimal operation.

**Key words:** microgrid; efficiency; environmental protection; optimization; improved genetic algorithm

## 0 引言

微电网是一种将可再生能源、清洁能源作为发电系统, 储能装置以及各类负载相结合的小型电力网络。目前技术相对成熟的微电网主要由风电、光伏和储能3大部分组成, 由于风电与光伏输出的电能会有波动性和随机性, 如何解决风电、光伏、储能电池和普通发电机数量和功率的多目标问题将成为直接影响微电网运行的安全性与经济性关键问题。目

前国内外相关研究机构或学者针对该问题做了大量研究。文[1]中采用模糊评价函数将多目标转化为单目标, 提出了针对微电网的短期优化调度模型; 文[2]中以经济和环境成本最小为目标, 建立了微电网多目标动态优化调度的一般模型; 文[3]中以不同的控制策略为目标, 建立孤岛运行下的微电网优化模型; 文[4]中考虑环境效益的发电成本计算模型, 构建了以系统运行成本最小为目标函数的分布式电源优化配置模型, 减小对环境的污染, 同时提高经济效益; 文[5]中考虑分时电价差异, 在微电网内分布式

收稿日期: 2015-01-22; 修回日期: 2015-02-23

基金项目: 教育部人文社科一般项目资助研究成果(Z2010-097)。

Project Supported by Humanities and Social Sciences Fund Project of Ministry of Education(Z2010-097).

电源数学模型基础上形成调度周期内微电网的最佳运行方式,提高微电网的经济效益。以上文献均是在考虑微电网不同运行情况下设置多目标优化模型,但在约束条件的设置中考虑因素尚不够多,这将导致最终优化结果的误差增大;同时在微电网经济性优化调度时,仅考虑分布式电源的建设成本,未考虑无功补偿、折旧费用、国家新能源补贴政策等因素。

文中主要考虑在满足微电网安全运行下,对微电网内分布式电源进行经济性和环保性分析,建立了多目标优化模型。在约束条件的设置方面,分别考虑了“硬约束”和“软约束”两种约束条件情况,采用具有跳出局部最优解特性的遗传算法优化求解,通过算例进行计算和论证。

## 1 不同种类的分布式电源数学模型

微电网是指由分布式电源、能量转换装置、负荷、监控和保护装置等汇集而成的小型电力网络,是一种能自我控制和管理的自治系统<sup>[6]</sup>。微电网系统内分布式电源包括风/光等可再生能源发电系统、燃料电池、微型燃气轮机等。同普通电网相比,微电网中可调节变量更多,如分布式电源的输出功率、投入的无功补偿量、储能系统的有功输出等,通过对这些变量的优化调度,在保证系统稳定运行的情况下,最大限度地利用可再生能源,提高整个微电网的经济性与环保性。

### 1.1 风力发电机数学模型

由于风能具有较大的随机性以及影响风机发电有空气密度、湿度、温度、海拔等诸多复杂因素,所以文中只考虑理想情况下影响风机每小时发电量的因素主要与风机转轴高度处的平均风速有关,理想情况下的风机输出功率的数学模型分为3种运行状态。

$$P_{\text{WT}}(\nu) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \nu \leq \nu_{ci} \\ P_N \frac{\nu - \nu_{ci}}{\nu_N - \nu_{ci}} & \nu_{ci} \leq \nu \leq \nu_{N0} \\ P_N & \nu_N \leq \nu \leq \nu_{co} \\ 0 & \nu_{co} \leq \nu \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $P_N$ 为风机输出的额定功率; $\nu$ 为风机转轴处的实际风速; $\nu_{ci}$ 为切入风速; $\nu_{co}$ 为切出风速; $\nu_N$ 为额定风速。

根据风力发电机的数学模型可知,当安装地平均风速位于额定风速与切出方式之间时风机输出理论上的额定功率,其稳定性与经济性也更好。

### 1.2 光伏发电数学模型

光伏发电设备的输出功率主要是与光照强度、温度、光照时长等因素有关,且输出电能质量相对较高、电压稳定、维护费用较低、能与风电相互补充。光

伏发电的数学模型<sup>[7]</sup>为

$$P_{\text{PV}} = P_{\text{STC}} \frac{G_{\text{AC}}}{G_{\text{STC}}} [1 + k(T_c - T_i)]; \quad (2)$$

$$T_c = T_{\text{amb}} + 30 \frac{G_{\text{AC}}}{1\,000}。 \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $P_{\text{STC}}$ 为标准条件下的最大输出功率(标准条件下光照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ ,环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ); $G_{\text{AC}}$ 为实际光照辐射强度; $G_{\text{STC}}$ 标准条件下的光照辐射强度; $k$ 为功率温度系数,取 $-0.004\,7$ ;  $T_c$ 为光伏电池板的工作温度; $T_i$ 为参考温度; $T_{\text{amb}}$ 为环境温度。

光伏发电安全可靠无污染物排放,而且输出电能质量高。目前国内生产的光伏电池效率在 $10\%\sim 13\%$ 之间,设置光伏电池板时应充分考虑当地光照时长及强度,尽可能大地发挥光伏发电的优势,并且在建设微电网时优先考虑使用光伏发电<sup>[8]</sup>。

### 1.3 燃料电池数学模型

由于储能电池效率较低、价格较贵,而超级电容等方式目前仍处于研究阶段。燃料电池不仅效率高,且运行时不会排放氧化硫颗粒物、一氧化碳等污染物,环保性更好,从燃料到电能的整体转换效率可高达 $65\%$ <sup>[9]</sup>,在微电网系统中的紧急备用电源、削峰填谷等方面发挥着重大作用,燃料电池的数学模型为<sup>[10]</sup>

$$U_{\text{FC}} = N_{\text{cell}} N_s U_{\text{FC}}'; \quad (4)$$

$$I_{\text{FC}} = N_s I_{\text{FC}}'; \quad (5)$$

$$P_{\text{FC}} = U_{\text{FC}} I_{\text{FC}}。 \quad (6)$$

式(4)~(6)中: $U_{\text{FC}}$ 、 $I_{\text{FC}}$ 为燃料电池输出电压和电流; $P_{\text{FC}}$ 为燃料电池系统输出总功率; $N_{\text{cell}}$ 为每组燃料电池数; $N_s$ 为系统中燃料电池组数; $U_{\text{FC}}'$ 、 $I_{\text{FC}}'$ 为单个燃料电池输出电压和电流。

燃料电池作为微电网的主要电能储存方式,不仅可以很容易调节出力,增强电网调峰能力,追踪电力需求的短期波动,而且燃料电池本身是模块化结构,因此可以根据负荷的增减来调节燃料电池的容量,而不需要像传统方式一样根据预测负荷来调节,提高电网安全性。

### 1.4 微型燃气轮机

普通微型燃气轮机可用于制热、制冷以及发电,其效率高、污染小,在微电网中多用于改善新能源的不稳定性和作为备用电源使用。燃气轮机主要以天然气、甲烷柴油等作为燃料,其排出废气可用于供热,考虑其发电情况,故将该排放气体作为废气直接排放处理且认定燃气轮机的输出功率是稳定的,其电能转换效率超过 $75\%$ ,相关数学模型<sup>[11]</sup>为

$$P_{\text{out}} = 0.000\,293 Q_i (HV)_s \eta_i \left( \frac{P_s}{P_{s_s}} \right) \left( \frac{T_s}{T} \right)。 \quad (7)$$

式(7)中: $P_{\text{out}}$ 为燃气轮机的输出功率; $Q_i$ 为气体

体积流速,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $(HV)_s$  为标准大气压和标准温度下燃料气体的热率,  $\text{Btu}^3/\text{m}^3$ ;  $\eta_t$  为燃气轮机总效率;  $PS$  为气体气压;  $PS_s$  为标准大气压;  $T_s$  为标准温度;  $T$  为实际温度。

燃气轮机作为普通发电形态, 其效率高、发电稳定, 在微电网中可作为应急电源使用, 这样既保证了微电网稳定运行又减少了废气的排放。

由于文中主要倾向于优化方法的分析和改进, 故以上模型仅考虑在理想情况下的状态, 即忽略内阻、损耗等一系列因素的影响, 通过分析以上数学模型可得出理想情况下分布式电源独立运行状态下的平均效率。

## 2 微电网优化调度模型

对微电网进行优化调度, 一方面要对种类繁多、特性各异的分布式电源及相关控制器件进行优化配置; 另一方面也需要建立系统整体运行调度、优化配置模型。不仅要考虑微电网的安全运行, 也要保证整个微电网运行的经济性和环保性。

### 2.1 目标函数

文中主要讨论由风力发电、光伏发电、燃料电池以及微型燃气轮机相结合的微电网电力系统, 目标函数由经济性优化和环保性优化两大部分组成, 其多目标优化模型可表示为以下一般形式:

$$\begin{cases} \min f = \min(f_1, f_2, \dots, f_n) \\ \text{s.t. } G(x) = 0 \\ H(x) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中:  $x$  为待优化变量;  $f_i$  为第  $i$  个优化目标;  $G$  和  $H$  分别为等式约束和不等式约束。

#### 2.1.1 微电网经济性目标函数

微电网经济性目标第 1 部分包括建设投资、折旧费用、维护费用、无功功率成本等必要费用, 并将其统一折算到建设期。第 2 部分为国家针对新能源发电的补贴, 即针对风电和光伏的补贴费用。

1) 分布式电源一次性投资建设费用及折旧费用总和<sup>[12]</sup>:

$$\min f_1 = C_{WT}i + C_{PV}j + C_{BT}k + C_{MT}l + C_{ad} \quad i, j, k, l \in R^n. \quad (9)$$

式(9)中:  $C_{WT}$  为风力发电的设备建设投资费用和运行维护费用;  $C_{PV}$  为光伏发电的设备建设投资费用和运行维护费用;  $C_{BT}$  为蓄电池成本;  $C_{MT}$  为燃气轮机成本费用;  $C_{ad}$  为额外附加成本;  $i$  为风机的数量;  $j$  为光伏电池板数量;  $k$  为蓄电池数量;  $l$  为燃气轮机数量。这里认为一次性投资费用是不随使用年限改变的, 将建设后的再投资及设备更新都划为附加成本, 简化一次性投资费用的数学模型。

2) 无功补偿成本。发电侧的无功补偿采用并联电容器就地补偿, 可将电容器的固定成本折算到建设期成本:

$$\min f_2 = C_{C_c} = \frac{C_f}{Y \times 365 \times 24 \times h} Q_{C_c}. \quad (10)$$

式(10)中:  $C_{C_c}$  为并联电容器的运行成本;  $Q_{C_c}$  为电容器的无功出力, 也就是所有分布式电源所需的无功功率;  $C_f$  为电容器固定成本;  $Y$  为电容器使用寿命;  $h$  为平均使用率。

3) 政府新能源补贴。由于政府对新能源采取了一系列补贴措施, 这就使得新能源的成本得到降低, 文中所述微电网中只含有风电与光伏, 故补贴数为

$$\min f_3 = \Delta C = -\Delta P_{WT} \Delta C_{WT} i - P_{PV} \Delta C_{PV} j. \quad (11)$$

式(11)中:  $P_{WT}$ 、 $P_{PV}$  分别为风电和光伏的输出功率;  $\Delta C_{WT}$ 、 $\Delta C_{PV}$  分别为风电和光伏的补贴数额;  $i$ 、 $j$  分别为风机和光伏电池板的装机量。

从建设折旧费用、无功补偿和新能源补贴 3 个方面进行优化配置能取得较大的优化成果, 而对其他各方面就行优化则会使目标函数及约束条件增加、计算难度加大、对优化结果的精度影响较小, 故主要对以上 3 方面进行优化配置。

#### 2.1.2 微电网环保性目标函数

环保性的目标函数主要通过微电网系统的排放惩罚来量化, 在该文设定系统中, 产生污染物的只有燃气轮机, 其他新能源则不会产生污染物, 环境成本数学模型为<sup>[13]</sup>

$$\min f_4 = \sum_{r=1}^4 C_{Er}' F_{MT} l_r. \quad (12)$$

式(12)中:  $C_{Er}'$  为第  $r$  种污染物排放惩罚;  $F_{MT}$  为燃气轮机产生的第  $r$  种污染物;  $l$  为燃气轮机设置数量。

由于燃气轮机产生的污染物质不恒定、较难测定, 所以可认为燃气轮机产生污染物是均衡的、不受温度、气压、燃气燃烧值等不确定性因素影响。

### 2.2 约束条件

1) 微电网稳定运行约束。微电网经济性优化的先决条件是微电网能够稳定、安全运行, 满足负荷需求, 其首要约束条件为

$$(1+\sigma)P_{load} = P_{WT}i + P_{PV}j + P_{FC}k + P_{MT}l. \quad (13)$$

式(13)中:  $P_{load}$  为系统负荷;  $P_{WT}$  为风力发电输出功率;  $P_{PV}$  为光伏发电发出的功率;  $P_{FC}$  为储能的输出功率;  $P_{MT}$  为燃气轮机发出的输出功率;  $i$ 、 $j$ 、 $k$ 、 $l$  分别为风机、光伏板以及蓄电池的数量;  $\sigma$  为备用容量, 通常为 5%<sup>[14]</sup>。

2) 燃料电池的出力约束。由于现实的燃料电池无法达到出力最大值, 所以燃料电池的储存容量约

束条件为

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max} \quad (14)$$

式(14)中: $S_{\min}$ 为燃料电池的荷电下限; $S_{\max}$ 为燃料电池的荷电上限; $S(t)$ 为 $t$ 时刻下燃料电池实际出力<sup>[15]</sup>。

3)分布式发电电源出力约束。同燃料电池一样,发电系统在实际情况中是无法完全达到其额定功率的,而且风电与光伏受环境状况影响程度较大,所以研究其出力要考虑最大与最小出力约束的情况<sup>[16]</sup>,发电系统约束条件为

$$P_{DG,\min} \leq P_{DG,i}(t) \leq P_{DG,\max} \quad i=1,2,\dots,n; \quad (15)$$

$$\Delta P_{\text{out}} \leq \Delta P_{\text{out,limit}} \quad (16)$$

式(15)、(16)中: $P_{DG,\min}$ 为第 $i$ 种分布式电源的最小出力; $P_{DG,\max}$ 为第 $i$ 中分布式电源的最大出力; $\Delta P_{\text{out}}$ 为功率的变化量; $\Delta P_{\text{out,limit}}$ 为功率变化量限制,这里仅考虑风电与光伏两种分布式电源的出力情况<sup>[17]</sup>。

以上3个总体约束条件分别从微电网总负荷约束、储能容量约束和电源输出功率约束3大方面建立模型,默认分布式电源的型号为统一型号,减少了约束项从而减少运算时间<sup>[18]</sup>。

### 3 基于改进遗传算法的微电网优化配置

遗传算法是从代表问题可能潜在的解集的一个种群开始的,而一个种群则由经过基因编码的一定数目的个体组成,每个个体实际上是染色体带有特征的实体。染色体作为遗传物质的主要载体,即多个基因的集合,其内部表现(即基因型)是某种基因组合,其决定了个体的形状的外部表现,多目标进化算法必须要同时多方面的寻找 Pareto 最优解。文中采用从临时 Pareto 解集中选出 $N$ 个拥挤距离最大的个体作为精华保留,从而使当前周围个体密度小的 Pareto 解占优,对保持种群的多样性有利<sup>[9]</sup>。

遗传算法的基本运算过程:

1)选择问题的一个编码方式,在搜索空间 $U$ 上定义一个适应度函数 $f(x)$ ,给定种群规模为 $N$ 的初始群体分别为 $s_1, s_2, \dots, s_N$ ,最优保留个体数 $M, \text{gen}=0$ ;

2) $\text{gen}=\text{gen}+1$  若  $\text{gen} > \text{maxgen}$ , 则计算结束;若  $\text{gen} \leq \text{maxgen}$ , 计算每个个体对应的目标函数值;

3)当  $\text{gen}=1$  时,循环 $N$ 次;当  $\text{gen}>1$  时, $N-M$ 次,并记录所选出的个体值;

4)当  $\text{gen}=1$  时,找出当前群体中的 Pareto 解,并在群体外部建立 Pareto 集合;当  $\text{gen}>1$  时,更新 Pareto 解集。计算当前每个 Pareto 解的拥挤距离,找出 $M$ 个拥挤距离最小的个体作为精华保留。

5)将选出的每个个体执行杂交操作,记录产生后代的值;

6)对杂交产生的新个体进行变异操作,返回再一次进行2)操作,直到取到满足条件的解为止。

由于遗传算法具有:①不一定需要满足目标函数和约束函数的可解析性,甚至不要求具有显式表达式,只需要在所计算点处提供相应函数值;②约束变量可取离散值;③能求解全局最优解等3大特点,更适合于分布式电源动态的、未知项较多的优化过程,其求得的解也相对可靠。

### 4 算例分析

以包含风、光、燃料电池、燃气轮机4类分布式电源的微电网为算例,以遗传算法为主要优化算法。选择地处华东地区、风能和太阳能都较丰富的某地区为实例进行分析计算,有利于增大分布式电源的实用性以及算例分析的鲜明性,表1为24 h内负荷情况以及分布式电源参数<sup>[2]</sup>。

表1 某地24 h负荷、风速和光照数据

Table 1 Data of load, wind speed and irradiation

| 时间段         | 有功功率/kW | 无功功率/kvar     | 风速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 光照/Lx |
|-------------|---------|---------------|-------------------------|-------|
| 00:00-01:00 | 101.049 | 59.147 348 00 | 6.652 2                 | 0.000 |
| 01:00-02:00 | 79.991  | 46.821 398 67 | 4.813 6                 | 0.000 |
| 02:00-03:00 | 41.862  | 24.503 224 00 | 4.391 3                 | 0.000 |
| 03:00-04:00 | 101.312 | 59.301 290 67 | 2.483 0                 | 0.000 |
| 04:00-05:00 | 67.139  | 39.298 694 67 | 2.061 1                 | 0.000 |
| 05:00-06:00 | 82.000  | 47.997 333 33 | 2.185 4                 | 0.000 |
| 06:00-07:00 | 85.085  | 49.803 086 67 | 1.987 5                 | 0.068 |
| 07:00-08:00 | 110.875 | 64.898 833 33 | 3.323 1                 | 0.103 |
| 08:00-09:00 | 115.249 | 67.459 081 33 | 3.273 8                 | 0.242 |
| 09:00-10:00 | 120.687 | 70.642 124 00 | 2.881 5                 | 0.337 |
| 10:00-11:00 | 98.786  | 57.822 738 67 | 4.547 6                 | 0.687 |
| 11:00-12:00 | 103.944 | 60.841 888 00 | 2.298 5                 | 0.857 |
| 12:00-13:00 | 121.629 | 71.193 508 00 | 1.939 2                 | 0.926 |
| 13:00-14:00 | 136.151 | 79.693 718 67 | 3.089 8                 | 0.693 |
| 14:00-15:00 | 137.752 | 80.630 837 33 | 2.351 8                 | 0.839 |
| 15:00-16:00 | 118.824 | 69.551 648 00 | 5.2865                  | 0.402 |
| 16:00-17:00 | 139.221 | 81.490 692 00 | 6.271 7                 | 0.202 |
| 17:00-18:00 | 157.158 | 91.989 816 00 | 6.053 6                 | 0.116 |
| 18:00-19:00 | 101.689 | 59.521 961 33 | 3.764 7                 | 0.046 |
| 19:00-20:00 | 127.400 | 74.571 466 67 | 6.043 9                 | 0.000 |
| 20:00-21:00 | 135.312 | 79.202 624 00 | 7.451 5                 | 0.000 |
| 21:00-22:00 | 96.692  | 56.597 050 67 | 6.268 3                 | 0.000 |
| 22:00-23:00 | 90.243  | 52.822 236 00 | 5.865 9                 | 0.000 |
| 23:00-24:00 | 109.587 | 64.144 924 00 | 4.588 7                 | 0.000 |

将风速和光照时长带入风机和光伏数学模型,并将其处理成平均输出功率,并根据其出力情况计算污染物排放量,具体见表2。

表 2 污染物排放罚款

Table 2 Environmental parameter

| 污染物                            | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> | CO <sub>2</sub> | CO        |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 排污惩罚/<br>(元·kg <sup>-1</sup> ) | 0.766 100       | 1.532 200       | 0.007 661       | 0.122 600 |

表 3 分布式电源参数

Table 3 Parameter of distributed power

| 分布式电源 | 发出功率/kW | 固定成本/元 | 电量成本/元 | 补贴价格/元 | SO <sub>2</sub> /g | NO <sub>x</sub> /g | CO <sub>2</sub> /g | CO/g    |
|-------|---------|--------|--------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| 风电    | 20      | 6 000  | 0.055  | 0.21   | 0.000 0            | 0.000 0            | 0.000 0            | 0.000 0 |
| 光伏    | 10      | 3 000  | 0.155  | 2.69   | 0.000 0            | 0.000 0            | 0.000 0            | 0.000 0 |
| 燃料电池  | 10      | 4 000  | 0.124  | 0.00   | 0.000 0            | 0.000 0            | 0.000 0            | 0.000 0 |
| 燃气轮机  | 50      | 1 250  | 0.085  | 0.00   | 0.009 3            | 0.618 8            | 0.126 0            | 0.170 2 |

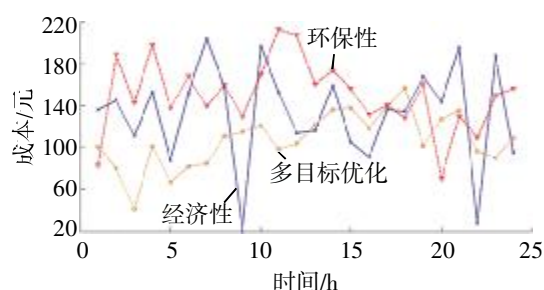


图 1 3种优化策略结果对比图

Fig. 1 Three strategy of optimization

表 4 3种优化策略结果

Table 4 Results of three optimizational strategy

| 目标       | 平均经济成本/元 | 平均环境惩罚/元 |
|----------|----------|----------|
| 单目标经济性优化 | 132.58   | —        |
| 单目标环保性优化 | —        | 148.85   |
| 多目标优化    | 107.62   |          |

由图 1 可以看出,当分别对微电网进行经济性和环保性分析时,其 24 h 内成本波动较大、成本较高、环保性也较差;在图 1 中时间为 10 h 时用电量增加,其经济性与环保性的单目标优化结果都较差;当采用包含经济性和环保性的多目标优化时,微电网 24 时段内成本波动相对较小、平均成本较低、环保性较好;在时间 10 h 时用电量不变的情况下优化结果更好;从整个微电网范围来看,这种多目标优化策略在保证系统稳定运行情况下成本更低、波动性更小、污染物排放更少、可再生能源的使用率更高,更适合中长期的微电网优化调度。

## 5 结语

文中在传统微电网经济调度的基础上,综合考虑加入国家补贴政策、环保性、无功补偿成本等因素的情况,设置多目标优化模型。利用能够跳出局部最优解的改进遗传算法,分别进行经济性、环保性和经济性与环保性相结合的多目标优化 3 种优化配置,并得到相应的最优化配置策略<sup>[20]</sup>。结果显示:虽然加

微电网内分布式电源均统一采用国产某型号,并认为这些分布式电源运行时是稳定的,其相关参数见表 3。根据以上全天 24 h 数据,通过 MATLAB 分别进行 3 种仿真策略优化,结果见图 1、表 4。

入了新的、更多的优化目标,经济性和环保性结合的多目标优化配置结果比对单个目标分别进行优化的结果更经济、更环保、新能源的利用效率也更高。

## 参考文献:

- [1] 周晓燕,刘天琪,沈浩东,等.含多种分布式电源的微电网经济调度研究[J]. 电工电能新技术,2013,32(1):5-8.  
ZHOU Xiaoyan,LIU Tianqi,SHEN Haodong,et al. Research on economic dispatch of microgrid with multi-distributed generation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2013,32(1): 5-8.
- [2] 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.  
HONG Bowen,GUO Li,WANG Chengshan,et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3): 100-107.
- [3] 陈健,王成山,赵波,等.考虑不同控制策略的独立型微电网优化配置[J]. 电力系统自动化,2013,37(11):1-6.  
CHEN Jian,WANG Chengshan,ZHAO Bo,et al. Optimal sizing for stand-alone microgrid considering different control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(11): 1-6.
- [4] 崔弘,郭熠昀,夏成军.考虑环境效益的分布式电源优化配置研究[J]. 华东电力,2010,38(12):1968-1971.  
CUI Hong,GUO Yiyun,XIA Chengjun. Research on optimal allocation of distributed generation by considering environmental benefits[J]. East China Electric Power,2010,38(12): 1968-1971.
- [5] 刘天琪,江东林.基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术,2012,36(1):45-50.  
LIU Tianqi,JIANG Donglin. Economic operation of microgrid based on operation mode optimization of energy storage unit[J]. Power System Technology,2012,36(1): 45-50.

- [6] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution[C]//Power Electronics Specialists Conference. [S.l.]: IEEE, 2004: 4285-4290.
- [7] 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 islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [8] GILBERT M. Renewable and efficient electric power systems[M]. America: John Wiley & Sons, Inc., 2009: 163-181.
- [9] 艾 芊, 郑志宇. 分布式发电与智能电网[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013: 97-102.  
AI Qian, ZHENG Zhiyu. Distributed generation and smart grid[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013: 97-102.
- [10] 王成山. 微电网分析与仿真实论[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 66-75.  
WANG Chengshan. Analysis and simulation theory of microgrids[M]. Beijing: Science Press, 2013: 66-75.
- [11] 徐 维. 并网光伏发电系统数学模型研究与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 17-21.  
XU Wei. Research and analysis on the mathematic model of GCPV generation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 17-21.
- [12] 林伯强, 蒋竺均. 中国能源补贴改革和设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 122-135.  
LIN Baiqiang, JIANG Zhujun. China's energy subsidies policy and design[M]. Beijing: Science Press, 2012: 122-135.
- [13] 国家可再生能源中心. 中国可再生能源产业发展报告 2014[M]. 北京: 中国经济出版社, 2014: 35-63.  
China National Renewable Energy Centre. China renewable energy industry development report 2014[M]. Beijing: China Economy Press, 2014: 35-63.
- [14] 艾 芊, 吴俊宏, 章 健. 智能电网中清洁分布式能源的优化利用策略[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2813-2819.  
AI Qian, WU Junhong, ZHANG Jian. Strategies for optimal use of clean distributed energy in smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2813-2819.
- [15] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.  
MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 30-35.
- [16] 丘文千. 电力系统优化规划模型与方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2012: 110-122.  
QIU Wenqian. Optimization in power system planning: models and methods[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012: 110-122.
- [17] 周松林, 茆美琴, 苏建徽. 考虑风力发电随机性的微电网潮流预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 26-34.  
ZHOU Songlin, MAO Meiqin, SU Jianhui. Power flow forecasting of micro-grid considering randomness of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 26-34.
- [18] 武 星, 殷晓刚, 宋 昕, 等. 中国微电网技术研究及其应用现状[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 142-149.  
WU Xing, YAN Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 142-149.
- [19] 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 Dawei, 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.
- [20] 陈光堂, 邱晓燕, 林 伟. 含钒电池储能的微电网负荷优化分配[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 85-91.  
CHEN Guangtang, QIU Xiaoyan, LIN Wei. Optimal load distribution of microgrid with energy storage system composed of vanadium redox flow battery [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 85-91.
- 赵 磊(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网、电力与能源经济。
- 曾芬钰(1966—), 女, 教授, 研究方向为电力与能源经济、区域经济。
- 王 霜(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风力发电、电力经济。
- 杨宝泉(1987—), 男, 助理工程师, 从事电厂检修工作。

(编辑 赵彩莉)