

# The Planning and Research of Grid-Integration for Distributed Generation Based on Micro-Grid

Yan Zhang<sup>1</sup>, Lijuan Li<sup>1</sup>, Jie Ma<sup>2</sup>, Hua Gao<sup>1</sup>, Zhenkun Li<sup>2</sup>, Yang Fu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grid Planning Research Center of Guizhou Power Grid Corporation, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>Shanghai University of Electric Power, Shanghai

Email: [zhyan168168@126.com](mailto:zhyan168168@126.com)

Received: May 30<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jun. 19<sup>th</sup>, 2015; published: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The contradiction between the large grid and distributed power is intensifying because of the fast development of new energy. To fully tap into the value and benefits of distributed energy for the grid and users, micro-grid emerges as the times require. Micro-grid integrates multiple DG as an independent system of power stability, and effectively solves the problem of large-scale DG access. As a useful supplement to the single grid, it has huge potential for wide application. This paper carries on the classification according to micro-grid's applications in different environments, analyzes their different functional requirements, puts forward the principle of planning and design of micro-grid, lists the common structure form, and describes the micro-grid power planning. Finally, a practical case is simulated; the result is able to provide references for the planning of grid-integration for distributed generation.

## Keywords

Micro-Grid, Planning and Design, Micro-Grid Structure, Power Planning, Distributed Power

---

## 基于微电网的分布式电源并网规划研究

张彦<sup>1</sup>, 李丽娟<sup>1</sup>, 马杰<sup>2</sup>, 高华<sup>1</sup>, 李振坤<sup>2</sup>, 符杨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>贵州电网公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>上海电力学院, 上海

Email: [zhyan168168@126.com](mailto:zhyan168168@126.com)

收稿日期: 2015年5月30日; 录用日期: 2015年6月19日; 发布日期: 2015年6月23日

## 摘要

新能源的迅速发展,使得大电网与分布式电源矛盾加剧.为了充分挖掘分布式电源为电网和用户所带来的价值和效益,微电网应运而生.微电网集成多个DG为一功率稳定的独立系统,有效解决了大规模DG的接入问题,其作为对单一大电网的有益补充,具有广泛应用的巨大潜力.本文根据微电网应用环境的不同对其进行了分类,分析了其不同的功能需求,提出了微电网的规划设计原则,列举了常用的微电网结构形式,并对微电网内电源的规划进行了阐述.最后,对一个实际算例进行仿真,仿真结果对微电网分布式电源并网规划提供了参考.

## 关键词

微电网, 规划设计, 微电网结构, 电源规划, 分布式电源

## 1. 引言

近些年来,随着人类科技的进步和经济的飞速发展,世界的能源消耗也大幅度的上升,人类对于能源的需求达到了前所未有的高度.但是地球上的常规能源是有限的,如果人类以此速度无节制消耗能源,这世界储存的能源仅够用几十年.因此大力发展风能发电,光伏发电,燃料电池等新型无污染可再生能源已势在必行.但是迄今为止,现有的电力技术发展水平还无法达到分布式电源的接入要求[1] [2],使得分布式发电自身存在许多发展障碍,所以要将分布式发电真正应用于市场化还需要很长的路要走.为了充分开发挖掘分布式能源,国外的一些学者提出了微型电网(Micro-Grid,简称微网)的概念[3] [4],其目的是能够大量利用分布式电源为负荷提供电能,消除对电网的影响,构筑以自然变动能源为主体的稳定微网系统.

微网与电网联合运行可以在充分应用电网中各种发电设备的容量基础上缓解电网峰荷时期的供电压力;同时也可延缓集中输配电系统的投资建设,提高联合系统的供电可靠性和运行经济性[5] [6].因此,开展微网技术的研究不但有利于开发与应用推动新能源和可再生能源,对电力工业发展本身也具有深远的意义.

微电网运行性能的关键在于微电网的规划设计,本文提出了微电网的规划设计原则,并针对微电网应用环境的不同对其进行了分类,分析了其不同的功能需求,列举了微电网常用的网络结构,并在最后对微电网内电源规划分并网和孤岛运行两种情况下进行分析.

## 2. 微电网的概念及其分类

### 2.1. 微电网的概念

微电网本质是一个小型的自主发配电系统,其系统包含分布式电源,储能装置,负荷,能量转换装置,监控和保护装置等.它能够在很短的时间内满足外部输配电系统网络的需求,并且在大电网中被视为一个可控的单元;现代电力用户对电压质量和供电可靠性的要求较高,促使微电网必须要满足电力用户的用电要求,在增强本地的供电可靠性和保持电压稳定的同时还可以降低运行线路的损耗、还可以

提供不间断电源和增加能源的利用效率等。微电网和大电网通过公共连接点(Public Coupling Connector, PCC)进行能量交换, 双方互为备用, 从而提高了供电的可靠性。图1为一微电网示意图, 示意了风力发电、光伏发电、燃料电池、微型燃气轮机等微电源与储能装置组成微电网的形式, 其中燃气轮机与燃料电池接在热力负荷附近, 除了供给电能外, 还可以为当地用户提供热源, 从而提高了能量的利用率。

## 2.2. 微电网的分类及其功能要求分析

在发展微电网的时候, 首先需要考虑的是微电网的功能定位问题, 根据微电网应用环境的不同, 本文将微电网分为三类, 分别为城市片区微电网, 偏远农村地区微电网和城市郊区微电网。城市片区微电网以提高供电可靠性及电能质量为目的, 偏远农村地区微电网主要是为了节省投资、供应电能, 城市郊区微电网基于提高能源利用效率。这三类微电网运行环境不同, 功能要求也不同, 在规划设计时需分别进行考虑。

### (1) 城市片区微电网

在城市片区微电网中, 一般位于城市配电网发展较为完善的区域, 此时不仅要满足用户的基础用电需求而且要提高供电可靠性及电能质量, 对城市片区微电网的重视与发展正是为了充分利用分布式电源及进一步提高供电可靠性及电能质量。该类型微电网一般根据居民用户、宾馆、医院、商场及写字楼等进行建设, 平常主要与大电网并网运行, 通过外部大电网供电, 当大电网发生故障时则与之断开, 随即进入孤网运行模式。

城市片区微电网首先将在中国经济比较发达的城市, 由于这些地区负荷密度高, 用户的用电需求比较大, 且对用电质量和供电可靠性需求高, 微电网可提高当地供电可靠性及电能质量。同时, 微电网与大电网配合能有效解决该类地区负荷的日、季节性波动大的问题。该类型微电网应在我国发达城市, 如北京、上海、广州等大力发展。

城市片区微电网较侧重电源的清洁性、安全性, 且能够保证重要负荷的供电, 提供较高电能质量的电能, 这些功能需求应在微电网的规划设计时予以重点考虑。

### (2) 偏远农村地区微电网

目前中国在农村地区特别是中西部地区, 该地区多以草原, 山区为主, 如果将电力系统直接延伸过去, 花费的成本较大, 且运行维护困难。但是在这些较偏远的地区风能, 太阳能, 沼气等可再生清洁能源非常丰富, 正适合建立微电网供电。微电网在该类型的地区供电成本较低, 且应用灵活, 主要以孤岛运行方式为主, 与外网的能量交换较少。在该地区大电网一般作为启动备用电源, 在微电网发生故障时才会接入, 保证微电网的正常运行。从而解决了这些地区的供电困难问题, 加快了农村城镇化的发展。

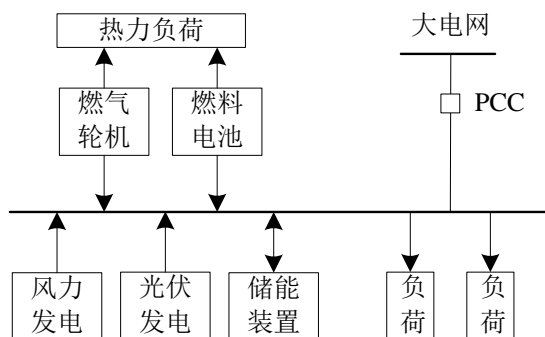


Figure 1. The sketch map of micro-grid

图1. 微电网示意图

偏远农村地区微电网由于主要为孤岛运行或与大电网联系较弱，在规划设计时需重点考虑微电网的孤岛稳定运行能力，同时由于电压等级低，且负荷分散，供电线路偏长，需考虑运行损耗问题，而对电能质量及供电可靠性，相对于城市片区微电网，要求标准则可一定程度的放松。

### (3) 城市郊区微电网

企业微电网一般位于城市的郊区，容量为数百千瓦到数十兆瓦，多利用传统电源满足石化，钢铁等大型企业内部的用电需求。微电网满足了该类企业对电能质量和供电可靠性的需求，并充分利用回热，不仅企业降低成本、提高企业效益，而且有效提高能源的利用效率。

企业微电网对用电负荷需求比较多，且要求有较高的供电安全可靠，并对能源的利用效率有这严格的规定。因此在规划设计时可基于企业为减少生产成本和增加能源的利用效率的基础上，规划设计一定的燃气轮机、燃料电池等微电源，不仅满足了冷热电多种负荷的需求，同时在电源设计时留有了充足的备用容量，而且满足了企业高供电可靠性的要求。

## 3. 微电网的规划设计原则

微电网的规划设计是微电网建设中最重要的一部分，在微电网规划设计过程中应坚持安全性、可靠性、灵活性与经济性的原则。

在新型电网建设与运行中仍应考虑供电可靠性及运行稳定性等重要问题。在微电网结构和能源结构下，与传统电力系统相比，新型微电网结构下的可靠性与稳定性与之不同，新型电网结构有了新的意义，应对其规划设计的评估与分析方面进行深入探索和研究。

分布式电源及微电网的规划除了要考虑负荷需求，满足安全性、可靠性及灵活性的特点外，还需要考虑系统经济以及网损等经济性问题，做到建设成本与运行成本的最低。由于各种分布式电源本身不同的特性，建立以经济成本最低为目标的优化函数，优化选择不同类型的分布式电源的安装地点、安装容量、渗透极限等问题，以确保整个系统达到运行状态最佳。在分析规划配电网中分布式电源或微电网最优安装地点，需要综合考虑线路容量极限，电压波形及短路电流水平等各项技术条件的约束，从而确立网络建设费用及网损最小的目标函数。

## 4. 微电网常用的结构模式

微电网所建的地区的环境和负荷水平决定了微电网结构模式，在不同的环境和负荷水平下，微电网的结构有着很多的差别，大多数微电网结构中都包含微电源、蓄能装置、管理系统和负荷等基本单元。微电源都是通过电力电子器件为接口与外电网相连。微电网的结构模式多样化，有很多不同的分类方式，例如交流微网、直流微网与交直流混合微网，三相微网与单相微网，简单微网结构与复杂多微网结构，单 PCC 点微网与多 PCC 点微网等。

### (1) 直流微网

直流微网的结构如图 2 所示，系统中的分布式电源、储能装置、负荷等均通过电力电子变换装置与直流母线相连，直流网络再通过逆变装置接连至外部交流大电网。直流微网通过利用电力电子变换装置可以向不同电压等级的直流，交流负荷提供电能，储能装置对分布式电源和负荷的波动在直流侧进行补偿。

### (2) 交流微网

交流微网目前仍然是微网的主要形态，在交流微电网中，分布式电源、储能装置等均通过电力电子装置连接至交流母线，微电网可以通过对公共联结点处开关的控制，既能实现其并网运行向孤岛运行模式的转换，又能实现孤岛运行模式向并网运行方式的转换。

美国电力可靠性技术方案解决协会(The consortium for electric reliability technology solutions, CERTS)提出的微电网结构是目前世界较为权威的微电网结构,如图3所示[7] [8]。馈线A和馈线B分别为敏感负荷和可调节负荷,重要负荷支路通过其本身安装的静态开关,当电能质量或电压一旦下降时,静态开关便会打开,电路将维持在孤岛运行状态直到使系统电能恢复。馈线C带有可断开负荷以此来面对故障的发生。现在微网建设示范点都是以上述结构为基础,根据实际情况建设和发展适应本地条件的微电网。

(3) 交直流混合微网

图4所示的微电网中,之所以称为交直流混合微电网,因其微电网结构中包含有交流母线同时还有直流母线,既可以满足交流负荷用电需求又可以满足直流负荷供电需求。但从微电网整体结构来看,因为直流微网接入系统时,其通过电力电子逆变器接入交流母线,实际上交直流混合微电网的本质仍然是交流微电网。

(4) 简单结构微网

除了上述分类,微电网还可以分成简单结构微网和复杂结构微网,简单结构微网是指系统中分布式电源的种类和数量相对比较少,其运行和控制比较简单的微网,其典型模型如图5所示。实际上,这种

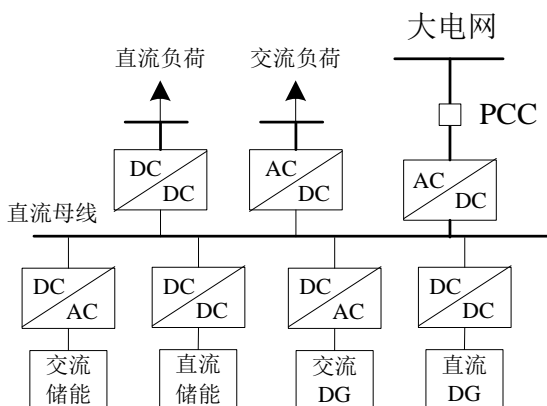


Figure 2. DC micro-grid structure  
图2. 直流微电网结构

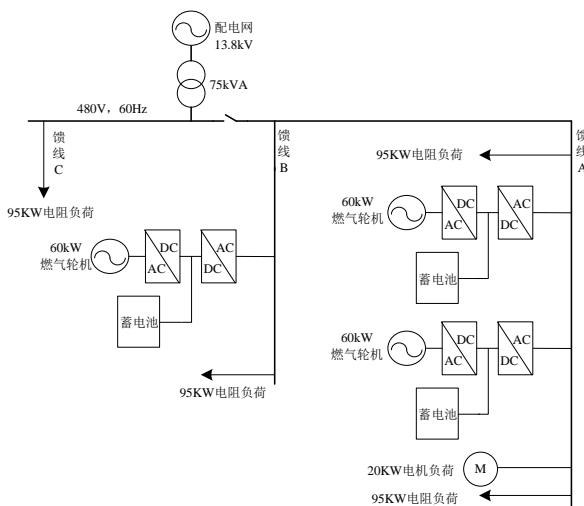


Figure 3. AC/DC micro-grid structure designed by CERTS  
图3. CERTS设计的交流微电网结构

简单结构的微电网系统中应用很多，可在并网和孤岛两种模式间灵活切换，这不仅保证了能源有效利用效率，而且使用户的电力供应可靠性有了显著的增强。

(5) 复杂结构微网

复杂结构微网内分布式电源的种类多，分布式电源接入系统的方式多样，因而使得整个微电网系统的结构变得十分复杂，且其系统内的运行和控制也比较复杂。如图 6 所示的复杂结构的微电网，该微电网系统为德国 Demotec 微网实验系统，在结构复杂的微网中含有多种不同电气特性的分布式电源，可以包含多个子微网，在模型构建上具有灵活多样性。在复杂微电网系统中包含有几个小型的微电网子系统，通过系统上层控制器的控制与调度，不仅是微电网结构得到极大的优化，提高了微电网的发电效率。

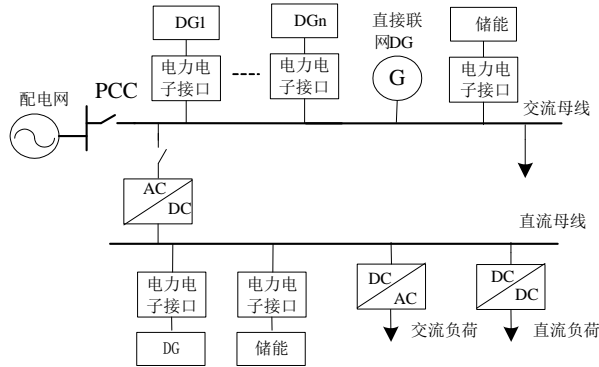


Figure 4. AC/DC hybrid micro-grid structure  
图 4. 交直流混合微电网结构

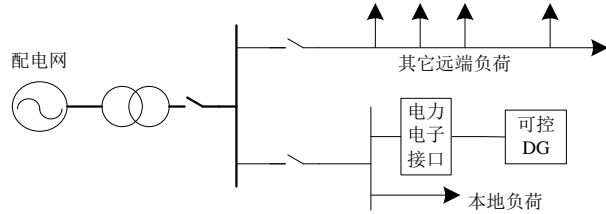


Figure 5. Simple micro-grid structure  
图 5. 简单结构的微电网

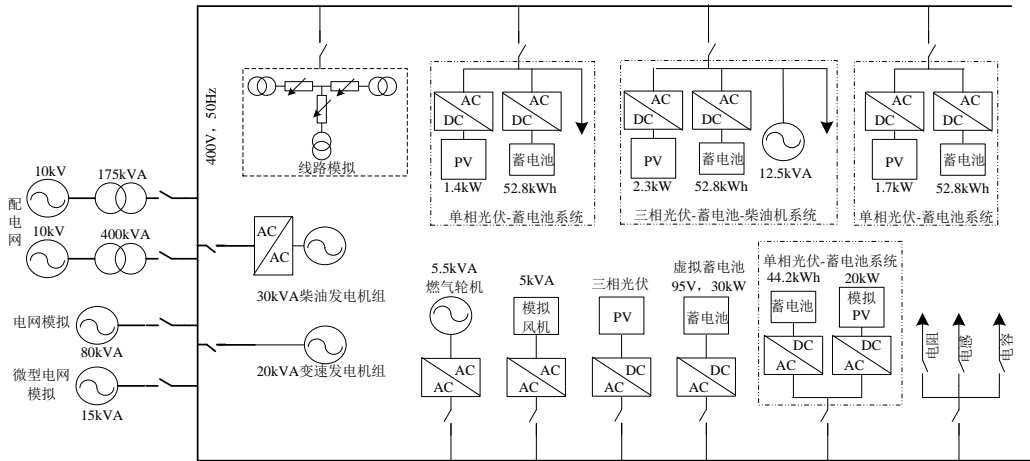


Figure 6. The German Demotec complex structure of micro-grid  
图 6. 德国 Demotec 复杂结构微电网



### (6) 单 PCC 点微网与多 PCC 点微网

微电网处于并网运行时，由电网提供参考的电压和频率，对微电网内部 DG 的动态特性要求较低，微电网控制系统也简单很多，且在大电网处于正常工作状态时，处于并网状态的微电网内的电能质量相对于孤岛一般较好。因此，只有在大电网发生故障或外电网电能质量较差时，微电网才会孤岛运行，这对各 DG 及微电网控制系统要求均比较高。为了降低微电网的运行难度，尽量保持微电网的并网运行状态，笔者认为可在规划设计时为微电网考虑多个与外电网连接的 PCC 点，且接至配电网的不同馈线，在并网运行时，只有一个 PCC 点开关闭合，其他 PCC 点保持打开状态，作为备用。这样当正常时处于闭合状态 PCC 点所连馈线发生故障时，可断开该 PCC 点，而闭合其他某一 PCC 点，使微电网接至另一馈线，依然保持并网运行状态，从而避免了微电网进入孤岛运行状态。当 DG 无孤岛运行能力或控制特性较差时，比较适合采用多 PCC 点微电网。

## 5. 微电网的电源规划

电源的类型和容量的优化选择也是微电网规划中的重要研究内容，应该在达到设计功能的前提下，实现经济上的最优，即使能源的购买、应用、转换达到经济上的最优。因此，需要精确评估各类微电源的投资及运行成本、并建立负荷冷、热、电数学模型、根据评估结果分析开发适用于多类型电源及用电负荷的微网电源规划模型和算法。

当微电网长期孤岛运行时，比如偏远农村地区的微电网，为了提高微电网供电经济性，应该依据当地的气候条件和环境因素，选择合理的电源类型，并充分利用各电源的互补特性，针对微电网负荷需求及各 DG 发电容量特性曲线，量化微电网的供电成本和投资成本以及负荷的停电损失，并以三者之和最小为目标函数来优化各种类型 DG 的容量配置。

当微电网主要并网运行时，如上文所述的城市片区微电网，网内负荷可采用网内 DG 和大电网联合供电的方式，为提供供电经济性，可在大电网供电价格给定的情况下，针对微电网的负荷需求，分别量化网外供电和网内供电成本，并以两者之和最小为目标进行优化。微电网并网运行时，只有在故障情况下才有可能出现停电负荷，因此，在规划阶段可不考虑网内负荷的停电损失。

微电网内电源的类型可分为三类：间歇性电源(例如风力发电、太阳能发电)，输出功率较为稳定的电源(例如燃料电池、燃气轮机、柴油发电机)以及储能装置。在对电源进行优化选择时，除了考虑电源的投资及运行成本，还需要各种类型电源组合的微电网运行稳定性问题，尤其是微电网需要孤岛运行时，该问题更加重要，目前，大家在研究电源规划时，常将该问题简化为约束条件进行处理。

## 6. 数学模型

### 6.1. 目标函数

微电网在并网运行方式下，要保证电网内部负荷的 100% 供电，在考虑微电网与配电网之间的电能交换的同时，还需考虑微电网与配电网之间的电能交易量，利用当地的自然条件和环境充分利用可再生能源即分布式电源的环境效益，使得微电网的综合成本最低，具体的模型如下：

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^N C_{DG_i} \times P_{DG_i} \times \frac{r(1+r)^L}{(1+r)^L - 1} \quad (2)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^N C_{V_i} \quad (3)$$

$$C_3 = C_{\text{buy}} \times P_{\text{buy}} \quad (4)$$

$$C_4 = C_R \times P_R + C_C \times P_C \quad (5)$$

$$C_5 = \sum_{i=1}^N C_k \phi_{ik} (P_{DG_i}) \quad (6)$$

$$C_6 = \sum P_L \times C_{\text{pay}} \quad (7)$$

式中： $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  分别为分布式电源的一次建设成本，分布式电源的运行管理费用，微电网向大电网的购电费用，燃料电池和柴油发电机的燃料费用，分布式电源的排污费用，用户中断负荷费用； $C_{DG_i}, C_{Y_i}, C_{\text{buy}}, C_R, C_C, C_k, C_{\text{pay}}$  分别为第  $i$  个分布式电源的单位容量初始投资，第  $i$  个分布式电源的运行管理成本，微网向大电网购电价格，天然气的价格，柴油的价格，处理第  $k$  种污染物的费用，中断负荷的补偿费用； $N$  为分布式电源的个数； $r$  取 6%； $L$  为各分布式电源的寿命； $P_{DG_i}, P_{\text{buy}}, P_R, P_C, P_L$  分别为第  $i$  个分布式电源的容量，微网向大电网的购电量，消耗的天然气的容量，消耗柴油的容量，中断的负荷量。

## 6.2. 并网运行方式下的约束条件

### (1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P'_{gi} + P'_{\text{grid}} = P'_{\text{load}} \quad (8)$$

式中： $P'_{gi}, P'_{\text{grid}}, P'_{\text{load}}$  分别为  $t$  时刻第  $i$  个微电源的功率。

### (2) 各分布式电源的出力上下限约束

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad (9)$$

### (3) 蓄电池荷电量约束

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (10)$$

式中： $SOC_{\min}, SOC_{\max}$  分别为允许荷电状态的下限值和上限值。

### (4) 柴油发电机的爬坡约束

$$P_{t+1} - P_t \leq P_{\text{limit}} \quad (11)$$

式中： $P_{t+1}, P_t, P_{\text{limit}}$  分别为  $t + 1$  时刻的柴油发电机输出功率， $t$  时刻柴油发电机的输出功率，柴油发电机的功率限制。

## 6.3. 模型的求解算法

由于微电网电源优化规划问题是多变量，多约束条件的非线性优化配置问题，本文采用遗传算法进行求解。遗传算法是对解空间的多个解进行处理，不从单个解开始，从串集开始搜索，覆盖性大，利于全局最优，从而减少了陷入局部最优解的风险；遗传算法仅通过适应度函数的大小来评估个体，不受函数不连续或不可微的约束，并且具有自组织，自适应和自学习性。遗传算法求解的流程如图 7 所示。

## 7. 算例分析

选取一小型微电网向某地区供电为研究对象，电源类型有风力发电，太阳能光伏发电，储能，燃料电池和柴油发电机五种，当地的负荷类型包括医院，商业，工业，写字楼，居民用户等。输入数据包括当地一年负荷曲线如图 8 所示，当地一年的风速和光照强度等气象数据如图 9 所示。根据当地的风资源和太阳能资源情况预测出风力和光伏的出力以及各分布式电源的投资和运行管理费用等基础数据如表 1，



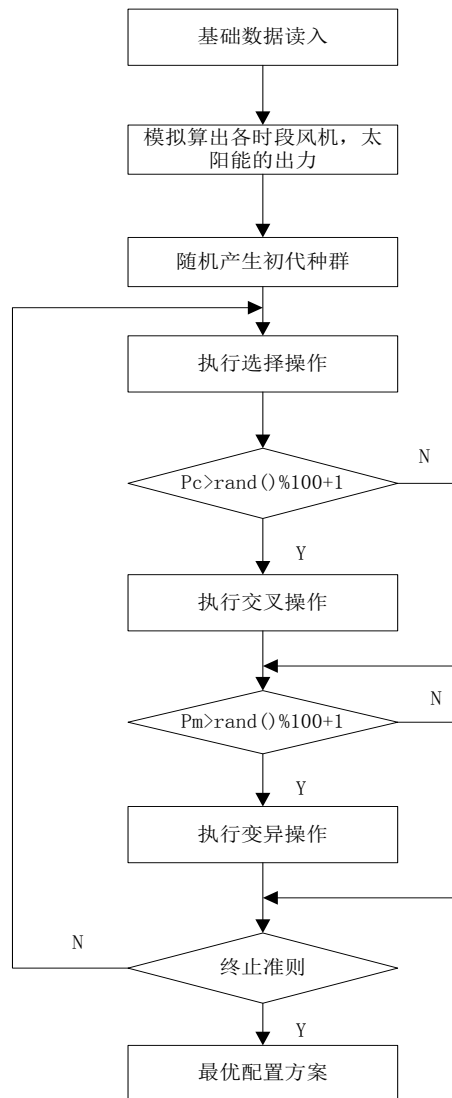


Figure 7. Flow chart of genetic algorithm

图 7. 遗传算法的流程图

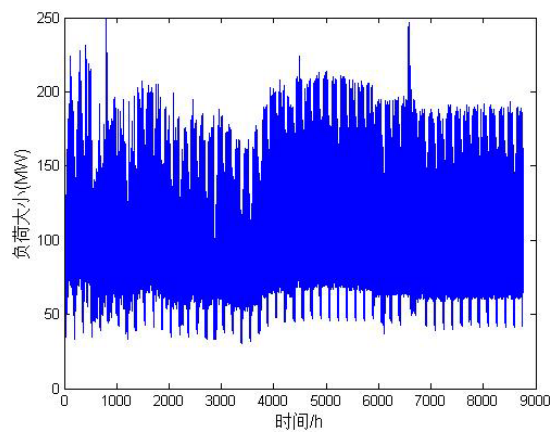


Figure 8. Hourly load profile

图 8. 负荷曲线

实时的电价数据如表 2 所示, 排污有关费用如表 3, 表 4 所示, 表 5 为用户中断负荷补偿费用数据, 天然气价格为 1.8 元/立方米, 柴油价格为 2.5 元/升, 区域内各用户的用电比例如表 6 所示, 表 7 为区域综合停电损失费用。在该运行方式下, 储能考虑分布式电源不向大电网倒送电能情况下可以吸收风电和光伏多余的发电量, 在风光充足时吸收电能, 在风光不足时释放电能, 起到削峰填谷, 提高分布式电源的利用率的作用, 最后通过遗传算法对该优化问题求解。

根据以上的原始数据, 对该区域的一年 8760 个小时进行模拟仿真, 本文中遗传算法参数选取如下: 群体大小为  $M = 100$ , 交叉概率  $P_c = 0.7$ , 变异概率  $P_m = 0.04$ , 最优保存个数取为 10, 最大迭代次数选取为 1000。遗传算法的仿真结果如表 8。

由仿真结果分析, 表 8 显示利用遗传算法求解目标函数的最优值为 1637936 元, 此时在保证用户用电可靠性并且兼顾环境效益的基础上, 使得可再生能源的利用率在燃料电池, 柴油发电机, 储能的共同

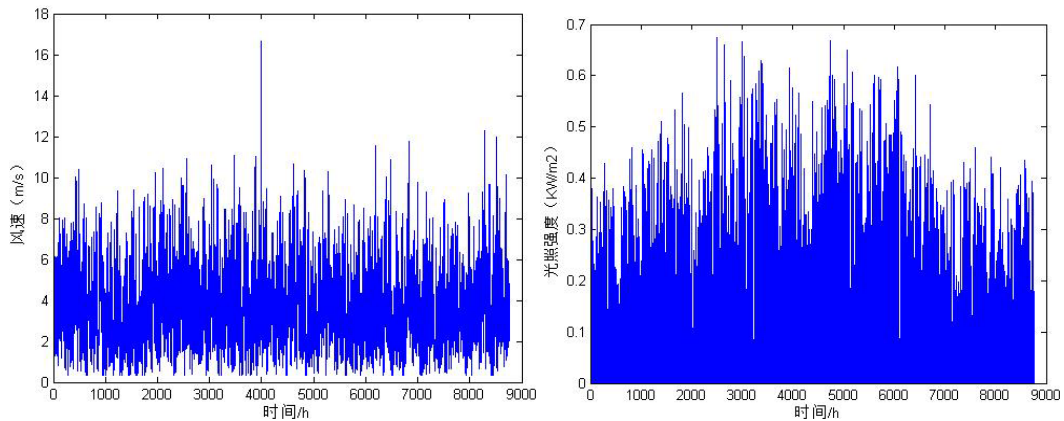


Figure 9. Meteorological data  
图 9. 气象数据

Table 1. Basic data of distributed generation  
表 1. 分布式电源的基础数据

类型	风电	光伏	燃料电池	柴油机	储能
功率下限(kW)	0	0	0	0	0
功率上限(kW)	200	100	60	60	400
初始投资(万元/kW)	1.5	2	4.2	1.4	1.2
运行管理费用(元/kWh)	0.0296	0.0096	0.0293	0.088	0.0296
使用寿命(年)	15	20	15	20	5

Table 2. Price in real time  
表 2. 实时电价

时段	1	2	3	4	5	6	7	8
电价	0.2294	0.1692	0.1243	0.0926	0.0287	0.1626	0.259	0.3693
时段	9	10	11	12	13	14	15	16
电价	0.4932	0.5028	0.7742	0.9558	0.9462	1.4241	0.9462	0.7551
时段	17	18	19	20	21	22	23	24
电价	0.3823	0.3486	0.3427	0.3948	0.4251	0.3326	0.2867	0.2151

**Table 3. The price of pollutants**  
**表 3. 污染物的价格**

处理第 K 种污染物的价格(元/kg)			
第 K 种污染物	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
价格(元/kg)	0.210	14.820	62.964

**Table 4. The pollutants emissions of each power supply**  
**表 4. 各电源的污染物排放量**

第 K 种污染物的排放量 g/kWh			
微电源类型	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
光伏发电	0	0	0
风电	0	0	0
燃料电池	489	0.003	0.01
柴油机	649	0.206	9.89
大电网	889	1.8	1.6

**Table 5. The compensation costs of user interrupt**  
**表 5. 用户中断负荷补偿费用**

停电损失费用(元/kWh)						
用户类别	1 min	30 min	1 h	2 h	4 h	8 h
医院	45.60	75.50	159.97	431.92	826.39	1300.76
商业	3.92	16.51	37.35	75.03	312.95	637.44
工业	0.95	4.83	10.69	22.02	31.44	59.73
政府机关	0	40.51	85.33	141.42	246.28	434.17
居民用电	0	20.16	42.67	98.11	166.85	275.23

**Table 6. Electricity proportion of each user in the area**  
**表 6. 区域各用户的用电比例**

区域各类用户用电量比例(%)						
用户类别	医院	商业	工业	政府机关	居民用电	合计
用电量比例	7.6	32.91	42.56	4.63	12.30	100
负荷率	88.98	68.98	77.72	59.91	78.77	76.15

**Table 7. Regional power outage cost**  
**表 7. 区域停电损失费用**

区域综合停电损失费用						
平均停电时间	1 min	30 min	1 h	2 h	4 h	8 h
停电损失费用(元/kWh)	6.28	23.25	49.61	110.89	282.49	524.46

配合下达到最优。

**Table 8.** The simulation results of genetic algorithm  
**表 8.** 遗传算法仿真结果

序号	风电(kW)	光伏(kW)	燃料电池(kW)	柴油机(kW)	储能(kWh)	目标函数(元)
1	198	50	47	45	322	1,777,814
2	181	50	51	48	300	1,721,489
3	183	56	49	49	310	1,762,031
4	160	67	49	52	285	1,708,813
5	157	67	50	52	280	1,696,328
6	181	60	47	50	312	1,770,799
7	160	57	50	49	270	1,637,936
8	180	59	51	50	305	1,764,594
9	182	60	50	47	318	1,793,583
10	160	59	49	51	270	1,643,879

## 8. 结语

近年来微电网技术发展势头迅猛，其高可靠性、环保、灵活等特点被欧美发达国家所大力发展。我国 863、973 等国家重点研究发展规划也将微电网的发展进行立项，未来几年微电网相关技术及理论研究将会通过示范工程得到验证，进而得到广泛的实践应用，本文根据对微电网的分类，对其不功能需求的分析，通过算例仿真验证了微电网分布式电源并网规划的科学性。因此进一步开展微电网规划设计的研究，提高其运行性能，且具有重要的现实意义，能够有力推动我国微电网的发展。

## 基金项目

上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)资助项目。

## 参考文献 (References)

- [1] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平 (2003) 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述. *电网技术*, **12**, 71-75.
- [2] 周篁 (2003) 关于我国可再生能源发电的问题分析及对策研究. *电网技术*, **7**, 1-3.
- [3] Lasseter, R. and Paigi, P. (2004) Microgrid: A conceptual solution. *Proceeding of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, 20-25 June 2004, 4285-4290.
- [4] Zoka, Y. and Sasaki, H. (2004) An interaction problem of distributed generators installed in a MicroGrid. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, Hong Kong, 5-8 April 2004, 795-799.
- [5] 宗鲁相, 王彩霞, 闵勇, 等 (2007) 微电网研究综述. *电力系统自动化*, **19**, 100-107.
- [6] 李峰, 李兴源, 郝巍 (2007) 不间断电力变电站中分布式电源接入系统研究. *继电器*, **10**, 13-19.
- [7] Stevens, J. (2004) Development of sources and a testbed for CERTS microgrid testing. *Proceedings of IEEE 2004 Power Engineering Society General Meeting*, Denver, 10-10 June 2004, 2032-2033.
- [8] Lasseter, R., Akhil, A., Marnay, C., et al. (2002) Integration of distributed energy resources: The CERTS microgrid concept. <https://certs.lbl.gov/sites/all/files/50829%5B1%5D.pdf>
- [9] Hatziargyriou, N., Asano, H., Irvani, R. and Marnay, C. (2007) Microgrid overview. *IEEE Power & Energy Magazine*, 1540-1547.