

考虑多种因素评估的微电网优化调度

赵媛媛, 艾芊, 余志文, 贺兴

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 基于微网调度中不同利益主体追求的目标不同, 从经济、技术、环境评估三方面分别进行考虑, 提出相应的最优调度策略。建立关于发电和交易成本最低的经济指标模型、网损最小的技术指标模型及污染气体治理费用最低的环境指标模型, 并针对各目标之间存在的冲突, 提出一种最优组合策略。结合遗传算法与层次分析法, 对多目标调度策略进行优化: 通过自适应遗传算法得到多目标优化调度的 Pareto 最优解集; 通过层次分析法对解集进行评估, 为决策者选择最优的调度方案。最后以一欧洲典型微网为算例, 通过仿真验证了该模型的有效性和可行性。

关键词: 微网调度; 多目标优化; 遗传算法; 层次分析法; 最优策略

A microgrid optimal scheduling considering the assessment of various factors

ZHAO Yuan-yuan, AI Qian, YU Zhi-wen, HE Xing

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Different entities are interested in different objectives in a microgrid scheduling so that various optimization strategies are put forward considering the evaluation of economic, technical and environmental performances. The economic model with minimum generating and trading cost, technical model with minimum loss and environmental model with minimum pollutant gases emission are built and a combined strategy is proposed in case of conflicting objectives. Genetic algorithm combined with analytic hierarchy process is introduced to solve the optimization problem. Specifically, a Pareto front is given based on an adaptive genetic algorithm and an assessment of some Pareto solutions is performed through the analytic hierarchy process. Finally, the simulation results of a typical European microgrids show the feasibility and validity of the model.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A108).

Key words: optimal strategy; multi-objective optimization; genetic algorithm; analytic hierarchy process; microgrid scheduling

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0023-08

0 引言

微电网采用大量现代电力技术, 将风力发电、太阳能发电、燃料电池等分布式发电 (Distributed Generation, DG) 与储能设备、负荷等相结合, 形成规模较小的分散的独立系统。它既可与大电网联网运行, 也可在电网故障时与主网断开以孤岛形式运行, 大大提高了电网供电的可靠性。微电网具有双重角色, 对大电网而言, 它作为一个单一可控单元, 可以在数秒内做出响应以满足外部输配电网的需求; 对用户而言, 它作为一个可定制电源, 可以满足用户多样化的需求, 如降低线路网损, 维持电压

稳定, 增加本地可靠性等^[1-3]。微网运行带来多方面的利益, 因此对微网经济、技术、环境等效益的评估与量化成为欧盟多微网项目^[4]的目标之一, 揭示了多微网运行与控制的多目标优化本质。

微网调度中存在多个受益主体, 他们有不同的利益追求。电网调度人员希望减少网损和电压波动, 提高电网可靠性, 以最大限度地优化电网性能; DG 个体业主及能源供应商等私营实体希望充分利用微网中 DG 机组组合, 通过售卖能源最大限度地提高利润; 用户则希望在保证供电可靠性的同时, 电网电价能够最大限度地降低; 立法和监管部门需要控制 DER 污染气体的排放量, 减少供电带来的环境影响。微电网中不同的利益主体可以通过控制各种分布式能源(Distributed Energy Resources, DER)的运行, 达到特定的经济、技术及环境指标。目前

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2011AA05A108); 国家科技支撑计划 (2013BAA01B04)

国内很多文献主要考虑单目标经济优化调度^[5-7],文献[8]将在考虑经济性的同时,考虑环保因素,建立了微网经济环保单目标调度模型。文献[9]建立了考虑经济性、供电可靠性、环境效益的多目标函数,文献[10]则考虑了网损、污染气体排放减少及电压稳定等多指标优化,但是都没有考虑微网与大电网的交互成本。文献[11]分别对微网带来的经济、技术和环境指标进行量化,为本文指标的确定奠定了基础。

因此,本文从经济、技术和环境评估方面提出相应的最优调度策略。当各个目标存在利益冲突时,提出一种基于遗传算法和层次分析法相结合的综合调度策略。传统多目标优化方法通常对单个目标加权求和,将多目标优化问题转化为单目标问题,最终得到一个解,而且权重值的选择困难,需要事先确定;采用遗传算法等智能算法可以获得一系列 Pareto 最优解,但是决策者依然需要从解集中选择出最优方案。将层次分析法与遗传算法相结合,通过层次分析法对 Pareto 解进行全面评估,既可以避免传统加权求和算法中单一解的局限性,又可以从一系列 Pareto 最优解中得到专业、全面的最优综合指标解,为决策者选择最优的调度方案。

1 微电网优化调度的问题描述

1.1 基本指标的建立

微网调度指标总体上分为经济、技术和环境三类,任一类指标下又包含多项子指标。经济性用微网与主网能量交互成本、DER 能耗成本和运行维护成本来分析,其主要涉及电网运营商、DG 私营个体及终端用户的利益;环境效益分析主要考虑污染气体的排放,通过立法监管部门对排放污染物的罚款可将其转化为排放成本;技术指标主要考虑可靠性和网损两方面,通过单位成本系数的引入也可用成本函数度量。但由于停机成本等作为 DER 评价指标时,认为是独立于微网调度任务之外的^[12],可暂不考虑可靠性指标。电网能量平衡、电压控制和 DG 出力限制等约束条件也可认为属于技术指标,该指标主要涉及电网调度管理人员的利益。图 1 列出衡量环境、经济、技术方面的重要指标及它们之间的联系,具体指标计算模型在第 2 节给出。

综合考虑以上各个指标,微网调度的成本目标函数 G ,可表示为

$$G = r_{\text{sell}} - (f_{\text{buy}} + f_{\text{fuel}} + f_{\text{O\&M}} + f_{\text{emission}} + f_{\text{loss}}) \quad (1)$$

其中: r_{sell} 是售电总收入; f_{buy} 是买电成本; f_{fuel} 是

DER 能耗成本; $f_{\text{O\&M}}$ 是 DER 运行维护成本; f_{emission} 是各 DER 污染气体总排放成本; f_{loss} 是网损总成本。

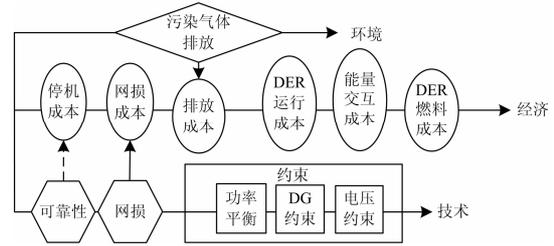


图 1 微网调度指标描述

Fig. 1 Description of the criteria in microgrid scheduling

约束条件为

(1) 功率平衡约束

$$P_{\text{dgen}} - P_{\text{demand}} + P_{\text{buy}} - P_{\text{sell}} - P_{\text{loss}} = 0 \quad (2)$$

其中: P_{dgen} 为微网中各 DER 总发电量; P_{demand} 为微网中负荷总需求; P_{buy} 为大电网流入微网的电量; P_{sell} 为微网流入大电网的电量; P_{loss} 为损耗的功率。

(2) DG 出力约束

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (3)$$

其中: P_i 为第 i 个 DG 出力; P_i^{\min} 、 P_i^{\max} 分别为第 i 个 DG 出力下限和上限。

(3) 电压约束

$$U_k^{\min} \leq U_k \leq U_k^{\max} \quad (4)$$

其中: U_k 为 k 点电压值,通过潮流计算获得; U_k^{\min} 、 U_k^{\max} 分别为 k 节点电压下限和上限。

1.2 微网优化调度策略

1.2.1 最优经济策略

最优经济策略(图 2)定义为

$$\min \{F_A = (f_{\text{buy}} - r_{\text{sell}}) + f_{\text{fuel}} + f_{\text{O\&M}}\} \quad (5)$$

s.t. 约束条件(1),(2)

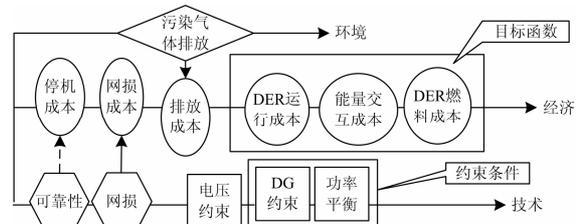


图 2 微网最优经济策略

Fig. 2 Microgrid optimal economic strategy

电网运营商、DG 私营业主等希望微网在该情况下运行。该模式下, DG 完全自由运行,只考虑其产生的经济收入和成本,不考虑其对环境和电网

性能的影响。

1.2.2 最优技术策略

最优技术策略 (图 3) 定义为

$$\min \{F_B = f_{\text{loss}}\} \quad (6)$$

s.t. 约束条件(1),(2),(3)

电网调度管理人员为使电网性能得到优化, 希望微网在该情况下运行。该模式下, 影响电网性能的各约束条件均考虑在内, 不考虑经济效益和环境影响。

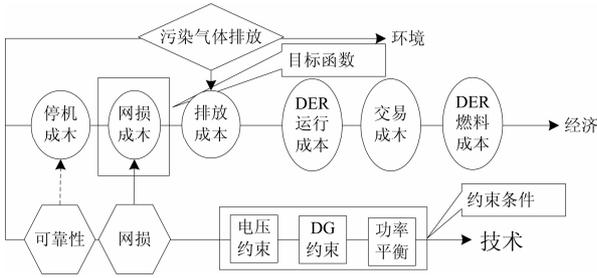


图 3 微网最优技术策略

Fig. 3 Microgrid optimal technical strategy

1.2.3 最优环境策略

最优环境策略 (图 4) 定义为

$$\min \{F_C = f_{\text{emission}}\} \quad (7)$$

s.t. 约束条件(1),(2)

该情况下, 微网调度只考虑污染气体的排放。低污染气体排放的 DG 单元优先考虑运行, 使排放成本最小化。该方法需要满足立法监管体制下的环境目标要求。

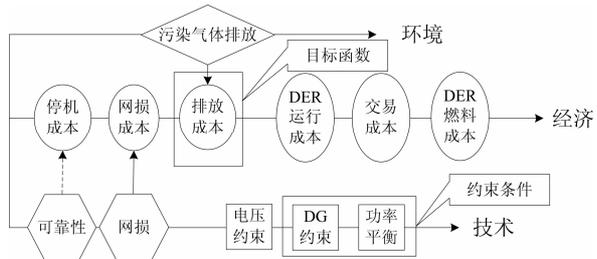


图 4 微网最优环境策略

Fig. 4 Microgrid optimal environmental strategy

1.2.4 基于层次分析法的最优组合策略

最优组合策略需要综合考虑经济、技术、环境三类指标, 由图 1 可知, 在这三大类指标下, 还存在多个子指标。本文基于层次分析法^[13-14]建立一个综合评价指标。将经济、技术、环境三个指标作为准则层, 将排放成本等指标作为指标因素层^[15], 如表 1。

表 1 微网调度综合指标体系

Table 1 Comprehensive index in the microgrid scheduling

| 目标层 | 准则层 | 指标因素层 |
|---------|--------------------|------------------------|
| 微电网运行系统 | 经济类 S ₁ | 能量交互成本 S ₁₁ |
| | | 能耗成本 S ₁₂ |
| | | 运行维护成本 S ₁₃ |
| | 技术类 S ₂ | 网损 S ₂₁ |
| | | 可靠性 S ₂₂ |
| | 环境类 S ₃ | 污染气体排放 S ₃₁ |

对于某一类固定指标, 指标之间存在一定的关联性, 每一项指标的权重值通过计算指标特征矩阵的特征值及特征向量, 并通过一致性检验后获得。特征矩阵根据微电网不同决策者对各个指标重要程度的比较获得。

本文首先运用第 3 节中的自适应遗传算法得到 Pareto 最优解集, 然后运用该方法对某些最优解进行综合评价, 为决策者提供最优调度方案。

2 目标函数建模

2.1 经济指标模型

由式 (2)、式 (5), 可得

$$\begin{aligned} \min F_A = & (f_{\text{buy}} - r_{\text{sell}}) + f_{\text{fuel}} + f_{\text{O\&M}} = \\ & \sum_{t=1}^T [q_t (P_{\text{buy}}^t - P_{\text{sell}}^t) + \sum_{i=1}^I (K_{\text{fuel}}^i + K_{\text{O\&M}}^i) \cdot P_{\text{dgen}}^{i,t}] = \\ & \sum_{t=1}^T [q_t (P_{\text{demand}}^t + P_{\text{loss}}^t - \sum_{i=1}^I P_{\text{dgen}}^{i,t}) + \sum_{i=1}^I (K_{\text{fuel}}^i + K_{\text{O\&M}}^i) \cdot P_{\text{dgen}}^{i,t}] \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $T=24$ h; I 为 DG 的个数; q_t 是 t 时刻市场电价, 为计算简单, 本文假设售电和买电价格相同; P_{buy}^t 、 P_{sell}^t 分别为 t 时刻微电网买入的电量和卖出的电量; K_{fuel}^i 、 $K_{\text{O\&M}}^i$ 分别为 DG i 的单位能耗成本和单位运行维护成本; $P_{\text{dgen}}^{i,t}$ 是 t 时刻 DG i 的发电量。

2.2 技术指标模型

$$\min F_B = f_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{loss}} P_{\text{loss}}^t \quad (9)$$

其中: k_{loss} 为网损单位成本; P_{loss}^t 可通过最优潮流 (OPF) 计算获得。

2.3 环境指标模型

$$\begin{aligned} \min F_C = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I k_{\text{emission}}^i \cdot P_{\text{dgen}}^{i,t} = \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (p_{\text{CO}_2} \cdot N_{\text{CO}_2}^i + p_{\text{NO}_x} \cdot N_{\text{NO}_x}^i + p_{\text{SO}_2} \cdot N_{\text{SO}_2}^i) \cdot P_{\text{dgen}}^{i,t} \end{aligned} \quad (10)$$

其中: k_{emission}^i 是 DG i 污染气体的排放系数 (单位: €/kWh, 认为每小时排放量是定值); p_{CO_2} 、 p_{NO_x}

和 p_{SO_2} 分别为 CO_2 、 NO_x 、 SO_2 的排放惩罚价格(单位: $\text{€}/\text{kg}$); $N_{CO_2}^i$ 、 $N_{NO_x}^i$ 、 $N_{SO_2}^i$ 分别为 DG_i 每发 1 kWh 电 CO_2 、 NO_x 、 SO_2 的排放量(单位: kg/kWh)。

2.4 约束条件

约束条件主要考虑功率平衡约束, DG 出力约束和电压约束, 见式(2)~式(4)。

3 基于自适应遗传算法的求解方法

传统多目标优化方法一般对目标函数加权后求和, 将多目标优化问题转化为单目标问题, 但是权重值的选择很困难, 需要事先确定。而采用智能优化算法可以获得一系列 Pareto 最优解, 使不同的决策者根据不同的利益目标进行选择。遗传算法是智能优化方法中应用最为广泛也最成功的算法, 它主要由染色体编码、生成初始种群、求取适值函数、遗传运算、选择后代及停止准则等几个步骤组成。

本文的染色体是各 DER 的有功出力, 采用实数矩阵的编码方式。由于实数多目标优化中 Pareto 最优解有无穷多个, 所以本算法采用变种群规模的自适应策略, 设初始种群规模为 NP_0 , 则通过遗传操作生成的新种群规模则为 $a \times NP_0$, 其中 a 随着迭代次数递减。本文所采用的选择策略以求取 Pareto 最优解为中心。设第 i 代种群中有 NP_i 个染色体, 采用 NSGA-II 快速非劣支配排序的方法^[16-17]求取 Pareto 最优解。设置种群 Pareto 解保存器, 先把种群中第一个解置于其中, 然后把种群中剩余解依次与保存器中的解比较, 如果该剩余解优于保存器中的某个解, 则删除该保存器中的解, 如果劣于保存器中的某个解, 则忽略该剩余解, 如果非劣于保存器中的所有解, 则把该外部解添加到保存器中。则最终 Pareto 保存器中的解就是该代种群的 Pareto 最优解。假设共求得 P 个 Pareto 最优解, 该 P 个解总是被选择成为子代染色体, 然后再选择出 $NP_i - P$ 个其他染色体, NP_i 为第 i 代种群规模。基因操作包括交叉与变异。交叉运算采用双切点交叉。变异运算采用对有功扰动实现, 扰动幅度可根据发出功率进行调整, 该算法的具体流程见图 5。

4 算例分析

本文以一欧洲典型微网^[18]为算例, 该微网中 DER 包含一个微燃气轮机(Micro-turbine, MT)、一个燃料电池(Fuel Cell, FC)、一个风力发电机(Wind Turbine, WT)和五个光伏发电机(Photovoltaic, PV)。该微网结构图, 微网中各 DER 的运行参数, 污染气体排放参数, 负荷特性及微网与大电网交易

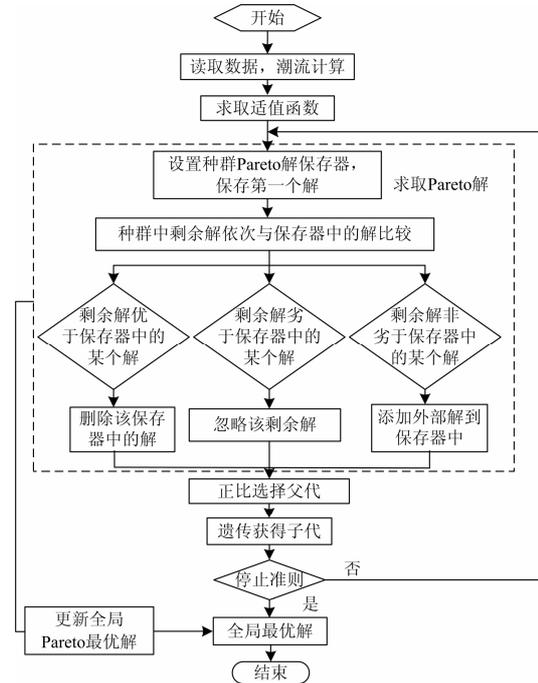


图 5 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of genetic algorithm

价格曲线见附录 A。考虑到 PV 的输出受日照、季节的影响较大, 其冬夏季的预测出力曲线如图 6 所示。

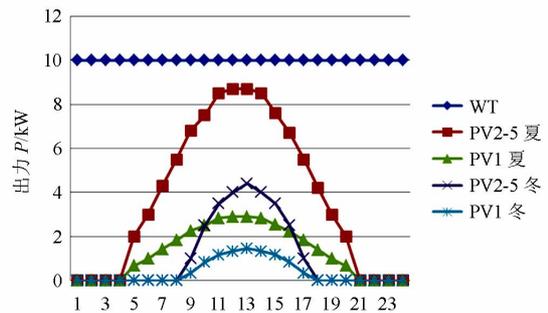


图 6 PV 和 WT 出力

Fig. 6 Daily output power of PV and WT

为简化分析, 认为 WT 的电量为定值。由于 PV 和 WT 发电成本较低, 且无污染气体排放, 故只考虑 MT 和 FC 的发电成本和排放成本。以下均对微电网夏季运行情况进行仿真。

4.1 不同优化策略下各 DER 出力

由于 PV 和 WT 的出力具有间歇性和随机性, 不能实现实时调度, 因此只考虑优化 MT 和 FC 的出力, 以实现不同策略下的最优调度。

图 7~图 9 表示了各单目标优化策略下 DER 出力情况。当微网中居民、工业和商业负荷均正常运行, 仅凭借 DER 的出力无法满足负荷的需求, 因此

该微网各时段均处于从大电网购电的运行模式。由图 7 可知, 最优经济策略下, FC、MT 的出力偏小, 说明 DER 的能耗和运行维护成本占主导地位, 同时, 为减小交易成本, FC、MT 的出力曲线与负荷和日交易价格曲线趋势相一致。由于 DG 的接入可以减小网损, 所以最优技术策略下 FC、MT 的出力在出力上限处浮动。为尽量减少 FC、MT 污染气体的排放, 最优环境策略下 FC、MT 的出力基本处于出力下限值处。

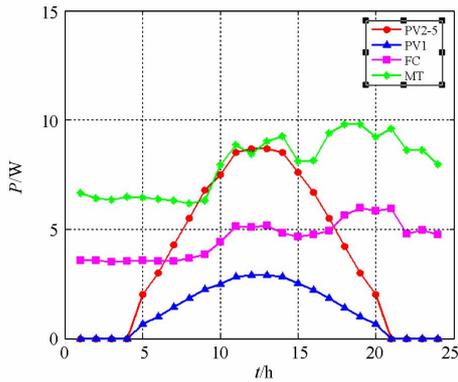


图 7 最优经济策略下各 DER 出力

Fig. 7 Output power of the optimal economic strategy

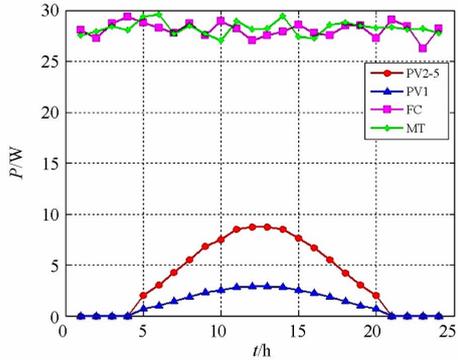


图 8 最优技术策略下各 DER 出力

Fig. 8 Output power of the optimal technical strategy

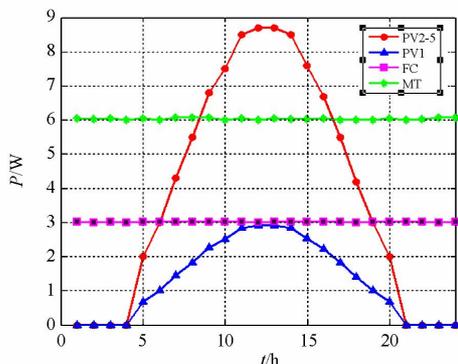


图 9 最优环境策略下各 DER 出力

Fig. 9 Output power of the optimal environmental strategy

4.2 多目标优化调度的 Pareto 分析

图 10 为综合考虑三个目标时解的分布三维图, 图 11 为不同两目标值下解的分布情况, 可见在某一

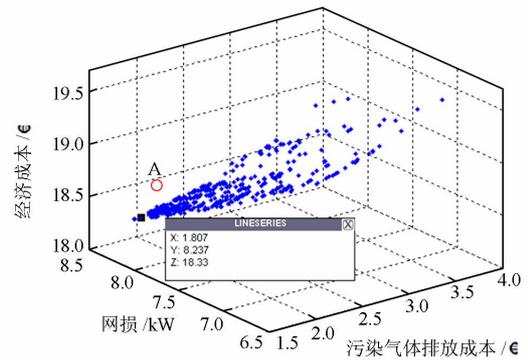
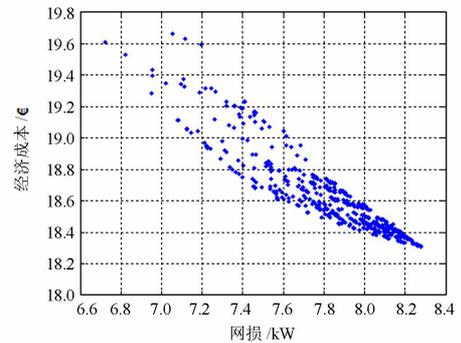
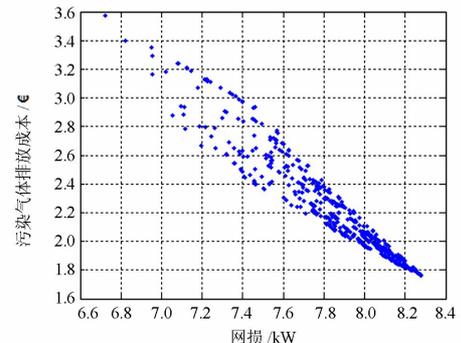


图 10 三维 Pareto 最优解集

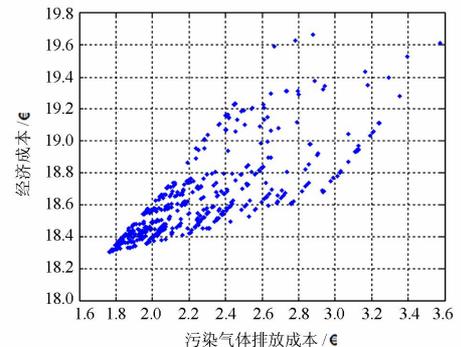
Fig. 10 3D Pareto optimal front



(a) 网损—经济成本



(b) 网损—污染气体排放成本



(c) 污染气体排放成本—经济成本

图 11 二维 Pareto 最优解集

Fig. 11 2D Pareto optimal front

二维 pareto 最优解图中的点 (如图 11(a)), 并没有出现在另一二维 pareto 解图中 (如图 11(c)), 充分说明了这三类指标之间的矛盾性, 各目标同时达到最优的可能性较小。因此需要决策者根据实际要求, 在 Pareto 最优解中选择相应侧重目标的微网调度方案。

认为各类指标的重要性为经济类 > 技术类 > 环境类, 运用层次分析法对选取的综合调度方案进行评估 (假设选取图 10 中 A 点目标值对应的调度方案), 具体评估步骤如下。

(1) 指标权重

特征矩阵由对各层指标两两比较的重要程度的标度 (a_{ij}) 构成。 $a_{ij}=1$ 表示因素 i 与因素 j 具有同等重要性; $a_{ij}=3$ 表示因素 i 比因素 j 稍微重要, $a_{ij}=5$ 表示因素 i 比因素 j 明显重要; 则指标因素层权重计算结果如表 2, 准则层权重计算结果如表 3。

表 2 指标因素层权重计算

Table 2 Weight calculation of index factors

| 指标 | S ₁₁ | S ₁₂ | S ₂₁ | S ₃₁ | 权重 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
| S ₁₁ | 1 | 5/2 | | | 0.714 3 |
| S ₁₂ | 2/5 | 1 | | | 0.285 7 |
| S ₂₁ | | | 1 | 5/2 | 0.714 3 |
| S ₂₂ | | | 2/5 | | 0.285 7 |
| S ₃₁ | | | | 1 | 1 |

表 3 准则层权重计算

Table 3 Weight calculation of criteria level

| 指标 | S ₁ | S ₂ | S ₃ | 权重 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| S ₁ | 1 | 3 | 5 | 0.637 |
| S ₂ | 1/3 | 1 | 3 | 0.258 |
| S ₃ | 1/5 | 1/3 | 1 | 0.105 |

(2) 评分

由图 10 可得 A 点各指标对应的具体数据, 根据上述的指标权重和评分标准^[13]可得到一个综合评分 (可靠性指标的建模参考文献[11]), 如表 4 所示。

表 4 微网调度综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of microgrid scheduling

| 准则层指标 | 权重 | 评分 | 指标因素 | 权重 | 评分 |
|----------------|-------|-------|-----------------|---------|-------|
| S ₁ | 0.637 | 80.57 | S ₁₁ | 0.714 3 | 78 |
| | | | S ₁₂ | 0.285 7 | 87 |
| S ₂ | 0.258 | 72.85 | S ₂₁ | 0.714 3 | 70 |
| | | | S ₂₂ | 0.285 7 | 80 |
| S ₃ | 0.105 | 90 | 1/3 | 1 | 90 |
| 综合评分 | | | | | 79.57 |

由以上分析可知, FC、MT 出力较低时经济类指标和环境类指标较优, 评分相对较高, 但同时拉低了技术类指标评分。即使决策者优先侧重于经济性, 但总体评分不太理想。需要加大经济性指标的权重, 或者提高技术类指标值。

4.3 算法比较

传统的多目标优化算法最终只给出一个优化解集, 缺乏对该解集的分析。由于在优化过程中所有目标函数没有重要度区分, 得到的优化解集在某种意义上也是同等重要的, 从而导致决策者无法分辨解的优劣, 为决策带来困难。模糊决策法^[19]是解决该问题的一种经典方法, 与该方法相比, 本文提出的新方法有以下优势: ①通过特征矩阵可以对多个, 尤其是多层指标的权重进行计算, 而基于模糊偏好的方法无法处理多层目标的情况; ②采用模糊决策方法最终得到的解只是具有针对性地减少, 对决策者来说还是面临继续选择的问题, 本文的方法可以进行量化评分, 能够进一步缩小最优解的范围, 直至为决策者提供最满意的方案。

5 结论

本文以一欧洲典型微网为算例, 采用遗传算法与层次分析法相结合的方法, 寻找微电网最优调度方案。PV 和 MT 作为清洁机组, 优先发电, 且考虑到其受环境的影响, 本文假定该机组每天满负荷发电, 只考虑 FC 和 MT 的实时优化调度。考虑到微网调度中不同主体追求的目标不同, 分别从经济、技术、环境方面提出不同的最优调度策略。不同策略下, FC 和 MT 的调度存在很大差异, 充分说明了各个目标之间存在的矛盾, 也揭示了微网调度的多目标本质。本文采取的方法不同于传统的多目标优化解决方案, 创新性地将层次分析法与遗传算法相结合, 通过层次分析法不仅可以对多目标优化调度建立一个综合指标, 还可对 Pareto 最优解进行全面、专业的评价, 为决策者选择最优调度方案。

附录 A

欧洲典型微电网结构见图 A1; 该微网结构中各 DER 的运行参数见表 A1; 各 DER 污染气体排放参数见表 A2; 日负荷特性见图 A2、图 A3; 微网与大电网日交易价格见图 A4。

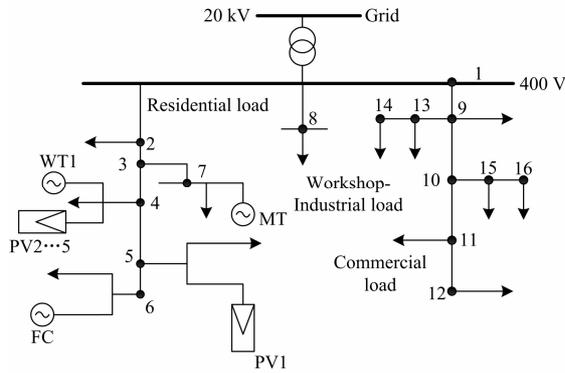


图 A1 欧洲典型微网结构图

Fig. A1 A typical European microgrid network

表 A1 各 DER 运行参数

Table A1 Operating parameters of DERs

| DER 类型 | K_{fuel} / (€/kWh) | $K_{O&M}$ / (€/kWh) | 出力 下限/kW | 出力 上限/kW |
|--------|----------------------|---------------------|----------|----------|
| MT | 4.370 | 0.110 | 6 | 30 |
| FC | 2.840 | 0.057 | 3 | 30 |
| WT | | | 0 | 15 |
| PV1 | | | 0 | 3 |
| PV2 | | | 0 | 2.5 |
| PV3 | | | 0 | 2.5 |
| PV4 | | | 0 | 2.5 |
| PV5 | | | 0 | 2.5 |

表 A2 各 DER 排放参数

Table A2 Emission parameters of DERs

| | CO ₂ | NO _x | SO ₂ |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| N_{MT} / (kg/MWh) | 724.6 | 0.200 | 0.004 |
| N_{FC} / (kg/MWh) | 489.4 | 0.014 | 0.003 |
| P / (€/kg) | 0.030 | 0.050 | 0.050 |

表 A2 中： N_{MT} 为 MT 每发 1 MWh 电各污染气体的排放量； N_{FC} 为 FC 每发 1 MWh 电各污染气体的排放量； p 为各污染气体排放的惩罚价格。

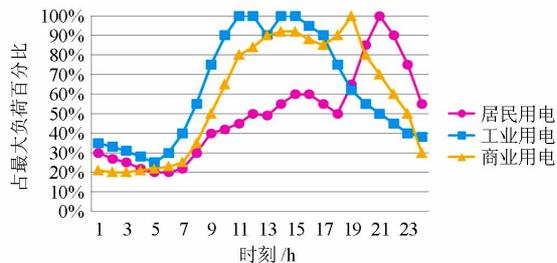


图 A2 不同用户的日负荷曲线

Fig. A2 Daily load curves of various customers



图 A3 夏季和冬季总日负荷曲线

Fig. A3 Summer and winter daily total load curves

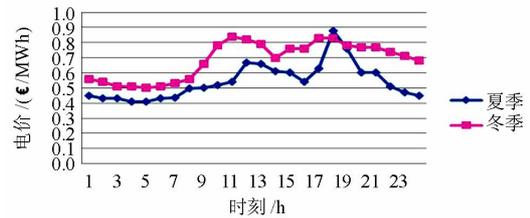


图 A4 夏季和冬季日交易价格曲线

Fig. A4 Summer and winter daily price curves

参考文献

[1] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.
 ZHENG Zhang-hua, AI Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31.

[2] 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.

[3] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 100-107.
 LU Zong-xiang, WANG Cai-xia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 100-107.

[4] EU Project "More Microgrids": advanced architecture and control concepts for more microgrids within the 6th framework programme (2002-2006)[EB/OL]. <http://microgrids.power.ece.ntua.gr/>.

[5] 刘小平, 丁明, 张颖媛. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.
 LIU Xiao-ping, DING Ming, ZHANG Ying-yuan. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-84.

[6] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 基于遗传算法的热电联产型微电网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 7-15.
 CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System

- Protection and Control, 2013, 41(8): 7-15.
- [7] 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.
DING Ming, ZHANG Ying-yuan, MAO Mei-qin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [8] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
SONG Xiao-ying, WANG Yan-song. Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 85-89.
- [9] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 16-22.
WANG Rui-qi, LI Ke, ZHANG Cheng-hui. Optimization allocation of microgrid capacity based on chaotic multi-objective genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 16-22.
- [10] 郑漳华, 艾芊, 徐伟华, 等. 智能电网经济运行的多目标调度优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 7-13.
ZHENG Zhang-hua, AI Qian, XU Wei-hua, et al. A multiobjective dispatch optimization strategy for economic operation of smart grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 7-13.
- [11] HATZIARGYRIOU N D, ANASTASIADIS A G, VASILJEVSKA J, et al. Quantification of economic, environmental and operational benefits of microgrids[C] // IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009.
- [12] TAO L, SCHWAEGERL C, HERRMANN N. Impact of microgrids concept on low voltage network reliability[C] // CIRED Seminar: Smart Grids, 23/24-06-2008, Frankfurt.
- [13] SAATY, THOMAS L. Multicriteria decision making: the analytic hierarchy process: planning, priority setting resource allocation[R]. United States: RWS Publications, 1990.
- [14] 陈庆前, 余畅, 章激扬, 等. 层次分析法在孤岛微网综合评价中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 133-137.
CHEN Qing-qian, YU Chang, ZHANG Ji-yang, et al. Application of analytic hierarchy process in comprehensive evaluation of island microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(3): 133-137.
- [15] 李晓辉, 张来, 李小宇, 等. 基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 57-61.
LI Xiao-hui, ZHANG Lai, LI Xiao-yu, et al. The research on the evaluation system for existing network based on analytic hierarchy process and Delphi method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 57-61.
- [16] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[C] // Proc of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conf, Paris, 2000: 849-858.
- [17] 冯士刚, 艾芊, 王伟华, 等. 基于伪并行 NSGA-II 算法的火电站多目标负荷调度[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 421-425.
FENG Shi-gang, AI Qian, XU Wei-hua, et al. Multi-objective load dispatch of power plant based on pseudo parallel NSGA-II algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(3): 421-425.
- [18] PAPATHANASSIOU S, HATZIARGYRIOU N, STRUNZ K. A benchmark LV microgrid for steady state and transient analysis[C] // Proceedings of the Cigre Symposium on Power Systems with Dispersed Generation", Athens, April, 2005.
- [19] 关志华, 寇纪淞, 李敏强. 基于模糊偏好的多目标进化优化算法[J]. 天津大学学报, 2002, 35(3): 275-280.
GUAN Zhi-hua, KOU Ji-song, LI Min-qiang. An evolutionary multiobjective optimization algorithm based on fuzzy preferences[J]. Journal of Tianjin University, 2002, 35(3): 275-280.

收稿日期: 2014-02-17; 修回日期: 2014-05-21

作者简介:

赵媛媛 (1989-), 女, 工学硕士, 主要从事多微网协调与控制, 分布式电源规划, PMU 运行与规划等方面的研究工作; E-mail: zhaoyuanyuanone111@163.com

艾芊 (1969-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统状态认知, 微电网技术等方面的研究工作;

余志文 (1988-), 男, 博士研究生, 主要从事微网控制方面的研究工作。