

基于改进 NSGA-II 算法的微网交互式多目标优化

张福民^{1,2}, 崔海波^{1,2}, 李占凯^{1,2}, 姜含^{1,2}, 马晨阳^{1,2}, 刘明亮^{1,2}

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津 300130

2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学), 天津 300130)

摘要: 针对微网在不同时间段运行期望的不同, 提出了一种基于改进 NSGA-II 算法的微网交互式多目标优化策略。建立以运行成本和污染物排放量为优化目标的优化模型, 将全天的能量管理问题以每小时为尺度分为 24 个相互关联的优化子问题, 可以更为灵活地选择满足各时段运行期望的最优调度计划。为满足这 24 个优化子问题与全天优化目标间的耦合关系, 提出一种交互式搜索策略协调各小时储能系统的运行。通过改进 NSGA-II 算法获得每小时的 pareto 前沿, 并建立隶属函数从 pareto 前沿中选择出最理想的折衷解, 依次解决全天的优化问题。算例仿真验证了该优化模型和策略的有效性。

关键词: 微网; 改进 NSGA-II; 交互式搜索; 多目标优化; 能量管理

Interactive multi-objective optimization of microgrid based on improved NSGA-II algorithm

ZHANG Fumin^{1,2}, CUI Haibo^{1,2}, LI Zhankai^{1,2}, JIANG Han^{1,2}, MA Chenyang^{1,2}, LIU Mingliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology,

Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of

Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: According to the difference of operating expectations of microgrid at different periods, this paper proposes an interactive multi-objective optimization strategy of microgrid based on improved NSGA-II algorithm. An optimized model considering operation cost and emission as objectives is built, the problem is may virtually regarded as 24 associated hourly optimal energy management sub-problems to provide more flexibility for selecting hourly optimal scheduling plan. An interactive search strategy coordinates the operation of energy storage systems at each hour to implement the coupling relationship between 24 separate hourly optimal sub-problems and the all-day optimal objectives. Then through an improved NSGA-II algorithm, Pareto-optimal fronts of each hour in turn are obtained, and the membership function is established to select compromise solutions from the Pareto-optimal fronts. The example simulation shows that the optimization model and strategy are effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477040 and No. 51677052) and Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2015202263 and No. E2016202134).

Key words: microgrid; improved NSGA-II algorithm; interactive search strategy; multi-objective optimization; energy management

0 引言

微网将分布式电源(Distributed Generator, DG)、储能系统(Energy Storage System, ESS)和负荷整合成一个小型自治系统, 最大化挖掘了分布式电源的综合效益, 已成为智能电网领域的研究热点^[1-4]。随

着人们节能环保意识的逐渐增强, 实现微网经济性与环保性的综合优化已成为一种必然趋势, 因此需要通过合理的能量优化策略确定微电网内各单元的最佳调度方式, 达到微网安全、稳定、经济、节能的运行要求^[5-7]。

目前, 国内外已有大量研究微网优化调度的文献, 文献[8]针对包含柴油发电机、风机和电池储能系统的独立型微网, 以运行成本最小为优化目标, 建立了考虑系统网架结构特征的优化调度模型, 选取风功率削减因数、发电机节点电压、电池充放电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477040, 51677052); 河北省自然科学基金项目资助(E2015202263, E2016202134); 河北省科技计划项目资助(16211827)

功率以及功率变换器的无功补偿功率作为优化变量, 利用考虑潮流的遗传算法对模型进行求解。文献[9]针对微网中负荷特点建立了基于负荷分类的负荷水平对实时电价的响应模型并提出网内实时电价机制下的交直流混合微网优化运行模型。文献[10]提出一种计及运行风险及备用成本的含风电电力系统环境经济调度新模型。在目标函数中加入了系统运行风险指标和正、负旋转备用成本; 增加了系统可靠性约束条件, 确保了较低的系统运行风险, 并同时获取正、负旋转备用量。文献[11]针对光储微网中光伏输出和负荷需求的不确定性, 提出一种鲁棒后悔度优化方法。动态非均匀划分调度时段以降低模型求解复杂度, 同时采用拉格朗日两段松弛和交叉熵混合求解算法求解优化调度模型。以上研究普遍将一天 24 个小时视为一个整体进行能量优化调度, 以全天微网的运行成本和环境效益为优化目标, 然而当各个时间段微网具有不同的优化期望时, 优化结果往往不能反映系统实际的运行需求^[12-16]。

针对以上问题, 本文提出了一种基于改进 NSGA-II 算法的微网交互式多目标优化策略。优化模型以运行成本、污染物排放量为优化目标, 将全天分为 24 个时间段, 以每小时为单位对微网进行能量管理。改进 NSGA-II 算法中引入了混沌方法, 增加了种群的多样性以及向真实 Pareto 前沿的趋近性, 并建立隶属函数从 pareto 最优解集中选择出最理想的折衷解。为满足每小时 ESS 运行计划与全天 ESS 始末状态平衡约束间的耦合关系, 在改进 NSGA-II 算法的基础上提出一种交互式搜索策略协调各时间段 ESS 的运行, 并得到 24 个小时各时段的 Pareto 前沿, 从中选择出满足各小时不同期望的折衷解。算例分析结果表明, 该优化策略很好地实现了各时间段不同的运行期望, 与以往优化策略相比, 具有更好的灵活性。

1 多目标优化模型

1.1 目标函数

优化模型以每小时内微网运行成本和污染物排放最小为目标。运行成本(F_1)和污染物排放(F_2)如下式所示。

$$F_1(t) = \sum_{i=1}^{N_G} C_{Gi} P_{Gi}(t) + \sum_{j=1}^{N_S} C_{Sj} P_{Sj}(t) + C_{grid}(t) P_{grid}(t) \quad (1)$$

$$F_2(t) = \sum_{i=1}^{N_G} E_{Gi} P_{Gi}(t) + \sum_{j=1}^{N_S} E_{Sj} P_{Sj}(t) + E_{grid} P_{grid}(t) \quad (2)$$

式中: $P_{Gi}(t)$ 表示 t 时刻第 i 个 DG 有功功率; $P_{Sj}(t)$ 表示 t 时刻第 j 个 ESS 的有功功率; $P_{grid}(t)$ 表示 t 时

刻微网与大电网交换的功率; C_{Gi} 表示第 i 个 DG 每小时的运行费用; C_{Sj} 表示第 j 个 ESS 每小时的运行费用; $C_{grid}(t)$ 表示向大电网购电的实时电价; E_{Gi} 、 E_{Sj} 和 E_{grid} 分别表示 DG、ESS 以及微网与电网能量交换排放 SO_2 、 CO_2 、 NO_x 的总和。

1.2 约束条件

每小时优化问题的约束条件包括功率平衡约束、DG 功率约束、DG 爬坡率约束和 ESS 约束等。

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}(t) + \sum_{j=1}^{N_S} P_{Sj}(t) + P_{grid}(t) = P_{Load}(t) + P_{loss}(t) \quad (3)$$

式中: $P_{Load}(t)$ 表示 t 时刻系统负荷; $P_{loss}(t)$ 表示 t 时刻微网网损。

(2) DG 功率约束

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi}(t) \leq P_{Gi,max} \quad i=1, 2, \dots, N_G \quad (4)$$

式中, $P_{Gi,max}$ 与 $P_{Gi,min}$ 分别表示第 i 个 DG 机组出力的上下限。

(3) 与上级电网的功率交换约束

$$|P_{grid}(t)| \leq P_{grid,max} \quad (5)$$

式中, $P_{grid,max}$ 表示微网与上级电网之间交换功率的上限。

(4) DG 爬坡率约束为

$$\begin{cases} P_{Gi}(t) - P_{Gi}(t-1) \leq UR_{Gi} \\ P_{Gi}(t-1) - P_{Gi}(t) \leq DR_{Gi} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N_G \quad (6)$$

式中: UR_{Gi} 与 DR_{Gi} 分别表示第 i 个 DG 出力变化率的上升率和下降率限制。

(5) ESS 充/放电最大功率约束

$$P_{Sj,min} \leq P_{Sj}(t) \leq P_{Sj,max} \quad j=1, 2, \dots, N_S \quad (7)$$

式中, $P_{Sj,min}$ 与 $P_{Sj,max}$ 分别表示第 j 个 ESS 充/放电限制。

(6) ESS 剩余容量约束

$$C_{Sj,min} \leq C_{Sj} \leq C_{Sj,max} \quad j=1, 2, \dots, N_S \quad (8)$$

式中: $C_{Sj}(t)$ 表示第 j 个 ESS 在第 t 小时结束时的剩余容量; $C_{Sj,max}$ 与 $C_{Sj,min}$ 分别表示第 j 个 ESS 剩余容量的上下限。与 t 的关系为

$$C_{Sj}(t) = C_{Sj,in} - \sum_{k=1}^t R_{Sj}(k) \quad j=1, 2, \dots, N_S \quad (9)$$

$$R_{Sj}(k) = \begin{cases} P_{Sj}(k) \eta_{chj} & P_{Sj}(t) \leq 0 \\ P_{Sj}(k) / \eta_{disj} & P_{Sj}(t) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: η_{chj} 与 η_{disj} 分别表示第 j 个 ESS 的充/放电效率; $C_{Sj,in}$ 表示第 j 个 ESS 的初始剩余容量; $R_{Sj}(k)$ 表示第 j 个 ESS 在第 k 个小时的剩余容量变化量。

(7) ESS 全天始末状态平衡约束

$$|C_{Sj}(24) - C_{Sj,in}| < \varepsilon \quad j=1, 2, \dots, N_s \quad (11)$$

式中, ε 是一个非常小的值(接近于零), 由决策者设定。每个 ESS 在完成一天调度任务时的剩余容量应等于初始时的剩余容量, 为第二天的调度做准备。

2 交互式管理策略

将全天的能量优化问题以每小时为尺度分成 24 个优化子问题, 可以更为灵活地选取符合期望的运行计划, 然而由于 ESS 每小时运行计划与全天 ESS 始末状态平衡约束之间的联系性, 使得这 24 个优化子问题的解决是相互影响的。考虑到这些微网运行约束的耦合性, 本文提出一种交互式搜索策略来搜索符合系统优化期望的最优运行计划。

2.1 HOD 图与 HRC 图的设置

根据功率预测信息和经验, 将一天 24 个小时按 ESS 放电功率降序排列, 将充电视为放电的负数, 得到放电时间优先序列 $T_h (h=1, 2, \dots, 24)$, 例如在 12 时取最大放电功率, 表示为 $T_1=12$ 。 T_h 可以参考文献[17]中模糊控制方法进行确定, 将各小时的放电优先级视为语言变量, 对应的模糊子集为 {PB(最高), PM(较高), ZO(适中), NM(较低), NB(最低)}, 各小时按优先级由高到低排列即可得到 T_h 。

每小时的放电功率在序列 T_h 上是一个递减函数, 用公式(12)所示解析函数来表示这个递减函数, 横轴表示时间优先序列 T_h , 纵轴表示放电功率, 所得到的曲线称为 HOD(Hourly Ordered Discharging) 曲线。为满足公式(11)的约束, 必须保证一天内的净放电电量值在 $[-\varepsilon, \varepsilon]$ 内, 所以 HOD 曲线与横轴所围净面积必须在 $[-\varepsilon, \varepsilon]$ 内。

根据 HOD 图数据, 将横坐标表示为按正常顺序排列的时间序列, 纵轴表示 ESS 剩余容量, 即可得到 HRC(Hourly Residual Capacity) 曲线, 用来监视 ESS 剩余容量的约束(8), 整个 HRC 曲线必须保持在 $C=C_{Sj,min}$ 与 $C=C_{Sj,max}$ 两条水平线之间。

如式(12)所示是一个双曲正切解析函数, 需要为式(12)设置合适的参数值以得到满足要求的 HOD 曲线:

$$f(T_h) = \begin{cases} -0.5[\tanh(\alpha(h-c-\beta))-1] \cdot P_{S,max} / \eta_{dis} & h \leq b \\ -0.5[\tanh(\alpha(h+c+\beta-24))+1] \cdot P_{S,max} \cdot \eta_{ch} & h > b+1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $c=0.5(b+1)$, 参数 b 表示放电和充电的边界点; α, β 是曲率参数。假定 $P_{S,max}=30$, $\eta_{ch}=\eta_{dis}=0.9$, 改变参数设置可以改变曲线形状, 以描绘 ESS 各种不同的充/放电计划。如图 1 所示, 曲线的曲率受 α 和 β 的影响, b 是放电曲线和充电曲线的边界点, 当

$b=14$ 时, 整个曲线将不再对称, b 的值越大, 就会有更多的小时工作在高充电功率状态。

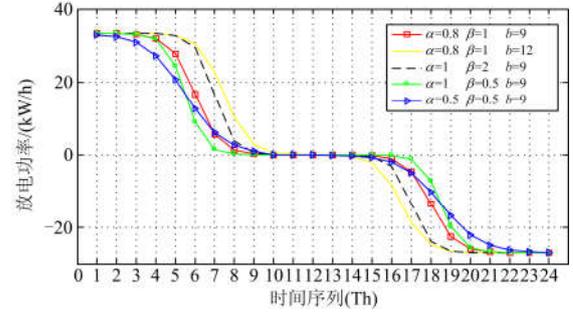


图 1 HOD 图

Fig. 1 HOD graph

2.2 交互式搜索流程

交互式搜索过程如图 2 所示, 首先为式(12)设置初始参数并开始搜索满足式(11)约束条件的合适参数; 通过 HOD 图生成 HRC 图并检测约束条件(8), 如果满足约束条件, HOD 图即表示为候选 ESS 充/放电计划, 否则重新调整 HOD 图的参数, 直到搜索到满足要求的候选 ESS 充/放电计划。依据候选充/放电计划以及式(1)一式(6)利用多目标优化算法依次

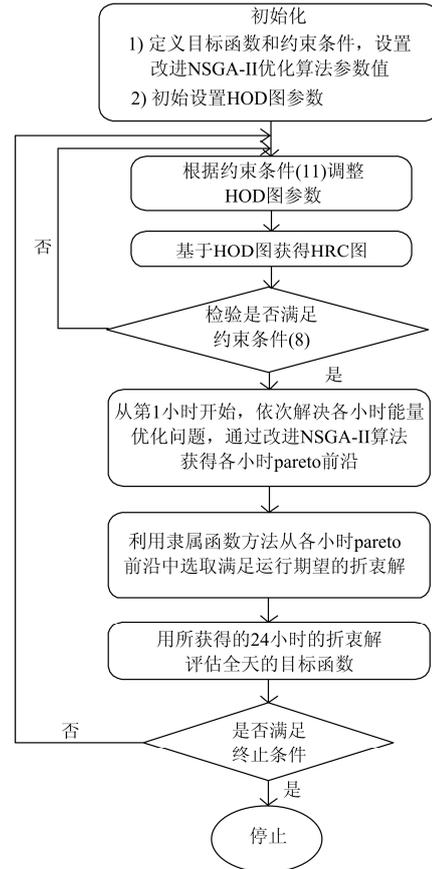


图 2 交互式搜索过程

Fig. 2 Interactive process

求解各小时的 pareto 前沿, 再从各小时的 pareto 前沿中选取合适的折衷解, 依次解决各小时的优化问题。

为满足公式(6)中分布式电源爬坡率约束, 选取第 1 小时作为起始点, 从这个小时开始依次解决每小时的优化管理问题, 直到第 24 小时为止, 考虑第 1 小时的优化管理问题时, 需参考前一天第 24 小时的布式电源的运行状况。最后, 计算全天总共的运行成本和污染排放量, 检查是否满足终止条件, 如果不满足则返回搜索循环。

3 改进 NSGA-II 算法

本文的优化问题属于带约束的非线性多目标优化问题, 是由相互冲突和影响的多个目标组成, 没有一个最优解能使所有目标同时达到最优, 往往只能尽可能多地求得其 Pareto 最优解。由于遗传算法全局收敛性高、处理问题时灵活和通用性高等优点, 本文选择 NSGA-II 算法求解本文的多目标优化问题^[18-20], 但是随着迭代次数的增加, 该算法有可能由于新个体的减少导致种群缺乏多样性而陷入局部最优, 本文利用混沌方法对 NSGA-II 算法进行了改进, 以提高种群的多样性和算法的收敛速度。

3.1 混沌初始化

Logistic 映射形式简单, 但却表现出了复杂的动态性能。其映射方程为

$$x_{i+1} = rx_i(1-x_i) \quad x_i \in (0,1) \quad (13)$$

式中, $r=4$ 。此时 Logistic 映射处于混沌状态, 且输入值和输出值都在(0,1)区间, 称为满映射。

利用混沌序列 $\{x_i\}$ 对种群进行初始化

$$Z_i^j = A^j + (B^j - A^j)x_i^j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中, A^j 、 B^j 分别为优化变量 Z_i^j 的上下限, 设优化变量的个数为 n 个, 总共生成个数为 N 的初始种群。

3.2 局部混沌搜索

在 NSGA-II 算法中, 对一部分精英个体进行局部混沌搜索, 使其更快地趋向 pareto 前沿。对于每个个体, 可用下式产生局部搜索个体。

$$x_q^j = x_p^j + \sigma(B^j - A^j)(2L^k - 1) \quad (15)$$

式中: L^k 为 Logistic 映射产生的混沌序列; 每个进行局部混沌搜索的精英个体一次产生 20 个新个体, 新个体 x_q^j 分散在原个体 x_p^j 的邻近搜索空间内; σ 随迭代次数改变, 保证精英个体的邻近搜索空间随代数增加而逐步减小, 取值为 $1/\lambda$ (λ 为当前代数)。

3.3 改进 NSGA-II 算法流程

1) 采用式(14)生成初始父代种群 P_0 , P_0 中包含 N 个个体, 并利用 NSGA-II 算法的快速非支配排序

方法和个体拥挤度对 P_0 进行排序。

2) 利用二进制锦标赛法从父代种群 P_t 中选择个体, 并采用正态分布交叉算子和多项式变异算子进行交叉和变异操作, 产生子代种群 Q_t 。

3) 为增加种群多样性, 利用式(14)加入 $N/5$ 个新的混沌个体 R_t , 合并 P_t 、 Q_t 和 R_t 产生混合种群 $S_t = P_t \cup Q_t \cup R_t$, 对 S_t 进行非支配排序, 并通过精英保留策略和排挤方法选出 N 个个体, 组成新的父代种群 P_{t+1} 。

4) 对 P_{t+1} 中排序靠前的 10% 精英个体利用公式(15)进行局部混沌搜索, 如果新产生的个体比原精英个体更优, 则替换原精英个体形成下一代父代种群 P_{t+1} 。

5) 重复循环步骤(2)一步骤(4), 直到满足终止条件。

3.4 隶属函数

为准确地从每小时 pareto 最优解中选取满足微网运行期望的折衷解, 为每个目标函数建立以下隶属函数。

$$\mu_i(m) = \begin{cases} 1 & F_i(m) \leq \delta_i \\ \frac{F_{i_{\max}} - F_i(m)}{F_{i_{\max}} - \delta_i} & \delta_i < F_i(m) < F_{i_{\max}} \\ 0 & F_{i_{\max}} \leq F_i(m) \end{cases} \quad (16)$$

$$i = 1, 2 \quad \text{and} \quad m = 1, 2, \dots, M_d$$

$$\delta_i = F_{i_{\max}} - \theta_i(F_{i_{\max}} - F_{i_{\min}}) \quad 0 \leq \theta_i \leq 1 \quad (17)$$

式中: $F_{1_{\max}}$ 、 $F_{1_{\min}}$ 和 $F_{2_{\max}}$ 、 $F_{2_{\min}}$ 分别为两个目标函数的最大值和最小值; M_d 表示 pareto 最优解中候选解的个数; μ_i 表示每个解对应每个目标函数的隶属值。

依据微网在各个小时不同的运行期望确定 θ_i 的值, θ_i 的大小将会影响折衷解的选择。当设置 $\theta_1=1$, $\theta_2=0$ 时, 将选取运行成本最小的折衷解; 当设置 $\theta_1=0$, $\theta_2=1$ 时, 将选取污染物排放最小的折衷解; 当设置 $\theta_1=1$, $\theta_2=1$ 时, 将选取运行成本和污染排放互相平衡的折衷解。

$$\mu_T(m) = \frac{\mu_1(m) + \mu_2(m)}{\sum_{j=1}^{M_d} (\mu_1(j) + \mu_2(j))} \quad m = 1, 2, \dots, M_d \quad (18)$$

式(15)为两个隶属函数的聚合函数, 计算 pareto 最优解中每个候选解的 μ_T 值, 最终选取 μ_T 值最大的候选解为这个小时的折衷解。

4 算例分析

为验证所提能量优化模型和策略的有效性, 采

用图 3 所示微网结构进行算例分析,并在 Matlab 环境下编写程序进行仿真。

4.1 微网结构

微网包括微型燃气轮机(MT), 燃料电池(FC), 光伏电池(PV)和风机(WT)四种分布式电源, 并采用蓄电池(SB)作为微网的储能系统。微网电压水平为 0.4 kV, 线路采用 LJ-16 铝绞线, $R=1.98 \Omega/\text{km}$, $X=0.358 \Omega/\text{km}$ 。微网运行在并网模式, 且微网与主网的交换功率的上限为 30 kW。

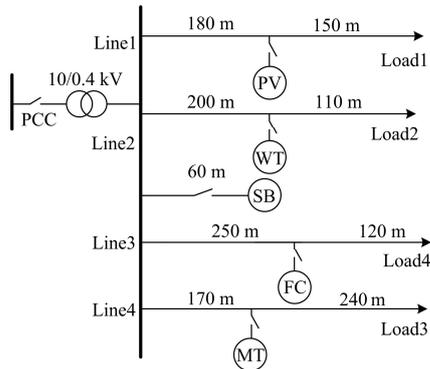


图 3 微网结构

Fig. 3 Structure of microgrid

4.2 基础数据

各分布式参数和污染物排放如表 1 和表 2 所示。

表 1 分布式电源参数

Table 1 Parameters of DGs

| 微电源 | 容量下限/kW | 容量上限/kW | 运行维护费用/(元/kWh) |
|-----|---------|---------|----------------|
| MT | 6 | 30 | 0.104 |
| PV | 0 | 25 | 0.112 |
| WT | 0 | 15 | 0.225 |
| FC | 3 | 30 | 0.053 |
| SB | -30 | 30 | 0.062 |

表 2 分布式电源污染物排放量

Table 2 Emissions of DGs

| 微电源 | CO ₂ / (kg/MWh) | SO ₂ / (kg/MWh) | NO _x / (kg/MWh) |
|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| MT | 720 | 0.003 6 | 0.1 |
| PV | 0 | 0 | 0 |
| WT | 0 | 0 | 0 |
| FC | 460 | 0.003 | 0.007 |
| SB | 10 | 0.000 2 | 0.001 |

负荷功率如图 4 所示, 各种负荷的功率因数都取 0.85, 太阳能和风能的预测出力如图 5 所示, 分时电价如图 6 所示。

4.3 优化结果

假定算例中蓄电池的最大容量为 300 kWh, 初始荷电状态为 120 kWh, 荷电状态的最大值为电池

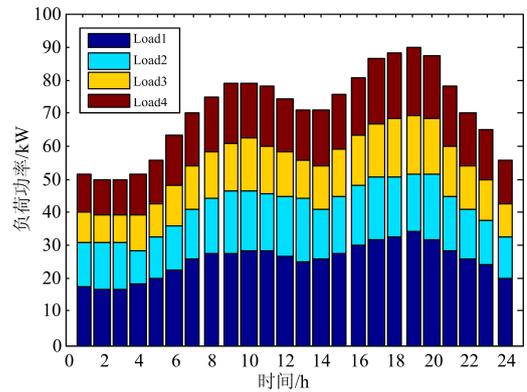


图 4 负荷功率

Fig. 4 Power of load

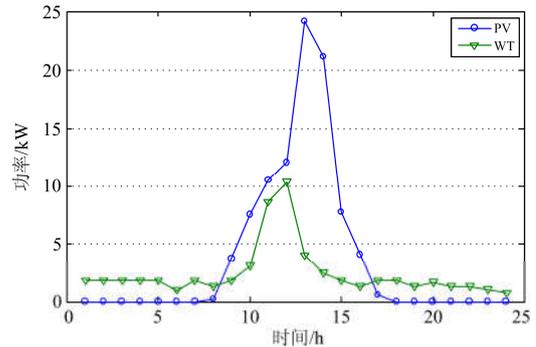


图 5 光伏和风机的预测出力

Fig. 5 WT and PV power productions

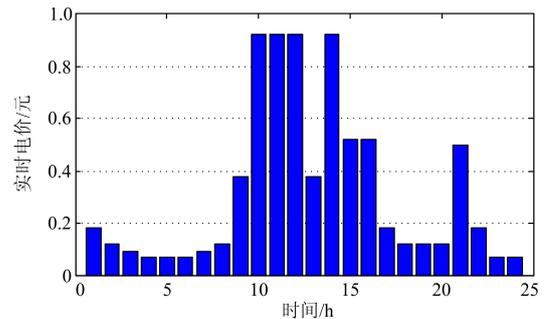


图 6 实时电价

Fig. 6 Real time electricity price

容量的 100%, 最小值为电池容量的 20%。MT 的出力变化率的上升率 U_{RG} 限制在区间(9,12)内, 下降率 D_{RG} 限制在区间(-12,-9)内。微网系统的运行期望倾向于 10—12 时和 19—20 时系统处于低污染排放状态, 13 时与 18 时系统处于运行成本与污染排放量相互平衡状态, 其余时间系统处于低运行成本状态。由于较高的购电价格, 10—12 时和 14 时处于低购电量状态。根据充分的预测信息和经验, 确定 ESS 的放电时间优先序列为 $T_h\{10-12,18,20,19,14-$

16,9,13,21,8,17,22,7,23,6,24,5,4,3,2,1}, 其中, 1—7,23 和 24 时负荷需求较低, 电池处于充电状态。在图 2 所示交互式搜索循环中, 设置参数的搜索范围 $0.5 \leq \alpha \leq 6, 1 \leq \beta \leq 3, 9 \leq b \leq 12$ 。当 $\alpha=0.5, \beta_1=2.1, b=10$ 时满足要求, 搜索循环终止, 所获得的 HOD 图和 HRC 图如图 7 所示。

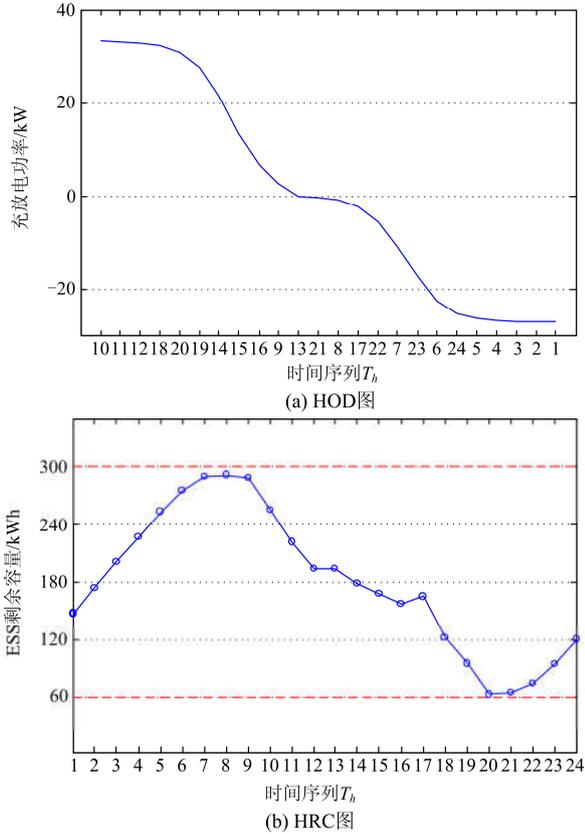


图 7 HOD 和 HRC 图

Fig. 7 HOD graph and HRC graph

在交互式搜索过程中, 利用改进 NSGA-II 算法获得每小时的 Pareto 前沿, 改进 NSGA-II 算法采用实数编码, 种群大小为 500, 遗传代数数为 3 000, 根据不同时间段微网运行期望的不同, 10—12 时和 19—20 时设置 $\theta_1=0, \theta_2=1$; 13 时与 18 时, 设置 $\theta_1=1, \theta_2=1$; 其余时间段, 设置 $\theta_1=1, \theta_2=0$ 。依次解决各小时的优化问题。6:00、11:00 和 13:00 时所求得 Pareto 前沿及折衷解的选取如图 8 所示, 可以看出, 基于混沌方法的改进 NSGA-II 算法增加了种群的多样性, 并且更加趋向于真实 Pareto 前沿。

图 9 为两种优化策略下的优化结果的比较, 策略 1 为本文所提交交互式优化策略, 全天运行成本为 253.81 元, 污染物排放量为 658.87 kg; 策略 2 为以全天为优化尺度的优化策略, 全天运行成本为 251.28 元, 污染排物排放量为 674.71 kg。可以看出, 在优化水

平相当的情况下, 策略 1 可以更好地满足微网 10—12 和 19—20 时低污染物排放量的运行期望。

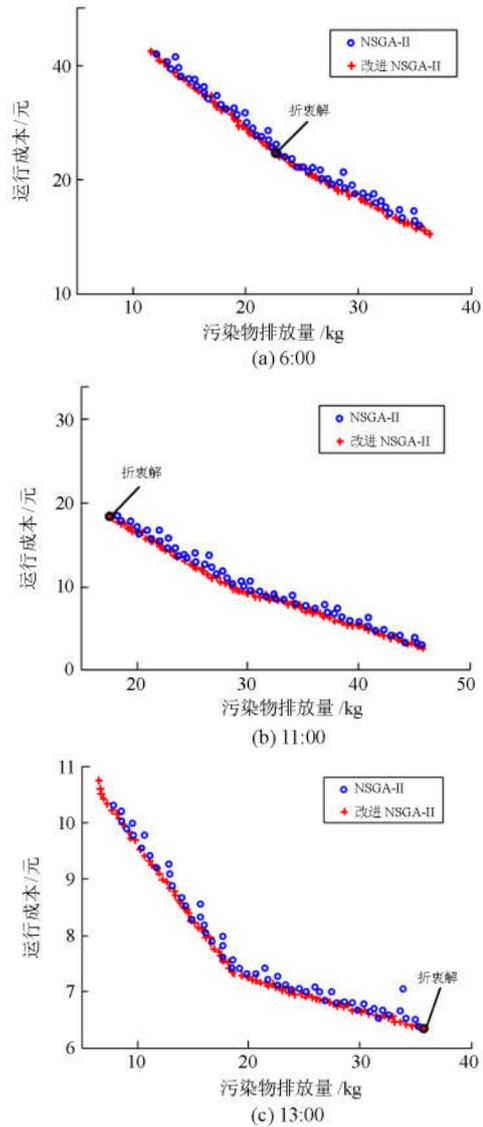
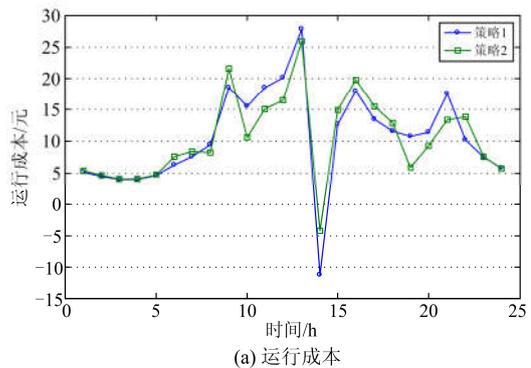


图 8 6:00、11:00、13:00 的 Pareto 前沿及折衷解
Fig. 8 Pareto-optimal fronts and compromise solutions obtained by (a)6:00 (b)11:00 (c)13:00



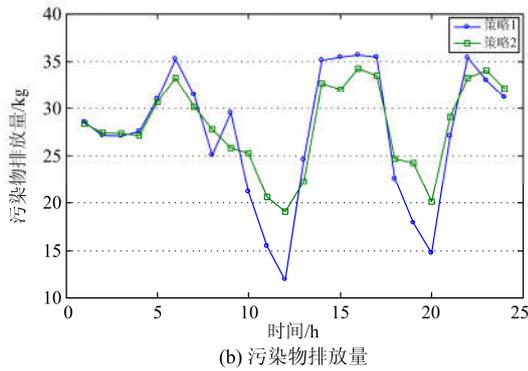


图 9 两种优化策略下的优化结果

Fig. 9 Optimal results with two different optimization strategies

交互式优化策略下各分布式电源的输出曲线如图 10 所示。

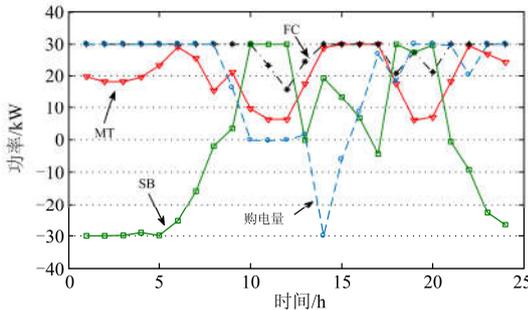


图 10 各分布式电源输出曲线

Fig. 10 Output power curves of each DG

5 结论

本文提出一种基于改进 NSGA-II 算法的交互式微网多目标优化策略，建立了以微网运行成本和污染物排放量为优化目标的多目标优化模型；将全天分为 24 个时间段，以每小时为单位对微网进行能量优化。改进 NSGA-II 算法引入了混沌方法，增加了种群的多样性，并且更好地向真实 pareto 前沿收敛。交互式搜索策略很好地协调了各时间段各种 DG 的运行，实现了对运行成本和污染物排放量的灵活优化。算例结果表明，该优化策略可以更好地满足微网在各时间段不同的运行期望。

参考文献

[1] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 6-11.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 6-11.

[2] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.

HUANG Wei, SUN Xuhui, WU Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18.

[3] HU B, WANG H, YAO S. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling device[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.

[4] 刘文, 杨慧霞, 祝斌, 等. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin, et al. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.

[5] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.

[6] 田梁玉, 唐忠, 焦婷, 等. 基于多目标评判法的微电网经济性指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 122-127.
TIAN Liangyu, TANG Zhong, JIAO Ting, et al. Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 122-127.

[7] LI H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

[8] 张德举, 郭力, 王成山. 高风电渗透率下的独立型微网优化调度方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 1-7.
ZHANG Deju, GUO Li, WANG Chengshan. Optimal dispatching method of isolated microgrids with high wind power penetration rate[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(9): 1-7.

[9] 陈安伟, 华浩瑞, 李鹏, 等. 实时电价机制下交直流混合微网优化运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 13-20.
CHEN Anwei, HUA Haorui, LI Peng, et al. Optimal operation of AC/DC hybrid micro-grid based on real-time price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 13-20.

[10] 杨家然, 王兴成, 隋林涛, 等. 采用混合智能算法的含风电电力系统多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 21-27.
YANG Jiaran, WANG Xingcheng, SUI Lintao, et al. Multi-objective optimal scheduling of wind integrated

- power systems with hybrid intelligent algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 21-27.
- [11] 王刚, 孙文健, 李歧强, 等. 基于鲁棒后悔度的光储微网优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 106-111.
WANG Gang, SUN Wenjian, LI Qiqiang, et al. Robust regret optimal scheduling of microgrid with PV and battery[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 106-111.
- [12] 孙宇军, 李扬, 王蓓蓓, 等. 计及不确定性需求响应的日前调度计划模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2708-2714.
SUN Yujun, LI Yang, WANG Beibei, et al. A day-ahead scheduling model considering demand response and its uncertainty[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2708-2714.
- [13] 王成山, 洪博文, 郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1775-1782.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1775-1782.
- [14] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 196-201.
CHEN Changsong, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Microgrid energy management model based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 196-201.
- [15] 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 Ruiqi, LI Ke, ZHANG Chenghui. Optimization allocation of microgrid capacity based on chaotic multiobjective genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 16-22.
- [16] 刘方, 杨秀. 分时电价下考虑预测偏差的微网经济运行[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 65-70.
LIU Fang, YANG Xiu. TOU-based micro-grid economic operation considering the prediction error[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 65-70.
- [17] 刘迎澍, 康伟娇. 基于模糊控制的光储微网系统能量管理策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 97-102.
LIU Yingshu, KANG Weijiao. Fuzzy control based energy management strategy for microgrid system with photovoltaic and energy storage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(1): 97-102.
- [18] 姜惠兰, 安星, 王亚微, 等. 基于改进 NSGA2 算法的考虑风机接入电能质量的多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5405-5411.
JIANG Huilan, AN Xing, WANG Yawei, et al. Improved NSGA2 algorithm based multi-objective planning of power grid with wind farm considering power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5405-5411.
- [19] 朱志键, 王杰. 基于改进 NSGA-II 的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 176-183.
ZHU Zhijian, WANG Jie. Dynamic economic emission dispatch based on modified NSGA-II for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 176-183.
- [20] 张小龙, 周玲, 朱桃靓, 等. 基于粗糙集理论的分布式电源与配电网架多目标协调规划[J]. 陕西电力, 2016, 44(5): 9-14.
ZHANG Xiaolong, ZHOU Ling, ZHU Guangliang, et al. Multi-objective coordinated planning of dg & incorporating distribution network based on rough set theory[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(5): 9-14.

收稿日期: 2017-06-17; 修回日期: 2017-07-24

作者简介:

张福民(1965—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统无功潮流与优化、智能电网与新能源发电技术、柔性交流输电技术等; E-mail: zhangfumin4907@126.com

崔海波(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性交流输电技术、微电网。E-mail: 13821002962@163.com

(编辑 葛艳娜)