

基于 NSGA-II 的 ICS 算法微网多目标优化调度

张 军^{1,2}, 王红敏^{1,2}, 刘廷章³

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海电力大学, 上海 200090; 3. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 针对各分布式电源并入配电网后在环保、经济等方面带来的问题, 以综合运行成本和环境成本为优化目标建立了含风光互补发电的微网优化调度模型。针对模型的求解, 提出一种融合了快速非支配排序遗传算法和自适应布谷鸟算法的基于 NSGA-II 的 ICS 算法, 通过测试函数验证了算法的可行性。通过与不含风电和光电的优化调度方式的对比, 表明了微网的调度过程中考虑风光等可再生能源的正面影响, 有利于降低系统运行的总成本。仿真结果验证了模型的有效性和算法的先进性。

关键词: 微网; 风光互补; 多目标; NSGA-II 算法; 自适应布谷鸟算法

DOI: 10.12067/ATEEE1906020

文章编号: 1003-3076(2019)12-0019-09

中图分类号: TM73; TP301.6

1 引言

随着人们对能源问题与环境问题的日益关注, 传统发电模式的弊端逐渐显现, 分布式电源 (Distributed Generator, DG) 以其稳定性和灵活性等优点得到广泛应用。与此同时, 大规模不可控性风电和光电等分布式电源的并入将成为配电网规划与运行中的重要挑战, 其随机波动性在并网时对配电网产生的负面影响也更加突出^[1-3]。微网是由各种分布式电源、负荷及储能电池组成的系统, 可协调控制各种分布式电源, 为分布式电源的发展创造了良好的环境, 保证电能质量和系统稳定性^[4,5]。因此, 如何在满足不同时段负荷的条件下, 合理规划微网中各微源的出力, 优化微网的运行, 成为微网优化调度研究的热门问题^[6,7]。

目前, 针对微网经济优化调度的研究已取得一定的成果。文献[8]建立了以运行成本和环境污染物度为目标的微网优化模型, 采用鸟群算法进行求解。文献[9]综合考虑用户需求响应资源、可再生能源机组出力的不确定性, 构建了多能源微网日前调度模型, 分析了需求响应资源对系统调度的影响。但

以上文献在建立模型时, 均未考虑发电机组设备的投资折旧成本对微网优化的影响。文献[10]中考虑了系统中的直流负荷需求, 建立了可以同时满足交流负荷和直流负荷需求的交直流混合微网模型。文献[11]针对含有光伏电池、风机、燃料电池和储能电池的微网系统, 以总运行成本为优化目标建立了模型, 采用人工蜂群算法来求解。文献[12]在建立目标函数的过程中考虑到风光预测误差的影响, 利用差异进化算法进行优化。但上述文献在求解过程中将多目标优化问题转为单目标优化问题, 虽简化了求解过程, 却不利于决策者针对不同需求来选择合适的调度方案。文献[13]建立了最小发电成本、最小污染物治理成本的多目标优化模型, 并采用改进型非劣排序遗传算法进行求解, 并与遗传算法对比, 验证其有效性。文献[14]建立了考虑有功网损、投资成本和电压稳定性指标的微网多目标优化模型, 并将单亲遗传算法引入到快速非支配排序遗传算法 (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II) 中, 改进算法中的非劣分层算子, 提出了一种改进 NSGA-II 算法求解模型。上述文献中采用的算法均在非劣排序遗传算法的基础上进行改进,

收稿日期: 2019-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273190)、上海市电站自动化技术重点实验室资助项目(13DZ2273800)

作者简介: 张 军(1966-), 男, 内蒙古籍, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为复杂系统的过程优化控制、故障诊断(通讯作者);

王红敏(1994-), 女, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为微电网负荷的优化分配。

虽提高了算法的收敛速度,但并未改善算法本身存在的全局寻优能力不佳、易陷入局部最优值的缺点。

本文在综合考虑上述问题的基础上,建立了含有光伏电池(Photovoltaic, PV)、风机(Wind Turbine, WT)、微型燃气轮机(Micro-Turbine, MT)和燃料电池(Fuel Cell, FC)及储能电池(Energy Storage, ES)的含风光互补发电的微网调度模型。针对文献[13,14]存在的问题,提出一种融合了NSGA-II算法和自适应布谷鸟算法(Improved Cuckoo Search, ICS)的基于NSGA-II的ICS算法对多目标微网模型进行求解。利用布谷鸟算法(CS)中特有的Levy飞行机制避免算法陷入局部最优解,并引入自适应步长调整策略,提高算法的收敛速度,同时结合NSGA-II算法中的快速非支配排序策略及拥挤距离原则,满足求解多目标问题的要求。仿真结果与文献[13,14]中的算法相比,证明了本文算法具有更好的全局寻优能力和收敛速度。通过算例仿真验证了本文模型的有效性和算法的先进性。

2 微网系统及各单元模型

本文研究的微网系统主要包括光伏电池、风机、微型燃气轮机和燃料电池4种分布式电源及储能电池,公共连接(Public Connection, PCC)点与配电网连接,微网系统结构如图1所示。

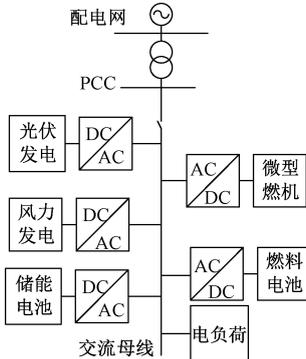


图1 微网系统结构
Fig.1 Microgrid system structure

2.1 微型燃气轮机

微型燃气轮机运行过程中产生的能耗成本如下:

$$C_{MT} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \frac{C_f P_{MT}(t)}{L \eta_{MT}} \quad (1)$$

$$\eta_{MT} = 0.0753 \left[\frac{P_{MT}(t)}{65} \right]^3 - 0.3095 \left[\frac{P_{MT}(t)}{65} \right]^2 + 0.4174 \frac{P_{MT}(t)}{65} + 0.1068 \quad (2)$$

式中, C_{MT} 为MT的燃料费用; C_f 为燃料单价(取3.88元/ m^3); η_{MT} 为MT的效率; $P_{MT}(t)$ 为 t 时段MT的输出功率; L 为天然气的低热值(取9.7(kW·h)/ m^3); T 为优化调度周期; N 为MT机组数目。

2.2 燃料电池

燃料电池运行过程中产生的能耗成本如下:

$$C_{FC} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^Q \frac{C_f P_{FC}(t)}{L \eta_{FC}} \quad (3)$$

式中, C_{FC} 为FC的燃料费用; η_{FC} 为FC的发电效率; $P_{FC}(t)$ 为 t 时段FC的输出功率; Q 为FC机组数目。

2.3 储能电池模型

储能电池的荷电状态(State Of Charge, SOC)变化仅与各分布式电源的出力情况、电负荷需求和上一时段SOC状态有关,数学模型为:

$$SOC(t) = SOC(t-1) - \frac{|P_{ES}(t)| \Delta t}{C_{ES} \eta_d} \quad (4)$$

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{|P_{ES}(t)| \Delta t \eta_c}{C_{ES}} \quad (5)$$

式中, $SOC(t)$ 为 t 时段ES的荷电状态; $P_{ES}(t)$ 为 t 时段ES的充电/放电功率,当 $P_{ES}(t)$ 为正值时,为ES的放电功率,反之,则为充电功率。 C_{ES} 为电池的容量; η_d 、 η_c 分别为ES的放电、充电效率; Δt 为时间间隔。

3 微网多目标优化调度模型的构建

3.1 目标函数

综合考虑微网在经济、环保等方面的需求,通过合理规划各分布式电源的出力,使微网的经济、环保效益达到最大。

(1) 综合运行成本

微网在并网时可与大电网进行电能交易,所以微网的综合运行成本包含燃料成本、投资折旧成本、各发电机组设备的运行维护成本以及与大电网交易产生的费用。数学模型如下:

$$\begin{cases} \min f_1 = C_F + C_D + C_M + C_g \\ C_F = C_{MT} + C_{FC} \\ C_M = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K P_k(t) k_{me,k} \\ C_D = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\frac{c_k}{8760 f_k} \frac{r(1+r)^l}{(1+r)^l - 1} P_k(t) \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中, C_F 、 C_D 、 C_M 、 C_g 分别为微网综合运行成本中的燃料成本、投资折旧成本、设备维护成本、与大电网交易成本; c_k 为分布式电源 k 的安装成本; f_k 为分布式电

源 k 的容量因数; K 为分布式电源的种类数目; r 为年利率; l 为寿命年限; $k_{m,e,k}$ 为各分布式电源的设备维护成本系数; P_k 为分布式电源 k 输出功率。

与大电网交易成本:

$$\begin{cases} C_g = \sum_{t=1}^T [C_{\text{buy}}(t) - C_{\text{sel}}(t)] \\ C_{\text{buy}}(t) = e_{\text{buy}}(t)P_{\text{buy}}(t) \\ C_{\text{sel}}(t) = e_{\text{sel}}(t)P_{\text{sel}}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $C_{\text{buy}}(t)$ 、 $C_{\text{sel}}(t)$ 分别为微网在 t 时段向大电网购电、售电产生的成本; $e_{\text{buy}}(t)$ 、 $e_{\text{sel}}(t)$ 分别为微网在 t 时段向大电网购电、售电的电价; $P_{\text{buy}}(t)$ 、 $P_{\text{sel}}(t)$ 分别为 t 时段微网向大电网的购电、售电功率。

(2) 环境成本

微网中存在部分分布式电源在运行过程中会排放污染气体,其污染程度可用环境成本指标来衡量。由于光伏发电和风力发电在运行过程中不消耗燃料也不产生污染气体,二者均无环境成本。故环境成本仅在微型燃气轮机和燃料电池运行发电以及与大电网交易的过程中产生。产生的污染气体主要有三种: CO_2 、 SO_2 、 NO_x 。具体的环境成本计算如下所示:

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J [\xi_j a_{ij} P_i(t)] + \sum_{j=1}^J [\xi_j b_j P_{\text{buy}}(t)] \right\} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]$$

式中, ξ_j 为第 j 种污染气体 (CO_2 、 SO_2 、 NO_x) 对环境的污染系数; M 为排放污染气体的 DG 种类数目; J 为污染气体的种类数目; $P_i(t)$ 为 t 时段第 i 种分布式电源发出的功率; \mathbf{A} 为各 DG 排放系数矩阵, a_{ij} 为第 j 种污染气体在分布式电源 i 运行时的排放系数; \mathbf{B} 为大电网发电过程中各种污染气体的排放系数矩阵, b_j 为第 j 种污染气体在大电网发电过程中的排放系数。

3.2 主要约束条件

(1) DG 出力约束

$$P_{k,\min} \leq P_k \leq P_{k,\max} \quad (9)$$

式中, $P_{k,\max}$ 、 $P_{k,\min}$ 分别为第 k 种分布式电源的出力上、下限。

(2) 功率平衡约束

$$\sum_{k=1}^K P_k(t) + P_{\text{GRID}}(t) + P_{\text{ES}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (10)$$

式(10)为 t 时段的功率平衡约束, P_k 为第 k 种分布式电源的输出功率; P_{GRID} 为向大电网购买的电功率; P_{ES} 为储能电池的放电功率; P_{load} 为总负荷需求。

(3) 与大电网交易功率约束

$$P_{\text{GRID},\min} \leq P_{\text{GRID}} \leq P_{\text{GRID},\max} \quad (11)$$

式中, $P_{\text{GRID},\max}$ 、 $P_{\text{GRID},\min}$ 分别为微网与大电网间允许交换的最大、最小功率约束。

(4) 储能电池充放电约束

$$\begin{cases} P_{\text{ES},\min} \leq P_{\text{ES}} \leq P_{\text{ES},\max} \\ SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \\ SOC_0 = SOC_{\text{end}} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)为 ES 的充放电功率约束和电荷变化约束, $P_{\text{ES},\max}$ 、 $P_{\text{ES},\min}$ 分别为储能电池充放电时的最大、最小功率; SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 为 ES 的电荷变化的最小、最大值; SOC_0 、 SOC_{end} 分别为一个周期内 ES 电荷的初始状态和结束状态。

4 基于 NSGA-II 的 ICS 算法

本文提出的日前优化调度模型本质上是一个多目标、多约束、多变量的混合优化问题。传统的布谷鸟算法不能满足其要求,因此,需要与 NSGA-II 算法中的快速非支配排序策略及拥挤距离原则相结合,再引入自适应步长调整策略,在满足求解多目标问题的同时,又具有良好的收敛速度。

4.1 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法是迄今为止用于求解多目标优化问题最为广泛的算法之一。其优点在于,通过快速非支配排序策略搜索靠近 Pareto 前沿的解,并采用拥挤距离原则来保证非劣解集的多样性和均匀性。

在多目标问题求解过程中,为降低计算的复杂度,需要对每次迭代得到的非劣解集归档,而外部档案大小是一定的,当外部档案规模大于最大规模时,需要对外部档案进行缩减。在保持解集的多样性和均匀性前提下,采用 NSGA-II 算法中的快速非支配排序策略和拥挤距离原则来对外部档案进行缩减。首先,确定非劣解集中所有解的相互支配关系,将非支配解取出并放入支配层数为 0 的集合;再确定剩余解之间的支配关系,并将非支配解放入支配层数为 1 的集合,重复以上步骤直至种群全部分层。然后计算所有非支配解的拥挤距离,在层内按照拥挤

距离进行排序;为保证种群多样性,在层数相同情况下,保留拥挤距离较大的解,从而筛选出符合要求的非劣解集。非支配排序层级划分示意图2所示。

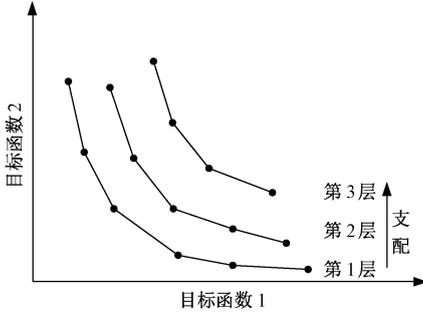


图2 非支配排序层级划分

Fig. 2 Non-dominated sorting hierarchy

个体拥挤距离的计算公式为:

$$\begin{cases} d(i) = \sum_{q=1}^{N_q} d(i, q) \\ d(i, q) = (f_{i+1, q} - f_{i-1, q}) / (f_{q, \max} - f_{q, \min}) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $d(i)$ 为个体 i 的拥挤距离; $d(i, q)$ 为个体 i 在目标分量 q 下的拥挤距离; N_q 为目标分量的数目; $f_{i, q}$ 为个体 i 在目标分量 q 下的函数值; $f_{q, \max}$ 、 $f_{q, \min}$ 分别为在目标分量 q 下的最大、最小值。

4.2 ICS 算法

布谷鸟搜索算法是由 Yang 和 Deb 于 2009 年开发的自然启发式算法,具有选用参数少、搜索路径优、寻优能力强等优点^[15,16]。同时其特有的 Levy 飞行机制能有效地使算法避免陷入局部最优解,保证了全局性。按照 Levy 飞行机制,鸟巢位置的更新公式如下:

$$\begin{cases} x_{r+1, i} = x_{r, i} + \alpha \oplus Levy(\lambda) \\ \alpha = \alpha_0 (x_{r, i} - x_b) \\ Levy(\lambda) = \frac{\varphi u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\varphi = \left[\frac{\Gamma(1 + \beta) \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1 + \beta}{2}) \beta^{\frac{\beta-1}{2}}} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

式中, Γ 表示伽马函数, $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{a-1} dt$ 。 $x_{r, i}$ 为鸟巢 i 在第 r 代的位置; \oplus 为点对点乘法; α 为步长; α_0 为常数; x_b 为当前最优解。 $Levy(\lambda)$ 服从莱维概率分布, u 、 v 服从标准正态分布, 其中 $\beta = 3/2$ 。

Levy 飞行机制在寻优过程中步长大小随机,大步长的出现在前期可使算法避免陷入局部极值,提高算法的寻优精度和速度^[17]。在越来越接近最优解的算法后期,大步长的随机出现则可能使算法脱离全局最优解,削弱算法的寻优能力。布谷鸟算法中 Levy 飞行的步长大小由步长因子 α_0 决定。 α_0 取值太大,算法的全局搜索能力强,但算法的局部寻优能力减弱;反之,则局部搜索能力增强,但降低了算法的收敛速度且迭代次数增加。因此本文将算法的当前迭代数和最大迭代数引入步长调整的过程,采用步长控制函数 ω 代替原步长更新公式中的 α_0 ,使 Levy 飞行可动态地调整步长,增强其自适应性和寻优能力。

改进后的位置更新公式如下:

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \left(1 - \frac{t}{T}\right)^{0.8} \quad (15)$$

$$x_{r+1, i} = x_{r, i} + \omega \frac{\varphi u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} (x_{r, i} - x_b) \quad (16)$$

式中, ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为步长控制因子的上、下限值; T 为最大迭代次数; t 为当前迭代数; $x_{r, i}$ 、 $x_{r+1, i}$ 分别为鸟巢 i 在第 r 次和第 $r+1$ 次迭代更新后的位置。

4.3 基于 NSGA-II 的 ICS 算法流程

(1) 针对系统网络模型,输入微网的风光荷预测数据,初始化基本参数。

(2) 随机生成调度方案集合 X_0 , 计及各分布式电源模型的约束条件,计算各目标函数值。

(3) 部分鸟巢更新:通过 Levy 飞行根据式(16)在符合各 DG 模型约束条件的范围内产生新的调度方案集合 X_1 。

(4) 计算 X_1 中各种调度方案的目标函数值。

(5) 将 X_0 和 X_1 合并为 X_2 , 将目标函数值进行快速非支配排序,并按拥挤距离策略对 X_2 进行筛选,选择最好的 n 种调度方案组成新非劣解集 X_3 。

(6) 根据发现概率 P_a 对 X_3 进行淘汰,在满足各约束条件的范围内得到新的非劣解集 X_4 , 淘汰更新解集的公式如下所示:

$$x_{r+1, i} = \begin{cases} x_{r, i} & rand < P_a \\ lb + (ub - lb) rand(m, 1) & rand \geq P_a \end{cases} \quad (17)$$

式中, $x_{r, i}$ 、 $x_{r+1, i}$ 分别为分布式电源 i 在第 r 次和第 $r+1$ 次根据发现概率 P_a 进行淘汰迭代的输出功率; lb 、 ub 分别为各分布式电源的输出功率下限、上限。

(续表)

测试函数	维数	目标函数及取值范围
ZDT3	30	$f_1(x) = x_1$
		$f_2(x) = g(x) [1 - \sqrt{x_1/g(x)} - \sqrt{x_1/g(x)} \sin(10\pi x_1)]$
		$g(x) = 1 + 9 \sum_{i=2}^n x_i / (n-1)$
		$x_1 \in [0, 1]$
		$x_i = 0 \quad i = 2, \dots, n$

(7)非劣解集归档: $Archive = [Archive; X_4]$,对 $Archive$ 进行去重,并按非支配排序原则删除被支配的解,保留非支配解。

(8)若档案 $Archive$ 中非劣解的个数大于 Max ,则依据拥挤距离原则选择最优的 Max 个解,否则直接输出档案 $Archive$ 中的结果,即微网中各分布式电源出力的调度情况。

(9)若没有达到最大迭代次数,则转向步骤(3)继续;否则,输出微网优化结果并结束运行。

基于 NSGA-II 的 ICS 算法流程图如图 3 所示。

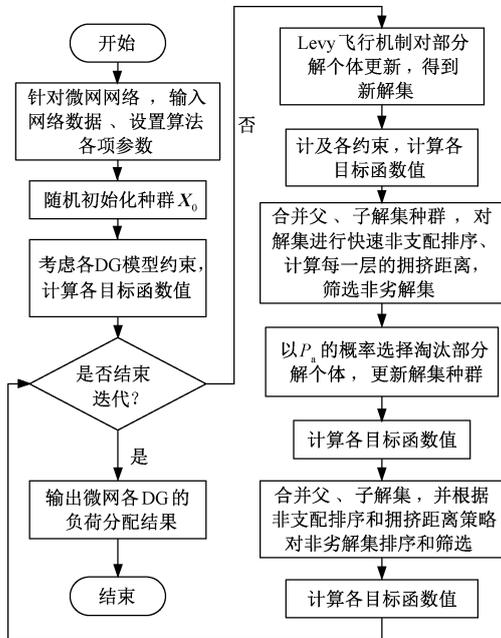


图 3 基于 NSGA-II 的 ICS 算法流程图

Fig. 3 Diagram of NSGA-II based ICS algorithm

4.4 算法测试

为了验证所提算法的可行性,选取测试函数 $ZDT2$ 、 $ZDT3$ 对算法进行测试,具体数据见表 1,在相同的仿真环境中,分别采用 NSGA-II 算法和基于 NSGA-II 的 ICS 算法进行求解,得到 $ZDT2$ 、 $ZDT3$ 的 Pareto 前沿如图 4、图 5 所示。

表 1 测试函数

Tab. 1 Test function

测试函数	维数	目标函数及取值范围
ZDT2	30	$f_1(x) = x_1$
		$f_2(x) = g(x) \{1 - [x_1/g(x)]^2\}$
		$g(x) = 1 + 9 (\sum_{i=2}^n x_i) / (n-1)$
		$x_1 \in [0, 1]$
		$x_i = 0 \quad i = 2, \dots, n$

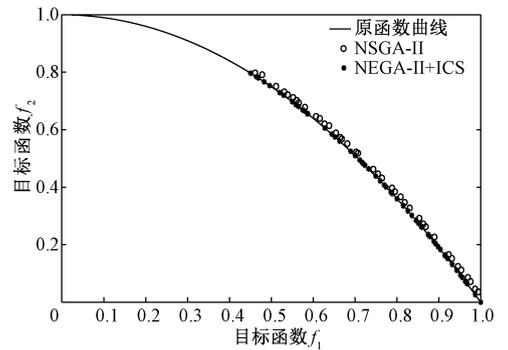


图 4 ZDT2 函数的 Pareto 前沿对比图
Fig. 4 Pareto frontier comparison of ZDT2

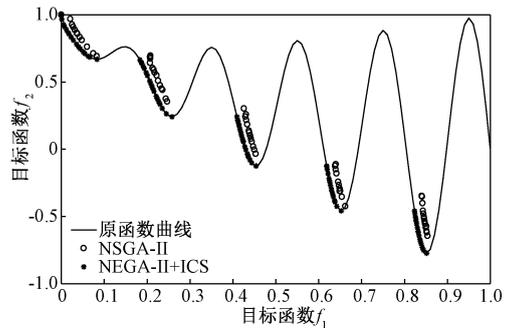


图 5 ZDT3 函数的 Pareto 前沿对比图
Fig. 5 Pareto frontier comparison of ZDT3

通过对比图 4、图 5 可得:基于 NSGA-II 的 ICS 算法下的两个目标函数的优化结果均比 NSGA-II 算法得到的更接近真实的 Pareto 前沿,且非劣解集的分布更全面、均匀,收敛性更好,验证了基于 NSGA-II 的 ICS 算法的可行性和有效性。

5 算例分析

5.1 算例仿真参数

本文以图 1 所给出的微网系统为研究对象。微网的优化调度周期为一天,分为 24 个时间段。微型燃气轮机额定功率为 65kW,燃料电池额定功率为 40kW,储能电池总容量为 50kW·h,充、放电效率均

取 0.92,初始荷电状态为总容量的 40%,其充放电最佳深度为 30%~95%^[18]。燃料电池的转换效率为 40%,微网中各分布式电源的其他运行参数如表 2 所示。本文所用的 NSGA-II 参数为:交叉概率 $P_c = 0.85$,变异概率 $P_m = 0.1$;基于 NSGA-II 的 ICS 算法参数为: $P_a = 0.25$,档案 *Archive* 的最大容量 $Max = 100$,步长调整参数 $\omega_{min} = 0.8, \omega_{max} = 1.6$;两种算法的种群大小均设为 100,最大迭代次数为 200。

表 2 各分布式电源的运行参数

Tab. 2 Operating parameters of different distributed power supply

微电源	PV	WT	MT	FC	ES
安装成本/(万元/kW)	6.65	2.37	1.306	4.275	0.087
使用寿命/年	22	20	20	20	10
设备维护系数	0.0096	0.0296	0.088	0.087	0.004
容量因数	0.2213	0.2934	0.5594	0.3034	0.3267
功率上限/kW	30	50	65	40	60
功率下限/kW	0	0	15	5	-60

由于光电和风电在运行过程中不会产生燃料成本和环境成本,所以光电和风电优先消耗。微型燃气轮机和燃料电池发出的电功率以及向大电网购买的电功率在产生的过程中会生成污染气体,主要类型为 CO_2, SO_2, NO_x ,各种污染气体的排放系数及其相关处理成本如表 3 所示。

表 3 污染排放系数和环境评价标准

Tab. 3 Pollution emission coefficient and environmental assessment criteria

污染物	环境价值/(元/kg)	罚款/(元/kg)	排放系数/(g/kW)		
			MT	FC	GRID
CO_2	0.002875	0.00125	184	635	889
SO_2	0.75	0.125	0.000928	0	3.15
NO_x	1.0	0.25	0.619	0.023	2.35

微网的日负荷、风光出力预测分别如图 6、图 7 所示。

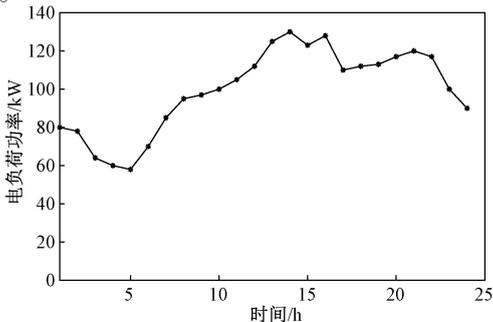


图 6 微网的日负荷预测数据

Fig. 6 Daily load forecasting data of microgrid

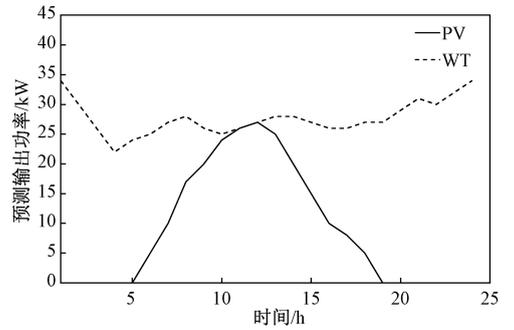


图 7 风电、光电的出力预测数据

Fig. 7 WT, PV output forecast data

微网与大电网进行交易的过程中,购售电价格采用峰-平-谷电价原则,图 8 为峰-平-谷购售电价格曲线图。

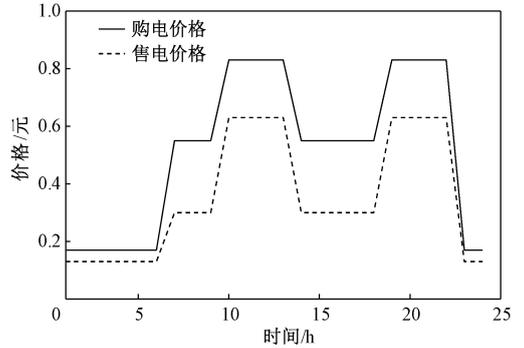


图 8 峰-平-谷购售电价格曲线

Fig. 8 Peak-flat-valley buy and sale price curve

5.2 仿真结果

5.2.1 优化调度策略分析

为了说明本文模型的优越性,选取不含风电和光电的调度模型进行对比,图 9 为等效日负荷的优化曲线。在相同的仿真环境下,采用基于 NSGA-II 的 ICS 算法和 TOPSIS 法^[19]对两种调度模型进行求解,得到的 Pareto 非劣解集分布如图 10 所示,不同调度方式的微网调度策略如图 11、图 12 所示,运行成本如表 4 所示。

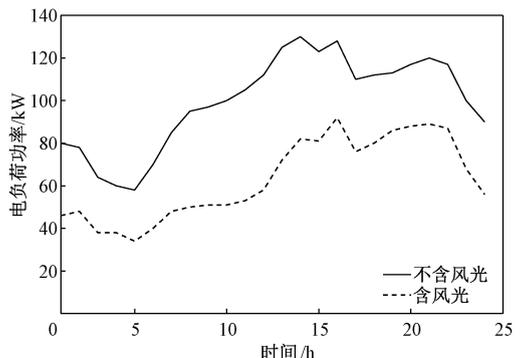


图 9 负荷优化曲线

Fig. 9 Load optimization curve

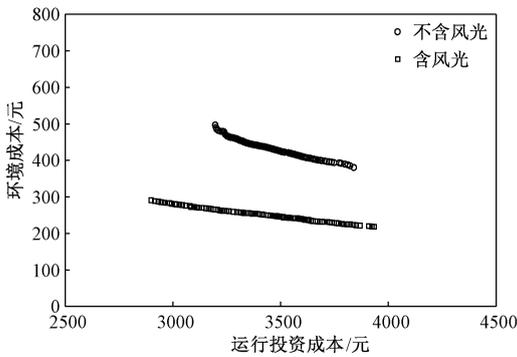


图 10 Pareto 解集分布对比

Fig. 10 Pareto solution set distribution comparison

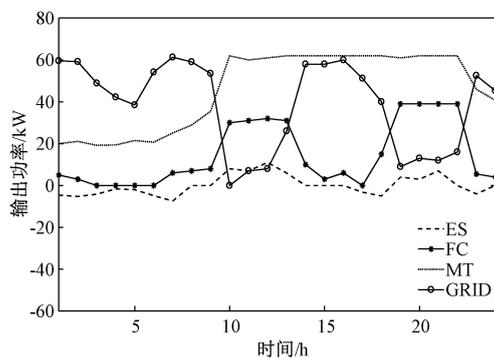


图 11 不含风电、光电的微网调度结果

Fig. 11 Microgrid scheduling results without WT and PV

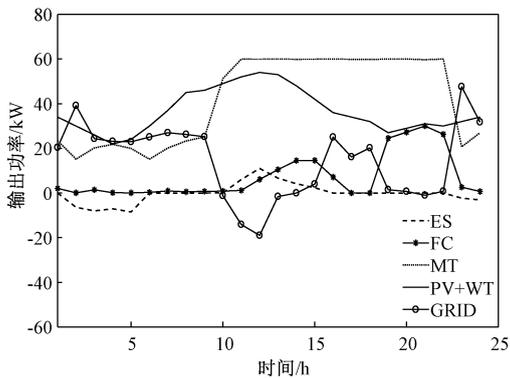


图 12 含风电、光电的微网调度结果

Fig. 12 Microgrid scheduling results with WT and PV

表 4 不同调度模型的运行成本

Tab. 4 Operating costs for different scheduling methods

调度模型	综合运行成本/元	环境成本/元	总成本/元
不含风光	3418.12	438.73	3856.85
含风光	3081.81	274.67	3356.48

由图 9 可以看出,与原始负荷相比,风电和光电的接入减小了系统调度的负担,降低了系统的运行

成本,并在一定程度上削减了负荷的峰谷差。由图 10 可知,与不含风光的调度方式相比,含风光互补发电的调度方式整体上的综合运行成本和环境成本均较为经济。

当不含风电和光电时,在 1:00~6:00 和 23:00~24:00 时段,此时电价处于谷时段,微型燃气轮机和燃料电池的发电成本较高,微网内大部分电负荷由向大电网购电来供应。在 7:00~9:00 和 14:00~18:00 时段,由于燃料电池的发电效率较低,相对发电成本仍较电价高,此时电负荷主要由向大电网购电和微型燃气轮机共同供应。在 10:00~13:00 和 19:00~22:00 时段,此时电价处于峰时段,微型燃气轮机和燃料电池基本上处于满发状态,系统电负荷需求主要由微型燃气轮机和燃料电池来满足,缺额部分由储能电池和购电进行补充。

当含风电和光电时,在 1:00~6:00 和 23:00~24:00 时,风电出力较多,由于购电价格较微型燃气轮机和燃料电池的发电成本低,因此微型燃气轮机和燃料电池基本保持最小功率输出状态,不足的电负荷由购电补充。在 7:00~9:00 和 14:00~18:00 时,优先消耗光伏和风力发出的电能,余下的电负荷由微型燃气轮机和向大电网购电供给。此时燃料电池的发电成本仍比购电价格高,因此基本不发电。在 10:00~13:00 和 19:00~22:00 时,由于向大电网售电价格较高,故微型燃气轮机和燃料电池尽量多发电能,除了满足电负荷需求以外,多发的电能输往大电网获取差额利益。

储能电池对电能具有双向调节的作用,但频繁的充放电会导致储能电池的使用寿命减短,造成不必要的成本损失。由图 11 和图 12 可知,整个调度周期内,储能电池仅仅在电价低谷时进行充电作为备用能量,在电价峰值时,储能电池释放电能进行补充,促进微网经济运行。

由表 4 可知,含风光互补发电的调度模型最经济环保,总成本最低。相比不含风电和光电的运行模式,采用风光互补发电运行模式的综合运行成本降低了 9.84%,环境成本减少了 37.39%,总成本降低了 12.97%,具有显著的经济环保优势。由于风电和光电在时间分布和峰谷分布方面具有交替互补的特点,因此采用风光互补发电可有效地降低发电总成本,实现微网的经济优化运行。

5.2.2 算法比较

为了进一步证明本文所提算法的先进性,采用

文献[13,14]中的算法进行对比,将本文算例系统的相关数据代入,得到的总成本与基于 NSGA-II 的 ICS 算法所得的总成本对比结果见表5。

表5 不同算法下的运行成本

Tab. 5 Operating costs by different algorithms

算法	综合运行成本/元	环境成本/元	总成本/元	运算时间/s
文献[13]	3179.68	291.31	3470.99	265.137
文献[14]	3163.25	287.46	3450.71	243.541
NSGA-II+ICS	3081.81	274.67	3356.48	173.962

由表5可得,基于 NSGA-II 的 ICS 算法下得到的总成本相比文献[13]中算法的优化结果减少了约3.30%的成本;相比文献[14],减少94.23元,节约了约2.73%的成本,验证了本文所提算法在降低微网运行总成本方面的先进性。且基于 NSGA-II 的 ICS 算法的运行时间最短,原因是在 Levy 飞行过程中引入了自适应步长调整策略,有效地提高了算法的收敛速度,减少了算法的运行时间。

6 结论

本文综合考虑各分布式电源及储能电池的运行特性,提出了含风光互补发电的微网优化模型,并采用基于 NSGA-II 的 ICS 算法进行求解,结论如下。

(1) 基于 NSGA-II 算法和自适应步长调整策略对布谷鸟算法进行改进,提出了一种基于 NSGA-II 的 ICS 算法,通过测试函数对 NSGA-II 算法和基于 NSGA-II 的 ICS 算法进行测试,表明了基于 NSGA-II 的 ICS 算法具有良好的全局寻优能力,收敛性更好,验证了该算法的可行性。并与文献[13,14]中的算法进行对比,通过算例仿真,验证了本文算法的先进性。

(2) 通过与不含风电和光电的优化调度模型进行对比,定量地分析了风光互补发电对微网优化运行的正面影响,能有效降低微网的综合运行成本和环境成本,仿真结果验证了模型的有效性。

文中暂未考虑风光荷的预测误差,故风光荷预测误差模型的准确建立将成为接下来的研究内容。

参考文献 (References):

[1] 邱海峰, 赵波, 林达, 等 (Qiu Haifeng, Zhao Bo, Lin Da, et al.). 计及储能损耗和换流成本的交直流混合微网区域协调调度 (Regional coordinated dispatch in AC/DC hybrid microgrids considering energy storage loss and converter cost) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (23): 29-

37.

- [2] Al-falahi Monaaf D A, Jayasinghe S D G, Enshaei H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 143: 252-274.
- [3] 徐青山, 李淋, 蔡霖霖, 等 (Xu Qingshan, Li Lin, Cai Jilin, et al.). 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度 (Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrid system considering power interaction among microgrids) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (21): 36-44.
- [4] 李盛伟, 李鹏飞, 白星振, 等 (Li Shengwei, Li Pengfei, Bai Xingzhen, et al.). 计及储能和用户响应需求的并网型微网优化调度模型 (Optimal scheduling model of grid-connected microgrid considering effects of demand response and energy storage) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (9): 51-58.
- [5] 张福民, 崔海波, 李占凯, 等 (Zhang Fumin, Cui Haibo, Li Zhankai, et al.). 基于改进 NSGA-II 算法的微网交互式多目标优化 (Interactive multi-objective optimization of microgrid based on improved NSGA-II algorithm) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2018, 46 (12): 24-31.
- [6] 肖浩, 裴玮, 孔力, 等 (Xiao Hao, Pei Wei, Kong Li, et al.). 综合能源微网运行优化调度方法研究 (Research on optimal operation method of integrated energy microgrid system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (12): 1-11.
- [7] 张忠, 王建学, 曹晓宇 (Zhang Zhong, Wang Jianxue, Cao Xiaoyu). 基于负荷分类调度的孤岛型微网能量管理方法 (An energy management method of island microgrid based on load classification and scheduling) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (15): 17-23, 109.
- [8] 曾增, 彭春华, 王奎, 等 (Zeng Ceng, Peng Chunhua, Wang Kui, et al.). 基于鸟群算法的微电网多目标运行优化 (Multi-objective operation optimization of micro grid based on bird swarm algorithm) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (13): 117-122.
- [9] 李美成, 梅文明, 张凌康, 等 (Li Meicheng, Mei Wenming, Zhang Lingkan, et al.). 基于可再生能源不确定性的多能源微网调度优化模型研究 (Research on multi-energy microgrid scheduling optimization model based on renewable energy uncertainty) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2019, 43 (4): 1260-1270.
- [10] 李鹏, 郑苗苗, 陈安伟, 等 (Li Peng, Zheng Miaomiao, Chen Anwei, et al.). 基于文化基因算法的交直流

- 混合微网优化运行 (Optimal operation of hybrid AC/DC microgrid based on memetic algorithm) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (11): 3226-3234.
- [11] 崔秋丽 (Cui Qiuli). 基于人工蜂群算法的微网并网优化运行 (Optimal operation of grid-connected microgrid based on ABC algorithm) [J]. 系统仿真学报 (Journal of System Simulation), 2018, 30 (4): 1551-1559.
- [12] 孙丛丛, 王致杰, 江秀臣, 等 (Sun Congcong, Wang Zhijie, Jiang Xiuchen, et al.). 计及风光预测误差的微电网日前多目标优化控制策略 (Day-ahead multi-objective optimization control strategy of micro-grid considering forecast error of wind/photovoltaic) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2018, 54 (1): 73-81.
- [13] 陶思钰, 黄民翔 (Tao Siyu, Huang Minxiang). 基于 NSGA-II 算法的并网型微网多目标调度 (Multi-objective dispatching of a grid-connected micro-grid based on NSGA-II algorithm) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2013, 41 (8): 1678-1682.
- [14] 孙建龙, 吴锁平, 陈燕超 (Sun Jianlong, Wu Suoping, Chen Yanchao). 基于改进 NSGA2 算法的配电网分布式电源优化配置 (Optimal configuration of distributed generation in distribution network based on improved NSGA2) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2014, 35 (2): 86-90.
- [15] 王鹏飞 (Wang Pengfei). 基于布谷鸟算法的微电网多目标优化运行研究 (Research on multi objective optimal operation of micro grid based on cuckoo algorithm) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.
- [16] Hanoun Samer, Creighton Doug, Nahavandi Saeid. A hybrid cuckoo search and variable neighborhood descent for single and multiobjective scheduling problems [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75 (9-12): 1501-1516.
- [17] 刘景森, 刘晓珍, 李煜 (Liu Jingsen, Liu Xiaozhen, Li Yu). 具有动态步长和发现概率的布谷鸟搜索算法 (Cuckoo search algorithm with dynamic step and discovery probability) [J/OL]. 系统仿真学报 (Journal of System Simulation), 2018.03.23 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20180322.1755.096.html>.
- [18] 杨志鹏, 张峰, 梁军, 等 (Yang Zhipeng, Zhang Feng, Liang Jun, et al.). 含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行 (Economic generation scheduling of CCHP microgrid with heat pump and energy storage) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (6): 1735-1742.
- [19] 彭春华, 黄戡, 袁义生, 等 (Peng Chunhua, Huang Kan, Yuan Yisheng, et al.). 基于 α 约束支配排序混合进化算法的微电网多目标优化运行 (Microgrid operation multi-objective optimization based on hybrid evolution algorithm with α -constraint dominant sorting) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2015, 35 (4): 24-30, 37.

Multi-objective optimization scheduling of microgrid based on improved cuckoo algorithm

ZHANG Jun^{1,2}, WANG Hong-min^{1,2}, LIU Ting-zhang³

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

2. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai University of

Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to solve the problems brought by environmental protection and economy aspects after the integration of distributed power and the large power grid, the micro-grid optimization scheduling model with wind-solar complementary power generation is established with the comprehensive operation cost and environmental cost as the optimization goal. In order to solve the model, an NSGA-II based ICS algorithm combining fast non-dominated sorting genetic algorithm and adaptive cuckoo algorithm is proposed. The feasibility of the algorithm is verified by the test function. Compared with the optimized scheduling method without wind power and optoelectronics, it is shown that considering the influence of renewable energy such as scenery in the scheduling process of the microgrid, it is beneficial to reduce the total cost of system operation. Simulation results verify the validity of the model and the advancement of the algorithm.

Key words: microgrid; wind and solar complementation; multi-target; NSGA-II algorithm; improved cuckoo algorithm