基于改进 NSGA-II 的电力系统动态环境经济调度

朱志键,王 杰

(上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要: 电力系统动态环境经济调度(DEED)在节能减排中具有举足轻重的地位。针对 NSGA-II 的不足,提出 一种具有可控精英主义的选择操作的改进 NSGA-II (MNSGA-II),在保证精英主义的前提下保证种群的多样 性。对模型复杂约束的启发式操作中所遇到的进化受阻问题进行分析,并采用基于前向搜索算子的改进启 发式操作解决该问题。利用新型成员函数表征 Pareto 最优解集中个体的优劣性,选出最佳折中解。经典 10 机系统算例仿真结果表明,与 NSGA-II 相比,所提 MNSGA-II 具有更佳的全局搜索能力。

0 引言

传统的静态经济调度 ED(Economic Dispatch)不 计各时间断面的相互影响,可用等耗量微增率求解, 其求解过程快速有效、简单易行。ED 曾在电力工业 的调度中具有举足轻重的地位。随着社会经济的不 断发展以及电力系统的急剧增大,只考虑发电机组出 力约束的 ED 已不能满足电力系统安全稳定的要求。 在 ED 基础上计及各时间断面相互影响的动态经济 调度 DED(Dynamic Economic Dispatch)由此产生。 DED 考虑了机组出力爬坡速率[1-2],其调度策略更符 合实际但难度也更大。近年来随着环境污染和大气 污染的进一步加重,世界各国都制定了与节能减排 相关的法律法规。传统上,以煤和石油为主的一次 能源在转化为电能的过程中会释放出大量的污染气 体和温室气体。长远来看,寻求清洁能源是解决环 境问题和全球能源危机的唯一途径,但现阶段化石能 源在全球能源结构中仍有较大比重,短期内很难实 现,因此兼顾常规火电厂污染气体排放的环境经济 调度 EED(Economic Emission Dispatch)应运而生。

电力系统动态环境经济调度^[3](DEED)包括 DED 和 EED。DED 计及常规火电机组的爬坡速率,而既 考虑经济又考虑环境的 EED 以总调度时段内污染 气体排放总量最少和总调度时段内常规火电机组发 电成本最少为目标,因此 DEED 是一具有非线性、强 约束及多峰值的多目标优化问题。一般地,DEED 的 2 个目标函数相互竞争。所谓竞争是指一个目标 函数的减小必然导致另一个目标函数的增大。目前, 国内外的学者对 DEED 的研究主要集中在多目标 函数的求解算法上。文献[4-6]基于简化求解的思

收稿日期:2015-09-10;修回日期:2016-10-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61374155)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61374155) 路,分别采用权重法、模糊满意度法和价格惩罚因 子将 DEED 的多目标求解转化为单目标函数的求 解。虽然每次求解都可求得结果,但每次运算只可求 得一个解,每次求解结果均不同,且无法得到全局最 优解。此外,所求结果非常依赖于人为设定参数,且 人为设定参数的细小变化会对求解结果产生很大的 影响。鉴于简化思路的缺陷,很多学者不再避实就 虚,而直接用人工智能算法求解多目标优化问题。现 有文献大致可分为2类,分别是基于粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization)的求解算法和基于进 化算法 EA(Evolutionary Algorithms)的求解算法。文 献[7-10]分别将动态网格归档技术、动态邻居策 略、快速非支配排序操作及粒子群分割策略应用于 PSO 算法中,改进 PSO 算法均可获得优于常规 PSO 算法的动态优化结果。文献[11]提出一种模糊集群 PSO 算法,采用外部集合存储非占优粒子,并用小 生境技术来保证粒子群的多样性和自适应变异操 作来避免粒子群陷于局部最优。基于 EA 的求解算 法有很多。文献[3.13]和[14]分别采用改进的差分 进化算法(MDEA)和强度帕累托进化算法(SPEA) 求解多目标 DEED 模型。Deb 等提出 NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II)^[15-16]后,NSGA-Ⅱ获得了大量应用^[17-20]。文献[18-19]首次把 NSGA-Ⅱ引入到电力系统 DEED 中。较之普通优化算法, NSGA-Ⅱ既能够提高计算速度、得到更优结果,又可 以获得 Pareto 最优解集,利于决策者做出决策。文献 [12]把NSGA-II的 Pareto 占优策略和拥挤距离 CD (Crowding Distance)排序操作首次引入到 PSO 算法 中,提高了算法的全局搜索能力,获得较 NSGA-Ⅱ 更优的 Pareto 解集。文献 [20-21] 在文献 [18] 的基 础上分别采用引入自适应拥挤距离的 MNSGA-Ⅱ (Modified Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-Ⅱ)及引入动态拥挤距离和可控精英主义的 MNSGA- Ⅱ来求解 DEED 问题。

虽然上述算法取得了一定的研究成果,但总体存 在以下问题:目标函数和约束条件不完备,目标函数 中不计阀点效应引起的成本,约束条件中等式约束不 计网损,有些文献甚至仅计算单时段 EED,与实际情 况相差甚远:NSGA-Ⅱ可以完全保证种群的精英主 义,但不可避免地会牺牲种群多样性,即易陷于局部 最优:Pareto 最优解集中个体密集,分布不均匀。本 文以经济成本和环境成本最小为目标,建立了电力系 统多目标 DEED 的一般模型。其中,优化目标中计 及了常规火电机组阀点效应引起的能耗成本,等式约 束条件中计及了网损。为了在保证精英主义的前提 下保证种群的多样性,针对所建模型非线性、不可微 和多峰值的特点,本文采用一种具有可控精英主义的 选择操作的 MNSGA-II 进行求解。针对模型复杂约 束的启发式操作中所遇到的进化受阻问题作了深入 分析,并采用基于前向搜索的改进启发式操作成功解 决此难题。利用新型成员函数来表征 Pareto 最优解 集中个体的优劣性,选择出最佳折中解。仿真结果表 明,该算法具有良好的全局搜索能力,Pareto 最优解 集分布也更加均匀,可为决策者提供更多更优选择。

1 电力系统 DEED 建模

发电成本最小和环境成本最小作为 DEED 的 2 个目标函数是相互竞争的。所谓竞争是指一个目标 函数的减小必然导致另一个目标函数的增大。具有 等式和不等式约束的双目标函数的数学模型如下。

min
$$\{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})\}$$

s.t. $g(\mathbf{x}) = 0$ (1)
 $h(\mathbf{x}) \leq 0$

其中,g(**x**)和 h(**x**)分别为等式约束和不等式约束。 1.1 目标函数

a. 机组发电成本函数。

机组发电成本最小是指在满足负载和运行约束 的前提下,合理地分配各发电机组的出力以使整个调 度期间内发电总成本最小。汽轮机的进气阀突然开 启时出现的拔丝现象会在机组耗量曲线上叠加一个 脉动效应,即阀点效应。因此,计及阀点效应的 DED 目标函数表达式为:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^{T} \sum_{i=1}^{H} \left[F_i(P_{ii}) + E_i(P_{ii}) \right]$$
(2)

$$F_i(P_{it}) = a_i + b_i P_{it} + c_i P_{it}^2$$
(3)

$$E_i(P_{ii}) = \left| d_i \sin\left[e_i (P_i^{\min} - P_{ii}) \right] \right| \tag{4}$$

其中, $F_i(P_u)$ 为发电机组 $i \pm t$ 时段的发电成本; $E_i(P_u)$ 为发电机组 $i \pm t$ 时段由阀点效应引起的能耗成本; H 为总的常规火电机组台数;T 为调度周期内总的 时段数; a_i , b_i 和 c_i 为燃料费用系数; P_u 为发电机组 i 在 *t* 时段的有功出力;*d_i、e_i* 为机组 *i* 的阀点效应系数;*P*ⁿⁱⁿ为机组 *i* 的最小出力。

b. 污染气体排放量函数。

燃烧化石燃料的机组排放的污染气体主要有 SO_x、NO_x和CO_x。本文不单独对某一种气体设置排污 特性,而选择所有污染气体的综合排污特性作为所 有污染气体的等效。总调度时段内污染气体排放总 量最少是在满足负载和运行约束的前提下,合理地分 配各发电机组的出力以使整个调度期间内污染气体 排放总量最小。因此,综合排污特性^[3,5,12]可表示为:

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^H \left[\alpha_i + \beta_i P_{ii} + \gamma_i P_{ii}^2 + \eta_i \exp(\delta_i P_{ii}) \right]$$
(5)

其中, α_i 、 β_i 、 γ_i 、 η_i 和 δ_i 为机组*i*的排放系数。

1.2 约束条件

a. 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{H} P_{it} = P_{Dt} + P_{Lt} \quad t = 1, 2, \cdots, T$$
(6)

其中, P_{Dt}和 P_{Lt}分别为 t 时段的负载预测值和网损。 系统网损的精确值一般通过求解系统潮流方程后求 得, 但一般采用式(7)所示的简化 **B**系数法来计算。

$$P_{\rm L} = \sum_{i=1}^{H} \sum_{j=1}^{H} P_{it} B_{ij} P_{jt}$$
(7)

其中,B_{ij}为网损系数矩阵**B**的第*i*行第*j*列分量。

b.发电机组出力约束。

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad i=1,2,\cdots,H; t=1,2,\cdots,T \quad (8)$$

c. 发电机组爬坡速率约束。

 $-D_{\text{Ri}} \leq P_{i} - P_{i(t-1)} \leq U_{\text{Ri}}$ $i=1,2,\cdots,H;t=1,2,\cdots,T(9)$ 其中, $P_{i(t-1)}$ 为t-1时段发电机组i的有功出力; D_{Ri} 、 U_{Ri} 分别为发电机组i的出力降速、出力增速。

2 模型求解

NSGA-II是目前最优秀的多目标优化算法之一。 该算法基于非支配快速排序算法 FNSA(Fast Nondominated Sorting Approach)和拥挤距离进行选择 操作,克服了 NSGA 的高计算复杂度、缺少精英主义 及需要人为定义共享函数参数的缺点^[16],在一定程 度上保证了种群的多样性和精英主义,提高了计算 效率。

文献[8,17-18]中的 NSGA-II 先用 FNSA 对联合 种群 R_a (大小为 2N,其中父代种群 P_a ,大小为 N;子 代种群 Q_a ,大小为 N)进行排序,获得排序 { F_1, F_2 , F_3, \cdots },然后以式(10)计算 R_a 中个体的拥挤距离, 最后在 R_a 中根据 FNSA 和拥挤距离选择大小为 N的下一代种群 P_{a+10} 由 FNSA 可知排序靠前的集合占 优后面的集合,因此 F_1 是联合种群 R_a 中的最优解 集,优先选择 F_1 中的个体便可把 R_a 中最好的个体直 接复制到下一代。借此,精英主义和收敛性得到了保 证。具体选择操作过程是:如果非占优集 F₁ 中个体数目大于 N,选择 F₁ 中拥挤距离值较大的前 N 个个体作为下一代种群 P_{a+1};如果 F₁ 中个体数目小于 N,把 F₁ 中的所有个体直接复制到下一代种群 P_{a+1} 中,继续向下一个排序搜索,直到 P_{a+1} 中个体数目为 N。

$$d_{\rm CDi} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^{k} \left| f_{i+1}^n - f_{i-1}^n \right| \tag{10}$$

其中,k为目标函数个数; d_{CDi} 为个体i的拥挤距离; f_{i+1}^n 和 f_{i-1}^n 分别为经过排序后的个体i+1和i-1所对 应的第n个目标函数的值。

2.1 MNSGA-II

以上操作是 NSGA-Ⅱ 的核心过程。尽管基于 FNSA 的选择操作保证了种群的精英主义,增强了种 群收敛到 Pareto 最优解集的可能性,却无法避免会 存在以下情况:基于 FNSA 的选择操作会导致 P_{a+1} 中 的个体过于集中,特别是当F1中的个体数目小于N 时 F1 中的精英个体将全部复制到下一代,即在完全保 证精英主义的情况下无法保证子代种群的多样性。 种群的多样性对于种群避免早熟非常重要,它能够 避免种群陷于局部最优解。在种群的进化中最重要 的是保持种群的多样性能够收敛到一个最优的 Pareto 集合。为了在保证精英主义的前提下保证种 群的多样性,本文采用一种可控精英主义的选择操 作把非占优最优集 F_1 和后续非占优集 $\{F_2, F_3, \dots\}$ 分 开处理。针对非占优最优集 F_1 的最优性, 用 Nm 来 表示允许 F_1 复制到 P_{a+1} 中的个数,其中 m 为 F_1 中允许 复制到 P_{a+1} 中的个数与 P_{a+1} 种群大小 N 的比值。因 此非占优最优集 F_1 最终遗传到 P_{a+1} 的个体数 R_{TI} 为: $R_{\text{TI}} = \min\{Nm, \operatorname{num}(F_1)\}$ (11)

其中,num(F_1)为非占优最优集 F_1 中的个体数目。后续非占优集对 P_{a+1} 中剩余的 $N-R_{T1}$ 个空位以等比数 列进行填补,操作过程如式(12)所示。

$$N_{i} = (N - R_{\text{TI}}) \frac{1 - g_{\text{r}}}{1 - g_{\text{r}}^{n_{i}}} g_{\text{r}}^{i-2} + O_{F_{i-1}} \quad i = 2, 3, \cdots, N_{\text{OR}}$$

$$O_{F_{i}} = \begin{cases} 0 \quad i = 1 \ \vec{x} \ N_{i} < \text{num}(F_{i}) \ ; i = 2, 3, \cdots, N_{\text{OR}} \end{cases}$$

$$(12)$$

$$N_{i} \ge \text{num}(F_{i}) \ ; i = 2, 3, \cdots, N_{\text{OR}}$$

其中, N_i 为允许非占优集 F_i 复制到 P_{a+1} 中的个数; N_{OR} 为 R_a 中排序的个数; $n_r=N_{OR}-1$; g_r 为等比数列的 公比; R_{Ti} 为 F_i 最终复制到 P_{a+1} 的个体个数; O_{F_i} 为 F_i 的溢出,表示 F_i 中个体数目的不足由 F_{i+1} 来弥补,直 至最后排序为 N_{OR} 的非占优集。理论上随着序数i的 增大,在 F_i 中所取个体数会越来越少,而借此可以 提高种群的多样性。通常既可通过最后排序的溢 出 $O_{F_{NOR}}$ 又可直接计算 $\sum_{i=1}^{N_{CR}} R_{Ti}$ (下文中均用 $sum(R_{Ti})$ 表 示)来判断 P_{a+1} 中个体的数量是否为 N_o

当 $O_{F_{NOR}} > 0$ 时,表示 P_{a+1} 中个体数量为 $N - O_{F_{NOR}}$, 意味着从除 F_1 之外的后续非占优集合中所取个体 数目太少。文献[19]直接从已经获得的 Patl 中随机 选择 OFrom 个个体复制加入 Pa+1 以保证 Pa+1 中个体数 目为 N,特别地,当 O_{Fve}较大时,种群相同个体较多, 易陷入局部最优。因此为防止子代种群 Pa+1 中出现 个体数目不足 N 的情况,在初期选择参数时,应使 m和 g. 都较大以在保证精英主义的前提下保证种群的 多样性。为此,本文设计了一种逆序地增加 Pat1 中 个体数目的方法如式(13)所示,即先从最大排序非 占优集 F_{No}增加允许复制的个数,然后判断更新后 的 sum(R_{Ti})与 N 的大小关系,若 sum(R_{Ti})<N,那么 继续增加前一排序集合 F_{Nor-1} 的允许复制个数,直至 排序为2的集合(不对F1进行此操作)。若从Non排 序到第2排序调整一轮后 Pa+1 中个体数仍不足 N, 则再次实施以上操作直至种群数目大于等于N。以 上操作的关键步骤是要不断判断 sum (R_{Ti}) 与 N 的 大小关系。

 $R_{Ti}^{\text{news}} = \min\{N_i(1+l_{gin}), \operatorname{num}(F_i)\}$ (13) 其中, $i=N_{OR}, N_{OR}-1, \dots, 2; l_{gin}$ 为允许增大的程度。当 $O_{F_{NOR}}=0$ 时,鉴于 R_{Ti} 的取值为不小于括号内数值的 整数,即意味着 P_{a+1} 中个体数量大于等于 N_{\circ} 此时需 要在 P_{a+1} 中删除 $\operatorname{sum}(R_{Ti}) - N$ 个个体,具体是从 P_{a+1} 中所包含的最大排序非占优集 $F_{N_{OR}}$ 中具有最小拥挤 距离值的个体开始删除。若 P_{a+1} 不再含有 $F_{N_{OR}}$ 的任 何个体且 $\operatorname{sum}(R_{Ti})$ 仍大于N,则继续以相同规则删 除 P_{a+1} 中所包含的 $F_{N_{OR}-1}$ 集合中的个体,直到 P_{a+1} 中 个体数为 N_{\circ}

2.2 算法流程

MNSGA-Ⅱ的算法流程框图如图1所示。

详细算法流程如下。

a. 初始化。生成一个种群大小为 N 且满足约束 条件的随机种群 $P_{a}, a=0$,其中 a 是代数。

b. *P*_a 的 FNSA 和拥挤距离操作。用 FNSA 对初 始种群进行非支配排序。排序的结果是形成一系列 非占优集合,其中非占优最优集用 *F*₁表示,1 为其排 序号,紧接着为 *F*₂,依此类推;分别计算每个非占优 集中所包含个体的拥挤距离,然后对每个集合中的 个体以拥挤距离降序分别排序。

c. 竞选 TS(Tournament-Selection)。在种群 P_a 中随机选择 2 个个体,通过比较排序号和拥挤距离选择较优个体放入交配池^[16]。

d. 交叉(Crossover)和变异(Mutation)。交叉操作 采用分散交叉 SC(Scattered-Crossover),是指随机产 生一与父代相同大小的二进制向量,向量中元素为 1 时从第一个父代选择对应的元素,元素为 0 时从 第二个父代中选择相对应的元素;交叉概率为 p_e。 变异操作采用标准变异 UM(Uniform-Mutation),变异 概率为 p_m。通过交叉和变异操作产生一个大小为 N



图 1 MNSGA-II 的计算流程图 Fig.1 Flowchart of MNSGA-II

的子代种群 Q_a。

e. 联合父代种群和子代种群。产生联合种群 $R_a = P_a \cup Q_a$,其种群大小为 2 N_o 。

f. 可控精英主义的选择操作。获得非占优最优 集 F_1 和后续非占优集 $\{F_2, F_3, \dots\}$ 。以可控精英主义 对排序后的非占优集合进行选择操作,分别从 F_i 中 选择 R_{Ti} 个个体,然后判断子代个体总数是否为 N_o 不足的部分采用一种逆序地增加个体数目的方法; 多余的个体从 P_{a+1} 中所包含的非占优集 F_{Noa} 中具有 最小拥挤距离值的个体开始删除。若 P_{a+1} 不再含有 F_{Noa} 的任何个体,则继续从 P_{a+1} 中所包含的 F_{Noa-1} 集 合按相同规则删除,直到 P_{a+1} 中个体数为 N_o

g. 终止条件。一般地,可以采用固定大小的种 群代数或者解集质量不再明显提高作为算法的终止 条件。本文采用固定大小的种群代数 N_p 作为终止 条件。终止条件满足时,进入下一步,否则算法把步 骤 f 所得个体作为父代返回步骤 c 循环操作。

h.终止。获得 Pareto 最优解集及相关参数与 图形。

2.3 最佳折中解

基于 MNSGA-II 所获得的 Pareto 最优解集为决策制定者提供了一系列的选择。从所有选择中选出

一个作为最佳折中解对决策制定者大有裨益。一般 地,决策制定者具有个人偏好,为了避免决策者个人 判断的不严密性,文献[11,14]采用中立的成员函数 来表示最优解集中个体的优劣性。本文采用如式 (14)所示的新型无偏见的成员函数来表征 Pareto 最 优解集中每个个体的优劣。

$$\mu_{n}^{i} = \begin{cases} 0 & f_{n}^{i} \leq f_{n}^{\min} \\ \frac{f_{n}^{i} - f_{n}^{\min}}{f_{n}^{\max} - f_{n}^{\min}} & f_{n}^{\min} \leq f_{n}^{i} \leq f_{n}^{\max} \\ 1 & f_{n}^{i} \geq f_{n}^{\max} \end{cases}$$
(14)
$$\mu^{i} = \sum_{n=1}^{k} \mu_{n}^{i} / \sum_{i=1}^{l_{n}} \sum_{n=1}^{k} \mu_{n}^{i}$$

其中, f_n^{\min} 和 f_n^{\max} 分别为 Pareto 最优解集所对应的第 n个目标函数的最小和最大值; f_n^i 为 Pareto 最优解 集中第i个解所对应的第n个目标函数的值;k为目 标函数的个数; l_{en} 为 Pareto 最优解集中解的个数; μ^i 为 Pareto 中的第i个解的优劣,其值越小表明所代表 的解越优,即为最佳折中解。

3 复杂约束条件的启发式操作

DEED 是一个非线性、强约束及多峰值的多目标 动态优化问题,其强约束性和非线性特性使得 DEED 的求解变得相当困难。一般的通用算法效率低下且 结果并不优良,因此高效快速求解非线性动态优化问 题最核心的关键点是寻求相关方法处理约束条件。 在本文的约束条件中,不等式约束式(8)、(9)处理 起来比较简便,只需要令相关违反约束的变量变为 边界值即可。计及网损的等式约束处理起来相对比 较困难。本文采用启发式的迭代方法逐时段地对不 可行解进行修正。具体过程如下。

(1)对时段 t(t=1,2,…,T),计算等式约束违反值。

$$\delta_{t} = P_{Dt} + P_{Lt} - \sum_{i=1}^{H} P_{ii}$$
 (15)

设置违反值的阈值 ε ,如果 abs(δ_l) > ε ,转到步 骤(2),否则转到步骤(4)。

(2)按照每台机组的上升/下降空间均匀分配约 束违反值。

$$\boldsymbol{P}_{v,t}^{\text{new}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{v,t} + \delta_t (\boldsymbol{P}^{\text{max}} - \boldsymbol{P}_{v,t}) / \text{sum} (\boldsymbol{P}^{\text{max}} - \boldsymbol{P}_{v,t}) & \delta_t \ge 0 \\ \boldsymbol{P}_{v,t} + \delta_t (\boldsymbol{P}^{\text{min}} - \boldsymbol{P}_{v,t}) / \text{sum} (\boldsymbol{P}^{\text{min}} - \boldsymbol{P}_{v,t}) & \delta_t < 0 \end{bmatrix}$$
(16)
$$\boldsymbol{p}_{t} = \begin{bmatrix} \min(\boldsymbol{P}^{\text{max}}, \boldsymbol{P}_{v,t} + \boldsymbol{U}_{\text{R}}) & \delta_t \ge 0 \\ \end{bmatrix}$$
(17)

$$\boldsymbol{P}^{t} = \begin{cases} \boldsymbol{P}^{\min}, \boldsymbol{P}_{v,t} - \boldsymbol{D}_{\mathrm{R}} \end{cases} \quad \delta_{t} < 0 \tag{17}$$

其中, $P_{v,t}^{ev}$ 为 $P_{v,t}$ 调整后的输出, $P_{v,t}$ 和 P' 都为向量, 分别表示 t 时段机组调整后的出力和机组 t 时段出 力后所能增大/减小的最大/最小出力。

(3)判断 **P**^{new}_{v,t} 是否满足不等式约束条件,若不满 足,则按照不等式约束条件处理;否则返回步骤(1)。 (4)终止复杂约束的启发式操作。

若直接以步骤(3)来处理不等式约束式(9),则 在实际运行中会存在种群进化到某一代时停滞不 前不再进化,即进化受阻。原因在于 P_{x1}和上一个时 段的 P₁₁之间存在爬坡速率限制,即需要考虑时间 断面的相互影响,而在迭代的过程中,会存在当 P_{μ} 中所有个体全部增大/减小到 P_{xt-1} 的最大/最小极 限出力 P^{t-1} 时, δ_t 依旧大于/小于 0 的情况, 即 $P_{y_{t-1}}$ 中的某些机组出力已经接近极限值 P¹⁻¹, 以致 t-1 时 段的正负旋转备用不能满足 t 时段的调度。出现这 种情况的根本原因在于:NSGA-II的很多过程均是 随机操作的:复杂约束的启发式处理先确定靠前时 段的机组出力。为此,本文提出一种前向搜索操作 (forward-search operator),通过此操作可以增加 t-1 时段的正负旋转备用,以顺利渡越 t 时段的调度。 具体过程如下,该过程在步骤(2)与步骤(3)之间 执行。

a. 记录时段号 *t*,通过式(18)可判断是否出现进 化受阻,若式(18)成立转到步骤 **b**;否则转到步骤(3)。

$$\begin{cases} \sup(\boldsymbol{P}_{v,t}) > \sup(\boldsymbol{P}^{t-1}) & \delta_t \ge 0\\ \sup(\boldsymbol{P}_{v,t}) < \sup(\boldsymbol{P}^{t-1}) & \delta_t < 0 \end{cases}$$
(18)

b. 计算变量 *r_a*,变量 *r_a*用以描述 *P_{v,t-1}*中每台机 组出力的总上升/下降空间相对于机组爬坡速率的 比值。

$$r_{ri} = \begin{cases} (P_{i}^{\max} - P_{i,t-1}) / U_{\text{R}i} & \text{sum}(\boldsymbol{P}_{v,t}) > \text{sum}(\boldsymbol{P}_{v,t-1}) \\ (P_{i,t-1} - P_{i}^{\min}) / D_{\text{R}i} & \text{sum}(\boldsymbol{P}_{v,t}) < \text{sum}(\boldsymbol{P}_{v,t-1}) \end{cases}$$
(19)

搜索 $P_{v,t-1}$ 中 $r_{ti} < k_1(k_1 - 般取为 0.4~0.6)$ 的机 组,分别进行如下操作。

$$P_{i,t-1} = \begin{cases} P_{i,t-1} - 0.5D_{\mathrm{R}i} & \operatorname{sum}(\boldsymbol{P}_{v,t}) > \operatorname{sum}(\boldsymbol{P}_{v,t-1}) \\ P_{i,t-1} + 0.5U_{\mathrm{R}i} & \operatorname{sum}(\boldsymbol{P}_{v,t}) < \operatorname{sum}(\boldsymbol{P}_{v,t-1}) \end{cases}$$
(20)

搜索 $P_{v,t-1} \oplus r_{ii} > k_2(k_2 - \Re p p b 0.7~0.9)$ 的机组, 对这些机组按照上升/下降空间均匀分配所有 $r_{ii} < k_1$ 的机组在进行式(20)操作时所减小/增大的总量。 借此以保证在 sum($P_{v,t-1}$)不变的情况下,增大 t-1时段的正负旋转备用。此时判断式(18)是否成立, 若成立,则继续返回步骤 b,直至不成立;否则转到步骤 c。

c. 使 *t*=*t*-1, 对 *P*^{new}_{v,t} 按步骤(3)操作。

4 算例分析

4.1 系统描述及参数设置

本文采用 10 机电力系统^[18]算例验证本文算法 的有效性,并与 NSGA-II 的结果进行比较。模型综 合考虑了常规火电机组的阀点效应和系统的网络 损耗。机组参数和负荷数据见文献[18],调度时长 为 24 h,即 24 个时段。MNSGA-II 的参数设置如下: 种群大小为 100,交叉概率 p。为 0.8,变异概率 p...为 0.01, m 取值为 0.7, g, 取值为 0.75, 最大迭代次数为 20000, ε 为 10⁻⁵, k_1 为 0.6, k_2 为 0.8, l_{gain} 为 0.1。为了 验证所提 MNSGA-II 的更优全局搜索能力,将本文所 得结果与文献[18]和[21]进行比较。仿真试验均在 AMD 速龙 2 双核 245 处理器(2.90 GHz)、3.25 G 内存 32 位 Win7 操作系统上采用 MATLAB 编程实现。

4.2 结果分析

表1中的数据是对 f_1 和 f_2 分别优化的结果。为 了与本文所提出的 MNSGA-II对比,计算权重 ω =0.5 时 ωf_1 +(1- ω) f_2 的优化结果^[18]。其中,RGA 表示文 献[18]所采用的处理算法,MRGA 表示采用基于前 向搜索的改进启发式操作的 RGA。从表中数据可 知,采用本文所提的 MRGA 扩展了算法的搜索空间, 并且能搜索到更优结果。

表1 单目标优化实验结果比较

Table 1 Comparison of experimental results for single-objective optimization

算法	$f_1 / $	f_2/lb	$\omega f_1 + (1 - \omega) f_2$						
MRGA	2.497×10^{6}	2.924×10^{5}	[2.521,3.092]						
RGA	2.517×10^{6}	3.041×10^{5}	[2.525, 3.1246]						
注:为与文献[18]相比较,本文单位 lb 不予换算。									

图 2 是 NSGA-II 和 MNSGA-II 所求得的 Pareto 最优解集的对比图。从图中可以看出,与 NSGA-Ⅱ所 获得的 Pareto 最优解集相比,本文所提的 MNSGA-II 所求得的 Pareto 最优解集在目标空间中的范围更广 且分布更均匀,可为决策者提供更多更优选择。文 献[18]NSGA-Ⅱ所获结果分布密集且仅为局部最优 的原因正在于其仅仅完全保证了种群的精英主义, 而没有考虑种群的多样性对于避免种群陷于局部最 优的重大意义。通过可控精英主义改进后,能够在 保证种群精英主义的前提下保证种群的多样性,进 而避免种群陷于局部最优。由图 2 知,文献[21]采 用基于可控精英主义的 MNSGA-II 所获得的 Pareto 最 优解集占优文献[18]所获得的 Pareto 最优解集。采 用本文所提的基于改进可控精英主义的 MNSGA-II 所获得的 Pareto 最优解集占优文献 [18] 和 [21] 所获 得的 Pareto 最优解集。基于前向搜索的复杂约束的 启发式处理,也能不断调整个体参数,跳出不可行解



Fig.2 Comparison of Pareto optimal set

以更好地满足复杂约束,在一定程度上也扩大了种 群的搜索范围,增加了种群的多样性。可见,理论分 析和实际结果相符。

表 2 中的个体代表通过新型成员函数所获得的 最佳折中解。由表2数据可知,所有非支配个体在 所有时段均满足不等式约束和计及网损的功率平衡 约束,并没有牺牲解集的精确性来换取算法的效率。 除此以外,在计及网损情况下,机组总出力大于电力 负荷需求,其差额为网络损耗;而网损在某些时段甚 至会大于机组中的最小出力。由此可见,不计网损 的调度将会带来很大误差,而随着电力系统的不断扩 大,网损对调度的影响势必会越来越大。尽管网损的 计及会使功率平衡表达式从线性等式约束变为非线 性等式约束,会给 DEED 的求解带来很多困难,但不 计网损的大电网的调度虽然简便,却会引起功率的不 平衡,进而引起频率的变化,甚至会引起电力事故。 因此计及网损的 DED 对于整个电力系统的安全稳 定非常重要,而本文所提出的基于前向搜索的复杂 约束的启发式处理能够很好地解决这一难题。根据 表 2 中的总运行费用和总排污量可知,最佳折中解 并不占优 NSGA-II 的解。造成此种情况的原因在于 MNSGA-II的 Pareto 最优解集比通常的 NSGA-II 占 有更广阔的范围。即最佳折中解可能会取到图2所 示的非支配区域。因此,除开图 2 中的非支配区域总可以取得支配 NSGA-II 和 MNSGA-II ^[21]的解。表 3 中的个体是本文所用改进算法所获得 Pareto 最优解的第 62 个解。由表 1 和表 3 可知,采用权重法每次只能获得一个可行解,而采用本文所述的 MNSGA-II 能够获得 Pareto 最优解,且总存在优于权重法优化结果的个体。因此,本文所采用的 MNSGA-II 不仅可以拓展搜索区域,还可以获得更优解。

为了研究各机组耗能特性与排放量的关系,图 3 和图 4 分别表示表 3 中机组 1—5 和机组 6—10 的能耗特性与排放量的关系。由图 3 和图 4 中各曲 线可知,能耗较低时排放量都较小,而随着能耗的增 大,排放量都会随着机组能耗的增大而增大,不同 的是排放量随着能耗的增大而增大的速率不同。

5 结论

本文以经济成本最小和环境成本最小为目标, 建立了电力系统多目标 DEED 的一般模型。其中, 优化目标中计及了常规火电机组阀点效应引起的能 耗成本,等式约束条件中计及了网损,2个目标函数 相互竞争。尽管所建模型比较完备,但其求解极其 困难。针对所建模型非线性、不可微和多峰值的特 点,本文采用一种具有可控精英主义的选择操作的 MNSGA-II进行求解。针对模型复杂约束的启发式操

表 2 最佳折中解 Table 2 Optimal compromise solutions

바르		出刀/MW									台山 - h / MW	网络小小	备责/MW
时权	机组1	机组 2	机组 3	机组4	机组 5	机组6	机组 7	机组 8	机组9	机组 10	- 心山 // // M W	1991與/ MI W	贝刊/MW
1	154.570	140.120	102.066	109.194	119.631	119.938	93.2423	92.9388	75.2296	48.7637	1 055.69	19.6963	1036
2	157.076	142.378	113.324	113.629	135.831	125.639	105.962	112.984	78.2864	47.4079	1 1 3 2.5 2	22.5212	1110
3	166.155	163.072	151.525	149.344	164.805	136.535	124.686	116.473	65.6953	48.5353	1 286.82	28.8293	1 2 5 8
4	192.721	174.434	176.405	166.689	204.140	155.649	128.161	116.822	79.0664	48.1221	1 442.21	36.2131	1 406
5	201.779	189.416	194.988	187.392	213.249	158.402	127.584	119.403	79.2999	48.7489	1 520.26	40.2661	1 4 8 0
6	210.838	245.641	245.700	219.725	222.724	158.837	127.247	118.021	79.5319	49.0776	1677.34	49.3477	1 628
7	226.438	246.786	259.652	249.838	233.199	159.765	127.860	119.653	78.8202	54.0860	1756.09	54.0999	1 702
8	258.582	259.634	271.747	265.867	239.805	159.383	129.333	118.424	78.6001	54.1005	1835.47	59.4797	1776
9	291.131	316.890	311.462	287.731	242.954	159.972	129.968	119.981	79.9916	54.9880	1995.07	71.0726	1924
10	315.819	367.876	330.597	299.817	242.870	159.921	129.916	119.944	79.9542	54.9657	2101.68	79.6848	2022
11	373.936	392.423	339.527	299.998	242.999	159.999	129.999	119.999	79.9997	54.9950	2193.87	87.8782	2106
12	392.383	422.250	339.972	299.973	242.975	159.977	129.977	119.978	79.9792	54.9797	2242.44	92.4498	2150
13	352.908	382.845	333.038	299.985	242.989	159.791	129.993	119.995	79.9964	54.9972	2156.54	84.5426	2072
14	308.700	321.306	295.786	285.673	242.635	159.778	129.764	119.843	79.8713	52.0321	1995.39	71.3920	1924
15	259.859	264.203	276.624	263.416	241.855	157.960	127.823	113.341	78.7966	51.7056	1835.58	59.5853	1776
16	198.209	236.298	210.018	213.773	213.821	156.471	126.229	117.412	77.8202	48.7098	1 598.76	44.7666	1554
17	192.331	225.559	178.307	181.007	210.626	159.344	127.608	118.368	78.6017	48.7628	1 520.51	40.5184	1 4 8 0
18	232.058	240.697	239.070	219.609	223.218	159.727	129.709	119.806	64.9970	48.6159	1677.51	49.5107	1 628
19	258.377	264.947	267.799	265.301	240.234	158.440	128.260	118.894	78.9898	54.3016	1835.54	59.5470	1776
20	319.553	326.370	319.048	294.334	242.994	159.996	129.996	119.996	79.9950	54.9612	2047.24	75.2474	1972
21	311.552	316.958	310.068	285.210	237.957	157.268	126.729	117.834	78.2204	53.6574	1995.45	71.4572	1924
22	233.203	238.533	236.854	235.210	214.455	154.750	122.202	114.824	75.7318	51.8100	1677.57	49.5767	1 628
23	170.748	166.448	164.147	185.224	190.943	144.586	118.103	112.106	63.7257	48.2345	1 364.27	32.2701	1 3 3 2
24	161.648	148.280	153.048	135.980	159.869	130.624	103.671	105.260	62.5718	48.5485	1 209.50	25.5040	1 1 8 4

注:系统中运行费用为 \$2555180.88,系统中污染气体排放量为 299140.86 lb。

电力自动化设备

表 3 Pareto 最优解集的第 62 个解

Table 3 62nd solution of Pareto optimal set

마는 단자	出力/MW									台山土山町	团担 /MW	各苔 /MW	
时权 -	机组1	机组 2	机组 3	机组4	机组 5	机组6	机组 7	机组 8	机组9	机组 10	心出力/MW	1911贝/ MI W	贝彻/MW
1	157.830	140.620	100.110	108.570	121.530	120.490	93.025	116.370	53.2740	43.8300	1055.6	19.691	1036
2	156.610	141.830	105.770	115.780	168.950	125.760	94.476	116.170	64.3630	42.7450	1132.4	22.494	1110
3	157.890	149.980	175.180	158.130	215.780	119.620	103.050	114.580	53.3170	39.1750	1286.7	28.743	1 2 5 8
4	174.760	153.980	190.440	181.510	218.030	157.060	129.510	117.130	75.7000	43.6540	1441.8	35.821	1 406
5	182.160	155.130	221.600	218.720	218.500	153.870	129.210	118.270	77.7130	44.5510	1519.7	39.775	1480
6	169.290	220.160	283.330	250.450	226.080	158.190	128.000	118.680	78.7940	43.6870	1676.6	48.694	1628
7	231.630	226.850	293.020	238.350	236.180	155.520	126.180	116.820	78.4850	52.9900	1756.0	54.073	1 702
8	230.640	247.290	298.790	285.170	237.860	157.420	126.800	119.230	78.1820	53.6350	1835.0	59.045	1776
9	257.130	324.010	330.980	297.220	242.790	159.960	129.910	119.900	77.8410	54.9430	1994.7	70.736	1924
10	299.695	376.884	337.067	299.984	242.989	159.993	129.993	119.995	79.9962	54.9971	2101.5	79.596	2022
11	371.690	394.260	339.910	299.990	242.990	159.990	129.990	119.990	79.9990	54.9950	2193.8	87.866	2106
12	380.893	433.592	339.990	299.978	242.994	159.996	129.996	119.997	79.9979	54.9984	2242.4	92.437	2150
13	341.050	390.920	338.480	299.400	242.580	159.740	129.720	119.810	79.8520	54.8890	2156.4	84.484	2072
14	292.420	315.100	308.350	291.580	242.870	159.920	129.920	119.940	79.9560	54.9670	1995.0	71.061	1924
15	232.370	239.500	296.210	289.320	241.120	157.780	127.630	118.420	78.7070	53.8890	1834.9	58.975	1776
16	179.930	221.400	221.810	239.320	220.690	158.390	121.790	114.550	75.5230	44.9700	1598.4	44.411	1554
17	164.010	201.480	208.390	236.210	223.270	154.580	120.910	91.539	75.0420	44.5700	1 520.0	40.046	1480
18	179.370	218.860	285.410	242.070	225.590	158.250	126.820	117.530	78.2660	44.5710	1676.7	48.789	1628
19	238.056	240.043	290.602	285.171	240.984	158.776	128.693	119.131	79.2846	54.2805	1835.0	59.024	1776
20	304.810	318.000	336.980	299.120	242.990	159.990	129.990	119.990	79.9990	54.9990	2046.9	74.920	1972
21	309.213	308.753	327.851	291.588	233.905	154.489	124.115	116.094	76.7901	52.5926	1995.3	71.394	1924
22	230.800	228.910	247.890	241.730	220.930	154.870	117.950	112.000	73.4290	48.9120	1677.4	49.461	1628
23	173.830	152.540	180.660	195.010	216.660	132.580	108.470	105.710	55.1530	43.6280	1364.2	32.277	1 3 3 2
24	158.040	154.330	145.760	171.080	170.210	122.420	93.414	97.658	52.4160	44.1410	1 209.5	25.504	1 184

注:系统中运行费用为 \$2517711.43,系统中污染气体排放量为 308674.15 lb。



图 3 各机组能耗与排放量的关系





图 4 各机组能耗与排放量的关系

Fig.4 Relationship between energy consumption and emission for Unit 6-10

作中所遇到的进化受阻问题做了深入分析,并首次 采用基于前向搜索的改进启发式操作成功解决此难 题。利用新的成员函数来表征 Pareto 最优解集中个 体的优劣性,选择出最佳折中解。通过比较,算例结 果验证了 MNSGA-II 具有更优的全局搜索能力,同时 也说明了计及网损的大电网的调度对于电力系统安 全稳定的重要意义。随着新能源在电力系统中的比 重越来越大以及能源互联网越来越深入的研究,计 及可再生能源入网的 DEED 必然成为新时期新阶段 需要重点研究的工作。

参考文献:

- MOHAMMADI-IVATLOO B,RABIEE A,EHSAN M. Time-varying acceleration coefficients IPSO for solving dynamic economic dispatch with non-smooth cost function[J]. Energy Conversion and Management, 2012(56):175-183.
- [2] WANG Y,ZHOU J,LU Y,et al. Chaotic self-adaptive particle swarm optimization algorithm for dynamic economic dispatch problem with valve-point effects[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(11):14231-14237.
- [3] 江兴稳,周建中,王浩,等. 电力系统动态环境经济调度建模与求 解[J]. 电网技术,2013,37(2):385-391.
 JIANG Xingwen,ZHOU Jianzhong,WANG Hao,et al. Modeling and solving for dynamic economic emission dispatch of power system[J]. Power System Technology,2013,37(2):385-391.
- [4] BASU M. Particle swarm optimization based goal-attainment method for dynamic economic emission dispatch[J]. Electric Power Components and Systems, 2006, 34(9):1015-1025.
- [5] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using evolutionary programming and fuzzy satisfying method[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2007, 8(4):1-15.
- [6] PANDIT N, TRIPATHI A, TAPASWI S, et al. Static/dynamic

environmental economic dispatch employing chaotic micro bacterial foraging algorithm[C]//Swarm,Evolutionary,and Memetic Computing-Second International Conference. Berlin,Germany: Springer,2011:585-592.

- [7] COELLO C A,LECHUGA M S. MOPSO:a proposal for multiple objective particle swarm optimization [C] // Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, 2002. CEC'02. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2002:1051-1056.
- [8] HU X,EBERHART R. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization[C]//Proceedings of the World on Congress on Computational Intelligence. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2002:1677-1681.
- [9] LI X. A non-dominated sorting particle swarm optimizer for multiobjective optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003,2723:37-48.
- [10] ALVAREA-BENITEZ J E,EVERSON R M,FIELDSEND J E. A MOPSO algorithm based exclusively on pareto dominance concepts[C]//Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Berlin, Germany:Springer,2005:459-473.
- [11] AGRAWAL S, PANIGRAHI K B, TIWARI M K. Multiobjective particle swarm algorithm with fuzzy clustering for electrical power dispatch[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(5):529-541.
- [12] 刘刚,彭春华,相龙阳.采用改进型多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度[J].电网技术,2011,35(7):139-144.
 LIU Gang,PENG Chunhua,XIANG Longyang. Economic environmental dispatch using improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Technology,2011,35(7):139-144.
- [13] 卢有麟,周建中,覃晖,等. 差分进化算法在电力系统环境经济 调度中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2010,38 (8):121-124.

LU Youlin,ZHOU Jianzhong,QIN Hui,et al. Application of differential evolution algorithm to environmental/economic dispatch of power systems[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition),2010,38(8): 121-124.

[14] ABIDO M A. Environmental/economic power dispatch using

multi-objective evolutionary algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1529-1537.

- [15] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1995, 2(3):221-248.
- [16] DEB K,PRATAP A,AGARWAI S,et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm:NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.
- [17] RAMESH S,KANNAN S,BASKAR S. Application of modified NSGA-II algorithm to multi-objective reactive power planning [J]. Applied Soft Computing,2012,12(2):741-753.
- [18] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II [J]. Int J of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(2):140-149.
- [19] BASU M. Fuel constrained economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II [J]. Energy, 2014, 78 (4):649-664.
- [20] PURKAYASTHA B, SINHA N. Optimal combined economic and emission load dispatch using modified NSGA-II with adaptive crowding distance[J]. International Journal of Information Technology and Knowledge Management, 2010, 2(2):553-559.
- [21] DHANALAKSHMI S,KANNAN S,MAHADEVAN K, et al. Application of modified NSGA-II algorithm to combined economic and emission dispatch problem [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(4):992-1002.

作者简介:



朱志键(1991 —), 男, 四川眉山人,硕 士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制、 动态经济调度(E-mail:zhuzhijian503@gmail. com);

王 杰(1960—), 男, 上海人, 教授,博 士研究生导师,博士后, 研究方向为复杂系 统非线性控制、自适应控制、鲁棒控制、电 力系统非线性控制与稳定分析(E-mail:

jiewangxh@sjtu.edu.cn)

Dynamic economic emission dispatch based on modified NSGA-II for power system

ZHU Zhijian, WANG Jie

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The power system DEED(Dynamic Economic Emission Dispatch) plays an important role in the energy saving and emissions reduction. Aiming at the shortage of NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II), the MNSGA-II (Modified NSGA-II) with controllable elitism is proposed, which ensures the diversity of population on the premise of elitism. The evolution blocking problem occurred in the heuristic operation under the complicated constraints of model is analyzed and the improved heuristic operation based on forward-search operator is adopted to solve it. A new membership function is defined to describe the superiority-inferiority of each individual of Pareto optimal set for selecting the optimal compromise solution. The simulative results of the classic 10-unit test system show that, compared with NSGA-II , the MNSGA-II has better global searching ability.

Key words: dynamic economic emission dispatch; valve-point effect; MNSGA-II; controllable elitism; modified heuristic operation; forward search operation