

采用混沌多目标差分进化算法并考虑协调运行的 环境经济调度

邱 威¹, 张建华², 吴 旭², 刘力华¹

(1. 国家电力调度控制中心, 北京 100031; 2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对传统环境经济调度(EED)策略会导致部分线路运行在重载或过载状态的问题, 建立考虑系统协调运行的多目标 EED 模型, 其中协调性指标定义为各支路负载率的标准差。提出一种混沌多目标差分进化(CMODE)算法来求解模型, CMODE 算法将基于非支配排序的种群分级机制与差分进化算法有机融合, 并引入基于 Tent 混沌映射的种群初始化和控制参数动态调整策略以提高算法的全局寻优能力。IEEE 30 节点测试系统结果表明, 与不考虑运行协调性的 EED 相比, 在发电调度模型中计及协调性指标可提高电网安全运行水平。

关键词: 电力系统; 环境经济调度; 协调运行; 优化; 差分进化; Tent 映射; 模型

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.005

0 引言

电力系统经济调度 ED(Economic Dispatch)是指在已知机组开停计划的情况下, 通过合理分配系统的总负荷, 使得机组消耗的燃料最少^[1]。ED 直接关联电力供需平衡, 对保证电力系统安全、经济、节能运行有着重要意义。然而火电机组在利用化石燃料发电的过程中不可避免地产生大量的污染气体。2011 年 9 月 21 日, 中国环境保护部公布了最新的《火电厂大气污染物排放标准》, 该标准大幅度提高了火电厂污染物排放要求^[2]。如何从调度运行的角度减小火电机组对环境的影响是一个值得深入研究的课题。

环境经济调度 EED(Environmental and Economic Dispatch)以同时降低火电机组的燃料成本和污染气体排放量为优化目标, 符合当前中国节能减排的基本国策。一般而言, EED 问题中的 2 个目标函数是相互冲突的, 当追求经济性最好时, 会对环境产生负面影响; 当追求污染气体排放量最低时, 则会以牺牲经济效益为代价。因此, 类似于单目标 ED 问题的最优解在 EED 问题中是不存在的, 取而代之的是一个非劣解的集合, 称为帕累托(Pareto)最优解集。国内外学者针对求解 EED 问题进行了大量的研究, 传统方法是將 EED 问题转化为单目标优化问题进行求解, 大体上可分为以下 3 类。

a. 线性加权和法。文献[3-4]采用价格惩罚因子将污染气体排放量嵌入到燃料成本中; 文献[5]

直接给 2 个目标函数分配权重。线性加权和法的优点是易于理解、计算简单, 缺点是权重系数的设置较为困难, 且对非凸目标空间很敏感。

b. 目标规划法^[6]。该方法并不是考虑对各个目标进行最优化, 而是希望在约束条件的限制下, 每一目标都尽可能地接近事先给定的各自对应的期望值。目标规划法的主要缺点在于需要决策者事先给出各目标函数的期望值。

c. ϵ 约束法^[7]。该方法的基本思路是选取决策者最感兴趣的目标作为单目标优化问题的目标函数, 其他目标则作为约束条件。 ϵ 约束法虽然对 Pareto 前沿的形状不敏感, 但合适的容许值 ϵ 需要不断试探方可获取。

上述方法的共同特征是在优化前需要调度人员依据先验知识设置一系列反映对各目标偏好程度的参数, 但在现实中这些先验知识往往是未知的。此外, 这些方法为了获得近似的 Pareto 最优解集需要多次运行求解单目标优化问题的算法, 导致计算开销非常大。

近年来, 多目标进化算法 MOEAs(Multi-Objective Evolutionary Algorithms)的快速发展为 EED 问题的求解提供了一种新思路。MOEAs 不需要事先提供偏好信息, 能够在一次计算过程中获取多个 Pareto 最优解, 调度人员只需从中选择出满足要求的折中调度方案。迄今为止, 多种类型的 MOEAs^[8-12]被用于求解 EED 问题, 取得了较好的优化效果。

在模型构建方面, 文献[4]采用 B 系数法计算网损, 忽略了系统安全约束, 所得调度方案不能保证电网运行在安全区域; 文献[12]建立的 EED 模型虽然计及了系统备用约束, 但未考虑支路潮流约束, 可能导致部分线路运行在重载状态。

收稿日期: 2012-10-31; 修回日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51007022)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51007022)

基于上述分析,本文建立综合考虑系统运行经济性、清洁性和协调性的安全约束 EED 模型,并提出一种混沌多目标差分进化 CMODE(Chaotic Multi-Objective Differential Evolution)算法来获取模型的 Pareto 最优解集。最后,以 IEEE 30 节点系统为算例来验证所述发电调度策略的有效性。

1 考虑协调运行的 EED 模型

1.1 目标函数

a. 燃料成本。

$$F = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (1)$$

其中, F 为燃料成本; N_G 为发电机组数; P_i 为机组 i 的有功出力; a_i, b_i, c_i 为机组 i 的燃料成本系数。

b. 污染气体排放量。

火电机组排放的有害气体包括 SO_2, NO_x 等,各气体排放量都可与机组有功出力建立函数关系。不失一般性,本文采用了如下污染气体综合排放模型:

$$E = \sum_{i=1}^{N_G} [10^{-2}(\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2) + \zeta_i \exp(\lambda_i P_i)] \quad (2)$$

其中, E 为污染气体排放量; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \zeta_i, \lambda_i$ 为机组 i 的污染气体排放量系数,可根据电厂的有害气体排放监测数据采用拟合方法得到。

c. 运行协调性指标。

在环境经济调度模式下,煤耗低、排放少的大机组将尽可能多发电,煤耗高、污染重的小机组的出力将会减少。在大机组和小机组分布不均匀、负荷较重的电网内,这种发电调度模式将会导致部分线路运行在重载或过载状态,从而增加系统的运行风险^[13]。因此,电网协调运行也应作为 EED 的优化目标之一。定义电网运行协调性指标 C 如下:

$$C = \sqrt{\frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} (L_i - \bar{L}_i)^2} \quad (3)$$

其中, N_L 为系统支路数; L_i 为支路 i 的负载率; $\bar{L}_i$ 为支路平均负载率。 C 定义为系统内各支路负载率的标准差,是一个全局参数,反映了电网运行的支路功率分布是否均衡。在同一负荷水平下, C 的数值越小,各支路功率分布越均匀,电网运行的协调性越好。

1.2 约束条件

a. 功率平衡约束。

采用非线性潮流方程表示的功率平衡约束可表示为:

$$\begin{cases} P_G - P_D = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_G - Q_D = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, P_G, Q_G 分别为节点 i 的发电机有功出力和无功出力; P_D, Q_D 分别为节点 i 的有功负荷和无功负荷; U_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和 j 间的电压相角差; G_{ij}, B_{ij} 分别为支路 $i-j$ 的电导和电纳。

b. 机组出力约束。

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (5)$$

其中, $P_{i,\max}, P_{i,\min}$ 分别为机组 i 的有功出力上限和下限。

c. 支路功率约束。

$$-T_{Li,\max} \leq T_{Li} \leq T_{Li,\max} \quad (6)$$

其中, $T_{Li}, T_{Li,\max}$ 分别为支路 i 传输的功率及其上限。

d. 备用约束。

电网运行需要一定的备用容量来应对负荷预测误差和机组强迫停运给调度带来的影响以保障电力系统安全稳定运行。备用约束可表示为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,\max} \geq P_D + P_L + S_R \quad (7)$$

其中, P_D 为系统总有功负荷; P_L 为网络损耗; S_R 为旋转备用容量需求,一般可取为当前调度时段总负荷的 10%。

1.3 多目标优化问题的数学描述

综上所述,EED 模型可表示为:

$$\begin{cases} \min \mathbf{y} = [F(\mathbf{P}), E(\mathbf{P}), C(\mathbf{P})] \\ \text{s.t. } g_j(\mathbf{P}) \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, p \\ h_k(\mathbf{P}) = 0 \quad k=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{y}$ 为目标函数向量; $\mathbf{P}$ 为机组出力构成的控制向量; $g_j(\mathbf{P}) \leq 0$ 定义了 p 个不等式约束; $h_k(\mathbf{P}) = 0$ 定义了 q 个等式约束。

在多目标优化问题中常用到如下定义。

a. Pareto 支配。如果决策向量 $\mathbf{x}_1$ 和 $\mathbf{x}_2$ 都是可行解,则称 $\mathbf{x}_1$ 支配 $\mathbf{x}_2$ ($\mathbf{x}_1 < \mathbf{x}_2$),当且仅当

$$\begin{cases} f_m(\mathbf{x}_1) \leq f_m(\mathbf{x}_2) \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \\ f_m(\mathbf{x}_1) < f_m(\mathbf{x}_2) \quad \exists m \in \{1, \dots, M\} \end{cases} \quad (9)$$

其中, f_m 为第 m 个子目标函数; M 为目标函数个数。

b. Pareto 最优解。一个决策向量 $\mathbf{x}^*$ 被称为 Pareto 最优解,当且仅当

$$\neg \exists \mathbf{x}; \mathbf{x} < \mathbf{x}^* \quad (10)$$

所有 Pareto 最优解组成的集合为 Pareto 最优解集。

2 CMODE 算法

2.1 多目标差分进化算法的关键操作

文献[14]在差分进化算法的寻优机制中引入快速非支配排序和拥挤距离排序,发展了一种多目标差分进化算法,其关键操作如下。

a. 变异。

对第 G 代种群的每一个个体 $\mathbf{x}_i^G$,随机选取 3 个

互不相同的父代个体 $\mathbf{x}_{r_1}^G, \mathbf{x}_{r_2}^G, \mathbf{x}_{r_3}^G (r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i)$, 按式 (11) 进行变异操作生成变异个体 $\mathbf{v}_i^{G+1}$:

$$\mathbf{v}_i^{G+1} = \mathbf{x}_{r_1}^G + K(\mathbf{x}_{r_2}^G - \mathbf{x}_{r_3}^G) \quad (11)$$

其中, K 为缩放因子。

b. 交叉。

多目标差分进化算法通过如式 (12) 所示的交叉算子生成试验个体 $\mathbf{u}_i^{G+1}$:

$$\mathbf{u}_{i,j}^{G+1} = \begin{cases} \mathbf{v}_{i,j}^{G+1} & d_j \leq C_R, j = j_{\text{rand}} \\ \mathbf{x}_{i,j}^G & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中, C_R 为交叉概率; d_j 为 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数; j_{rand} 为从 $1 \sim D$ 之间随机选取的一个整数, D 为决策变量的维数。

c. 选择。

试验个体与父代个体根据 Pareto 约束支配准则进行竞争, 形成临时种群 Q , 该种群的规模介于 $N_p \sim 2N_p$ (N_p 为种群规模) 之间。对种群 Q 进行快速非支配排序的方法为: 首先找出种群中的所有非劣解, 赋予其优劣等级为 1; 然后找出剩余个体的非劣解, 赋予其优劣等级为 2; 重复此过程, 直到种群 Q 中所有个体都具有相应的优劣等级为止。为了维持种群的多样性, 并使 Pareto 最优解尽可能地均匀分布, 计算每一个个体与同级别相邻 2 个个体之间的拥挤距离, 计算方法见文献[15]。等级值越大、拥挤距离越小的个体在种群中的排序越靠后, 从排完序的种群中选择前 N_p 个个体组成新的父代种群。

2.2 CMODE 算法

2.2.1 Tent 混沌映射模型

混沌具有随机性、遍历性和初值敏感性等特点, 将其和进化算法融合可避免搜索陷入局部最优。与常用的 Logistic 映射相比, Tent 映射具有更好的遍历性[16], 其数学表达式为:

$$d_{k+1} = \begin{cases} 2d_k & 0 \leq d_k \leq 0.5 \\ 2(1-d_k) & 0.5 < d_k \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

若 Tent 映射迭代序列中出现小周期点 $\{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$ 或不动点 $\{0, 0.25, 0.5, 0.75\}$ 时, 则采用带扰动的方程:

$$d_{k+1} = \begin{cases} 2(d_k + 0.1d) & 0 \leq d_k \leq 0.5 \\ 2[1 - (d_k + 0.1d)] & 0.5 < d_k \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

其中, d 为 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数。

2.2.2 基于混沌映射的种群初始化

采用 Tent 映射产生初始种群, 既不改变初始化时所具有的随机性本质, 又能保持初始种群的多样性, 其具体步骤如下。

a. 随机生成 D 个 $0 \sim 1$ 之间的数, 形成初始序列 $\mathbf{x}_1 = (x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,D})$ 。

b. 根据式 (13) 生成混沌序列 $\mathbf{x}_i$, 得到混沌矩阵:

$$\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,D} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,D} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N_p,1} & x_{N_p,2} & \cdots & x_{N_p,D} \end{bmatrix}$$

c. 将混沌矩阵中的元素按式 (15) 映射到控制变量的取值范围 $[u_{j\min}, u_{j\max}]$, 得到初始种群。

$$u_{i,j}^0 = u_{j\min} + x_{i,j}(u_{j\max} - u_{j\min}) \quad (15)$$

2.2.3 基于混沌映射的控制参数动态调整

多目标差分进化算法中, 控制参数 K 和 C_R 在整个搜索过程中为静态值, 导致算法在进化后期易陷入局部最优。采用基于 Tent 映射的混沌序列在进化过程中动态调整控制参数, 可提高算法的全局收敛性[17]。此外, 采用混沌序列设置 K 和 C_R 的值还可避免繁重的参数试探工作。控制参数的动态调整策略如下:

$$K^{G+1} = \begin{cases} 2K^G & 0 \leq K^G \leq 0.5 \\ 2(1-K^G) & 0.5 < K^G \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

$$C_R^{G+1} = \begin{cases} 2C_R^G & 0 \leq C_R^G \leq 0.5 \\ 2(1-C_R^G) & 0.5 < C_R^G \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

其中, K 和 C_R 的初始值均取为 $0 \sim 1$ 之间的随机数。

3 算法流程

采用 CMODE 算法求解 EED 问题的流程如图 1 所示。

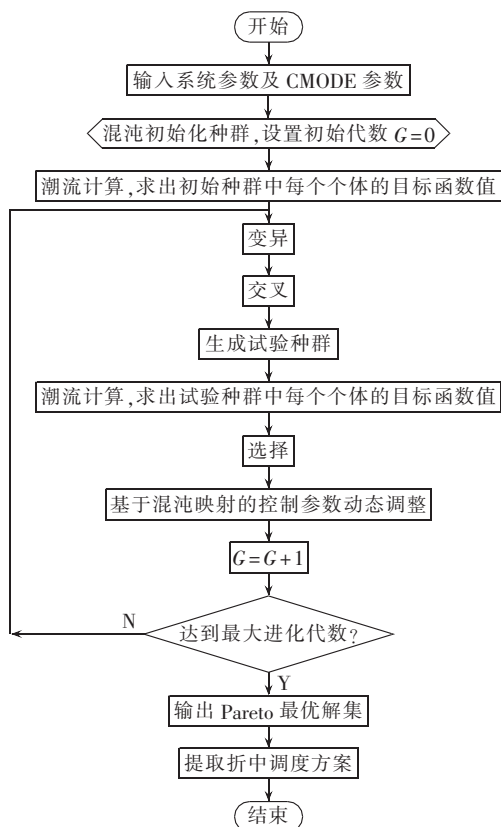


图 1 CMODE 算法流程

Fig.1 Flowchart of CMODE algorithm

在求出 EED 模型的 Pareto 最优集后,还应为调度运行人员提供最终的机组有功出力计划。本文采用模糊集理论^[8]提取出折中调度方案。每个 Pareto 最优解对应的各目标函数的满意度可用线性隶属度函数表示如下:

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_{i\min} \\ \frac{f_{i\max} - f_i}{f_{i\max} - f_{i\min}} & f_{i\min} < f_i < f_{i\max} \\ 0 & f_i \geq f_{i\max} \end{cases} \quad (18)$$

可见,当 $\mu_i=0$ 时表示对第*i*个目标函数值完全不满意,当 $\mu_i=1$ 时则表示对第*i*个目标函数值完全满意。应用式(19)求出 Pareto 最优解集中各非劣解的标准化满意度:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{N_{PF}} \sum_{i=1}^M \mu_i^k} \quad (19)$$

其中, N_{PF} 为 Pareto 最优解的数目; μ^k 为第*k*个 Pareto 最优解的标准化满意度。通过比较,取标准化满意度最大的非劣解为最优折中解。

4 算例分析

4.1 算例描述

以 IEEE 30 节点测试系统为算例,该系统共有 6 台火电机组($G_1—G_6$)、41 条支路($L_1—L_{41}$),有功负荷为 283.4 MW,接线图如图 2 所示。机组参数见表 1 和表 2。

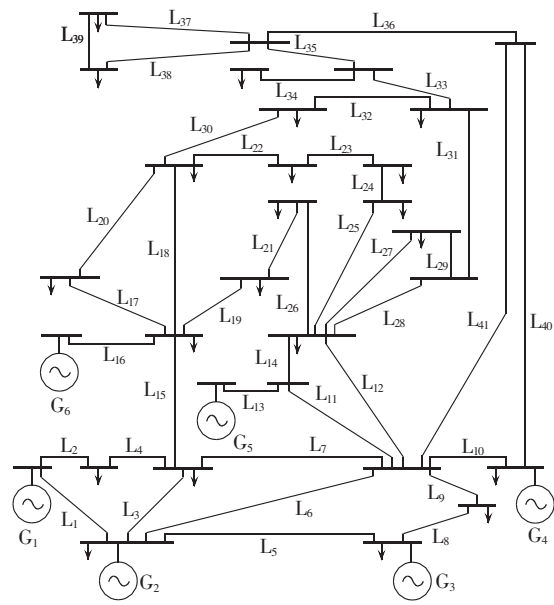


图 2 IEEE 30 节点系统单线图
Fig.2 Single-line diagram of IEEE 30-bus system

4.2 方法验证

为验证所提调度方法的有效性,采用 CMODE 算法对以下 2 个模型进行计算,算法的种群规模

表 1 机组燃料成本系数和容量
Tab.1 Fuel cost coefficient and capacity of generators

机组	$a/$ (\$·h ⁻¹)	$b/$ [\$·(MW·h) ⁻¹]	$c/$ [\$·(MW ² ·h) ⁻¹]	$P_{\max}/\text{MW}$	$P_{\min}/\text{MW}$
G ₁	10	2.0	0.010	50	5
G ₂	10	1.5	0.012	60	5
G ₃	20	1.8	0.004	100	5
G ₄	10	1.0	0.006	120	5
G ₅	20	1.8	0.004	100	5
G ₆	10	1.5	0.010	60	5

表 2 机组污染气体排放量系数
Tab.2 Polluted gas emission coefficient of generators

机组	$\alpha/$ (\$·h ⁻¹)	$\beta/$ [\$·(MW·h) ⁻¹]	$\gamma/$ [\$·(MW ² ·h) ⁻¹]	$\zeta/$ (t·h ⁻¹)	λ/MW^{-1}
G ₁	4.091	-0.055 54	6.490×10^{-4}	2×10^{-4}	0.028 57
G ₂	2.543	-0.060 47	5.638×10^{-4}	5×10^{-4}	0.033 33
G ₃	4.258	-0.050 94	4.586×10^{-4}	1×10^{-6}	0.080 00
G ₄	5.326	-0.035 50	3.380×10^{-4}	2×10^{-3}	0.020 00
G ₅	4.258	-0.050 94	4.586×10^{-4}	1×10^{-6}	0.080 00
G ₆	6.131	-0.055 55	5.151×10^{-4}	1×10^{-5}	0.066 67

取 50,最大迭代次数均设为 1 000。潮流计算基于 MATPOWER 4.0^[18]实现。

模型 1:两目标 EED,目标函数为同时最小化燃料成本和污染气体排放量,考虑功率平衡约束和网损,忽略网络安全约束。

模型 2:三目标 EED,目标函数为同时最小化燃料成本、污染气体排放量和运行协调性指标,考虑网络安全约束。

模型 1 的 Pareto 前沿如图 3 所示,其中代表燃料费用最低和污染气体排放量最少的调度方案如表 3、表 4 所示,表中非支配排序遗传算法(NSGA)、小生境 Pareto 遗传算法(NPGA)、强度 Pareto 进化算法(SPEA),模糊聚类多目标粒子群(FCPSO)算法的结果取自文献[8-11]。

由计算结果可知,相比其他 4 种多目标进化算

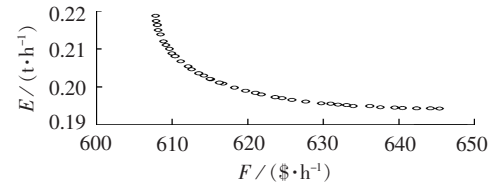


图 3 两目标 EED 问题的 Pareto 前沿
Fig.3 Pareto fronts of double-objective EED problem

表 3 模型 1 中燃料费用最低的调度方案
Tab.3 Dispatch scheme with minimum fuel cost for model 1

参数	NSGA	NPGA	SPEA	FCPSO	CMODE
P_1/MW	11.68	12.45	10.86	11.30	11.47
P_2/MW	31.65	27.92	30.56	31.45	30.39
P_3/MW	54.41	62.84	58.18	58.26	59.12
P_4/MW	94.47	102.64	98.46	98.60	98.49
P_5/MW	54.98	46.93	52.88	52.64	51.84
P_6/MW	39.64	39.93	35.84	34.50	35.43
$F/(\text{\$} \cdot \text{h}^{-1})$	608.245	608.147	607.807	607.786 2	607.767 4

表 4 模型 1 中污染气体排放量最低的调度方案
Tab.4 Dispatch scheme with minimum polluted gas emission cost for model 1

参数	NSGA	NPGA	SPEA	FCPSO	CMODE
P_1/MW	41.13	39.23	40.43	40.63	41.15
P_2/MW	45.91	47.00	45.25	45.86	46.47
P_3/MW	51.17	55.65	55.25	55.10	54.10
P_4/MW	37.24	36.95	40.79	40.84	38.80
P_5/MW	58.10	55.99	54.68	54.32	54.68
P_6/MW	53.04	51.63	50.05	49.74	51.31
$E/(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	0.194 32	0.194 24	0.194 22	0.194 2	0.194 18

法,CMODE 算法可获得最低的燃料成本和污染气体排放量,且 CMODE 算法搜索到的 Pareto 最优解集在目标空间上的分布较为均匀,可为目标函数之间的权衡提供丰富的信息,由此验证了所提算法的优越性。

采用模糊集理论提取出模型 1 和模型 2 的 Pareto 最优解集中的折中调度方案,结果如表 5 所示,2 种方案的支路负载率如图 4 所示。

表 5 折中调度方案
Tab.5 Compromised dispatch scheme

参数	方案 1	方案 2
P_1/MW	24.25	32.96
P_2/MW	37.34	48.52
P_3/MW	58.53	77.01
P_4/MW	68.62	49.66
P_5/MW	54.21	46.28
P_6/MW	43.39	31.50
$F/(\text{\$}\cdot\text{h}^{-1})$	616.266 2	633.664 1
$E/(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	0.201 00	0.200 31
C	0.256 0	0.202 1

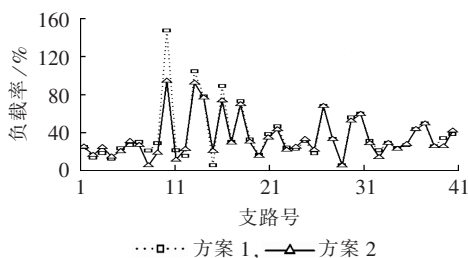


图 4 不同调度方案的支路负载率

Fig.4 Branch load ratings for different dispatch schemes

比较 2 种调度方案可以得出以下结论。

a. 若不考虑运行协调性,支路 L_{10} 发生过载,负载率高达 135.94%,支路 L_{13} 处于重载状态,负载率为 96.41%,系统运行协调性指标为 0.256 0;若计及运行协调性,支路 L_{10} 、 L_{13} 的负载率分别下降至 87.20% 和 85.22%,重载现象得到有效缓解,系统运行协调性指标则下降至 0.202 1,这表明各支路功率分布更为均匀,电网运行的安全性越高。

b. 与不考虑运行协调性的 EED 相比,在调度模型中计及协调性指标后,机组燃料成本略有增加,污染气体排放量几乎不变,这表明改善运行协调性

要牺牲一定的经济效益。

进一步研究 2 种调度方案下的预想故障对电网安全运行的影响,在不导致系统解列的前提下开断负载率较高的 4 条支路(L_{10} 、 L_{14} 、 L_{18} 、 L_{27}),评价指标采用表征支路功率越限严重程度的性能指标 PI (Performance Index)^[19]表达式如下:

$$\delta_{PI} = \sum_{i \in \alpha_L} \left(\frac{T_{Li}}{T_{Li,max}} \right)^2 \quad (20)$$

为避免遮蔽现象,式(20)中的 α_L 为过负荷的支路集合。计算结果如表 6 所示。

表 6 性能指标比较
Tab.6 Comparison of performance indices

开断支路	δ_{PI}	
	方案 1	方案 2
L_{10}	1.717 4	0
L_{14}	2.596 2	0
L_{18}	1.710 4	0
L_{27}	1.816 4	0

从计算结果中可以看出,方案 1 在 4 种预想故障下均出现了不同程度的支路过载;方案 2 在 4 种预想故障下的 δ_{PI} 值均为 0,表明开断上述 4 条支路中的任意 1 条支路后,其他支路均不过载。

计算可得方案 1 和方案 2 下的系统网损分别为 2.928 MW、2.533 MW,方案 2 的网损比方案 1 的网损下降了 13.49%,这表明计及协调运行的发电调度还可起到降低网损的作用。

5 结论

a. 从支路潮流均匀分布的角度定义了电网运行协调性指标,在此基础上构建了综合考虑系统运行经济性、清洁性和协调性的安全约束 EED 模型。

b. 提出了一种 CMODE 算法,该算法在差分进化的寻优机制中嵌入非支配排序操作,并采用基于 Tent 混沌映射的种群初始化和控制参数动态调整策略来提高算法的全局搜索能力。

c. IEEE 30 节点系统算例结果表明,所提发电调度策略可提高系统运行的安全性,并能降低网损,对提高电网调度的精益化管理水平具有参考价值。

d. 作为初步研究,本文以单时段的 EED 为研究对象,下一步工作将围绕考虑不同时间断面的耦合性的动态发电调度展开。

参考文献:

[1] 李文沅. 电力系统安全经济运行-模型与方法[M]. 重庆:重庆大学出版社,1989:1-7.
[2] 中华人民共和国环境保护部. GB13223—2011 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2011.
[3] VENKATESH P,GNANADASS R,PADHY N P. Comparison and application of evolutionary programming techniques to combined

- economic emission dispatch with line flow constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2003,18(2):688-697.
- [4] 陈功贵,陈金富,段献忠. 考虑备用约束和阀点效应的电力系统环境经济优化调度[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):18-22.
- CHEN Gonggui,CHEN Jinfu,DUAN Xianzhong. Environmental and economic dispatch with reserve constraints and valve-point effects[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):18-22.
- [5] 喻洁,黄学良,夏安邦. 基于分区协调优化的环境经济调度策略[J]. 电工技术学报,2010,25(1):129-136.
- YU Jie,HUANG Xueliang,XIA Anbang. Environmental economic dispatch based on subarea coordinated optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(1):129-136.
- [6] NANDA J,KOTHARI D P,LINGAMURTHY K S. Economic-emission load dispatch through goal programming techniques[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1988,3(1):26-32.
- [7] YOKOYAMA R,BAE S H,MORITA T,et al. Multiobjective optimal generation dispatch based on probability security criteria[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1988,3(1):317-324.
- [8] ABIDO M A. A novel multiobjective evolutionary algorithm for environmental/economic power dispatch[J]. Electric Power Systems Research,2003,65(1):71-81.
- [9] ABIDO M A. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective environmental/economic dispatch[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2003,25(2):97-105.
- [10] ABIDO M A. Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2003,18(4):1529-1537.
- [11] AGRAWAL S,PANIGRAHI B K,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] 刘静,罗先觉. 采用多目标随机黑洞粒子群优化算法的环境经济发电调度[J]. 中国电机工程学报,2010,30(34):105-111.
- LIU Jing,LUO Xianjue. Environmental economic dispatching adopting multiobjective random black-hole particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(34):105-111.
- [13] 张宁,陈慧坤,骆晓明,等. 广东电网节能发电调度计划模型与算法[J]. 电网技术,2008,32(24):11-15,38.
- ZHANG Ning,CHEN Huikun,LUO Xiaoming,et al. Model and algorithm of energy-conservation based generation dispatching for Guangdong Power Grid[J]. Power System Technology,2008,32(24):11-15,38.
- [14] ROBIĆ T,FILIPIĆ B. DEMO:differential evolution for multiobjective optimization[C]//3rd International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization(EMO). Heidelberg,Germany: Springer,2005:520-533.
- [15] DEB K,PRATAP A,AGARWAL S,et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm:NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.
- [16] 张浩,张铁男,沈继红,等. Tent混沌粒子群算法及其在结构优化决策中的应用[J]. 控制与决策,2008,23(8):857-862.
- ZHANG Hao,ZHANG Tienan,SHEN Jihong,et al. Research on decision-makings of structure optimization based on improved Tent PSO[J]. Control and Decision,2008,23(8):857-862.
- [17] 王筱珍,李鹏,俞国燕. 分阶段二次变异的多目标混沌差分进化算法[J]. 控制与决策,2011,26(3):457-463.
- WANG Xiaozhen,LI Peng,YU Guoyan. Multi-objective chaotic differential evolution algorithm with grading second mutation[J]. Control and Decision,2011,26(3):457-463.
- [18] ZIMMERMAN R D,MURILLO-SANCHEZ C E,THOMAS R J. MATPOWER:steady-state operations,planning,and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(1):12-19.
- [19] 吴际舜. 电力系统静态安全分析[M]. 上海:上海交通大学出版社,1985:75-77.

作者简介:

邱 威(1988-),男,江西九江人,博士,研究方向为电力系统调度运行(E-mail:qiuwei_002@126.com);

张建华(1952-),男,北京人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统稳定与控制;

吴 旭(1984-),男,安徽桐城人,博士研究生,研究方向为电力系统安全评估。

Environmental and economic dispatch based on chaotic multi-objective differential evolution algorithm considering coordinative operation

QIU Wei¹,ZHANG Jianhua²,WU Xu²,LIU Lihua¹

(1. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Because the traditional EED(Environmental and Economic Dispatch) may cause part of lines operating in heavy or over load condition,a multi-objective EED model considering the coordinative operation of power systems is built,in which,the coordination index is defined as the standard deviation of branch load ratings. CMODE(Chaotic Multi-Objective Differential Evolution) algorithm is applied to solve the model,which combines the population grading mechanism based on non-dominated sorting with the differential evolution algorithm and adopts the population initialization based on Tent chaos mapping and the dynamic control parameter adjustment to improve the global optimization ability. The results of its application in IEEE 30-bus test system show that,compared with the EED without the consideration of coordinative operation,the safe operating level of power system is enhanced.

Key words: electric power systems; environmental and economic dispatch; coordinative operation; optimization; differential evolution; Tent mapping; models