

DOI: 10.7667/PSPC161432

基于改进多目标遗传算法的实时发电市场优化调度研究

汤晓青¹, 刘辉², 范宇¹, 杨胜杰³

(1. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211000; 3. 湖南商学院, 湖南 长沙 410205)

摘要: 实时发电市场需在短时间内完成投标与出清, 与中长期市场相比时间更紧、价格波动更明显且更容易受到参与者行为的影响。在交易过程中, 若单纯采用总购电成本最低进行出清, 可能导致少量参与者占有大部分市场份额或剩余资源, 造成市场集中度偏大。少量机组可利用其市场力操纵市场并获得超额回报, 从而影响市场效率及稳定性。为了防止该类情形, 提出一种兼顾市场集中度的实时发电市场多目标优化模型, 通过监控 HHI 静态指标以及 DHHI 动态指标将市场集中度控制在合理水平。在模型求解过程中, 通过改进的多目标遗传算法 (Multi-objective Generic Algorithm, MOGA) 实现了快速收敛及有限方案筛选。最后采用 IEEE30 节点标准系统进行仿真, 仿真结果证实了模型的有效性及其算法的高效性。

关键词: 优化调度; 实时发电市场; 市场力; 多目标遗传算法

Analysis of the optimal dispatch in real-time generation market using an improved multi-objective genetic algorithm

TANG Xiaoqing¹, LIU Hui², FAN Yu¹, YANG Shengjie³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company Skills Training Center, Chengdu 610072, China;
2. NARI Group Corporation (National Electricity Science Research Institute), Nanjing 211000, China;
3. Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China)

Abstract: Real-time generation market has to complete the bidding and clearing in short time. It is more urgent in time, more fluctuating in price and more likely to be affected by participants' behavior. In the trading process, if the market clears merely according to the total purchasing cost, it may result in a minority of participants seize most of the market share or residual capacity where the market is highly concentrated. A few units can gain abnormal return through market manipulation and market efficiency and stability will be reduced. To avoid the above situation, this paper proposes a multi-objective model for the real-time generation market considering market concentration, limits the market concentration into appropriate level through monitoring the HHI static index and the DHHI dynamic index. When solving the model, the improved multi-objective generation algorithm (MOGA) achieves the quick convergence and finite schemes choosing. At last, the IEEE standard system of 30 nodes is applied to the simulation. Simulation result confirms the model's availability and the algorithm's efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61472136).

Key words: optimal dispatch; real-time generation market; market power; multi-objective genetic algorithm

0 引言

在垂直一体化模式下, 电力系统内部由于缺乏市场竞争容易出现生产效率低下等现象。随着世界

电力市场改革的深入, 不少国家开始打破电力垄断并建立电力市场。其中, 发电市场以原有调度部门为基础组建独立系统运营机构 (Independent System Operator, ISO), 主要负责市场运营及部分监管工作, 而各发电商在 ISO 组织下以机组为单位进行竞价上网。在市场环境中, ISO 不仅需要考虑到电网稳定约束以及成本最优目标, 在实际操作过程中还涉及污

基金项目: 国家自然科学基金 (61472136); 湖南省自然科学基金项目 (2016JJ2069); 湖南省教育厅优秀青年基金 (16B143)

染物排放、价格稳定等诸多因素, 这些因素作为额外目标函数或约束条件极大地增加了计算的时间及空间复杂度, 近年来引起了一些学者的关注和研究。文献[1-2]为解决环境经济调度问题提出了基于分解与粒子群的多目标优化算法。文献[3-4]考虑风电随机出力特性对电网的影响, 进一步完善了多目标低碳经济调度模型。文献[5]提出了一种大规模多目标水火电协调调度模型, 并通过改进算法确保计算的高效性。文献[6]引入信度理论对虚拟电厂调度过程中面临的收益及风险等多方面的优化目标进行平衡分析。文献[7-8]针对大规模电动汽车接入情况进行多目标经济调度分析与建模。已有成果虽然对多目标经济调度进行了深入探索, 但较少考虑到市场因素的影响。

发电侧市场交易总量主要取决于负荷预测结果及相关网损情况。在实际负荷无法准确预测的情况下, 发电侧通过采用多级市场、逐步平衡的方式满足用户的实际需求。其中, 实时市场是发电交易中最接近实时平衡的市场, 一般由市场运营机构提前 15 min~1 h 发布实时需求并组织市场交易。实时市场具有时间短、价格敏感等特点, 可以通过价格信号将用户的需求信息以最迅速的方式传递至发电侧, 对于电力回归商品本质具有重要意义, 但同时为市场运营带来巨大的风险。电力市场的参与者可凭借市场力操纵交易并获取超额利润, 尤其在复杂物理约束的掩盖下这将难以被及时发现。加州电力市场曾在市场结构和制度不够完善的条件下过度地开放了实时市场, 由此引发电力危机, 有学者估算, 其批发市场 59% 的涨价源于市场力的影响^[9]。

本文在已有成果基础上, 假定以日前良好的市场为前提^[10], 针对实时发电市场中经济调度与市场力之间协调问题进行研究。提出了以发电侧市场力指数及购电成本为目标函数的多目标优化模型, 并通过改进的多目标遗传算法(Multi-objective Generic Algorithm, MOGA)进行了多方案的实验仿真与比较, 验证了模型及算法的有效性。

1 实时市场中的市场力风险

一般情况下, ISO 考虑到市场风险, 会将主要电量交易安排在中长期或日前市场完成, 而实时预测中偏差的部分由实时市场完成。尽管交易电量不大, 但实时市场价格波动往往最强烈, 对市场稳定性影响较大。

ISO 通过对市场力相关指标进行实时监控, 防止参与者进行价格操作等投机行为。目前, 市场力评价指标主要包括 HHI 指数、价格成本指数(Price

Cost Margin Index, PCMI)、勒纳指数(Lerner Index, LI)等。该类指数在普通商品的生产交易中能较好地指示市场状态, 然而在电力市场中并非完全适应。实时发电市场具有如下特点:

- 1) 发电机组建设周期长, 市场在短期内拥有相对稳定的发电容量;
- 2) 电力负荷具有随机性, 难以精确预测;
- 3) 发电机组形式多样, 不同类型或同种类型不同等级的发电机组在发电成本上存在较大差异。

某些发电企业可能针对有限的输电裕度^[11]和市场可用容量等, 对自身发电容量进行有策略地保留和出售, 在负荷高峰期行使市场力, 造成市场供给的紧张与出清价格的波动, 图 1 为 2011 年 8 月 1 日美国 PJM 电力市场公布的实时市场电价波动情况。

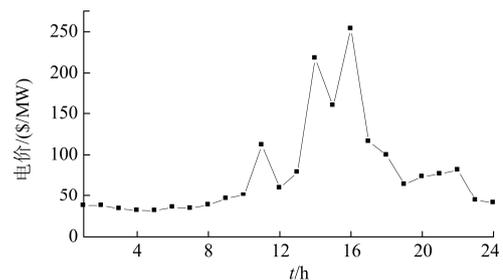


图 1 PJM 实时市场某日价格曲线

Fig. 1 PJM real-time market price curve on some day

目前在该领域仍缺乏系统性的理论支持及更为市场化的解决方案, 主要方法集中在对发电商的报价策略跟踪和博弈分析等方面, 但由于实际的市场参与者数量庞大, 随机性极强, 逐个地跟踪难以实现。本文退而由宏观指标指导市场运营管理, 对于调度部门而言, 不失为一种重新把握市场主动权的良好选择。

2 数学模型

2.1 目标函数

1) 购电费用

机组报价曲线可通过固定时段机组输出功率的二次函数进行模拟, 系统总购电费用最小可表示为

$$\min F(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (1)$$

式中: N 为机组台数; P_i 为机组 i 的有功出力; a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的报价系数。

2) HHI 最小

HHI 主要评估市场集中度, 集中度越高的市场, 表明少数成员占有大部分的市场资源, 其操控价格的可能性越大。对应于发电市场, 集中度越大, 表

明部分机组在负荷平衡中的地位越显著。HHI 指数计算公式如式(2)^[12]。

$$HHI = \sum_1^N (s_{G,i})^2 \quad (2)$$

式中: N 表示机组个数; $s_{G,i}$ 为第 i 个机组在总负荷中所占比例, 以%为单位; 根据不等式取极大值条件, HHI 的最大可能值为 10 000。本文参考了美国联邦能源管制委员会(FERC)对 HHI 指数的评价方法(由于电力市场本身属于寡头市场, 评判标准可适当放宽)^[13]:

当 $HHI > 1800$ 时, 认为市场高度集中。

当 $1000 \leq HHI \leq 1800$ 时, 认为市场中度集中。

当 $HHI < 1000$ 时, 认为市场正常。

3) DHHI 最小

在负荷持续增长的条件下, 发电侧可调度的机组数量和空余容量逐渐减少。出力水平接近自身发电容量的机组无法参与实时市场新一轮竞标。此时, 拥有剩余发电容量的机组把握了市场供应的瓶颈。本文在 HHI 的基础上, 考虑另一集中度指标, 即 DHHI 指数^[14]。

$$DHHI = \sum_{i=1}^{N_R} (s_{R,i})^2 \quad (3)$$

式中: N_R 表示具有剩余容量的发电商; $s_{R,i}$ 同样以%为单位, 表示第 i 个发电商的剩余容量在总剩余容量中的占有比例。DHHI 与 HHI 的不同之处在于考虑了电力平衡的特殊性, 用动态的观点评估发电机组的市场地位。DHHI 可参照以上对于 HHI 的评价方法。

2.2 约束条件

模型主要约束条件如下所述。

1) 功率实时平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_L \quad (4)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j \quad (5)$$

式中: P_D 为系统的总负荷需求; P_L 为全网损耗, 可采用 B 系数等方法进行网损估算。

2) 网络约束

$$-S \leq H \cdot P_{bus} \leq S \quad (6)$$

式中: H 为线路传输功率的敏感度系数; P_{bus} 为母线功率向量; S 为线路传输功率限值向量。

3) 机组最大和最小出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (7)$$

式中, $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为第 i 台机组的最小和最大出力。

4) 机组爬坡约束

$$-R_{i,\downarrow} \leq P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq R_{i,\uparrow} \quad (8)$$

式中, $R_{i,\downarrow}$ 、 $R_{i,\uparrow}$ 分别表示第 i 台机组的最大负爬坡率及正爬坡率。一般情况下, 可假定机组的正、负爬坡约束相等, 即 $R_{i,\downarrow} = R_{i,\uparrow} = R$ 。

3 基于弱支配的 MOGA 算法

3.1 多目标优化问题描述

多目标优化问题的难点在于不同目标函数之间的平衡。一方面的过度优化, 往往是以另一方面的牺牲为代价。解决方法通常是根据不同优化目标的重要性提前设置好目标函数权重, 从而达到一种综合最优的结果^[15]。将式(1)一式(8)改写为多目标优化问题的一般形式。

$$\min F(\mathbf{X}) = [f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), f_3(\mathbf{X})] \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g_l(\mathbf{X}) \leq 0, l=1, 2, \dots, L \\ h_k(\mathbf{X}) = 0, k=1, 2, \dots, K \\ \mathbf{X} \in \mathbf{R}^N, N > 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, L 和 K 分别为不等式与等式约束的个数。由式(9)和式(10)可以看出, 本文所面临的多目标优化问题包含两个特点: 一是搜索空间庞大, 其维度与机组数量相等; 二是约束条件多且复杂, 包括线性与非线性约束。以上两者使得计算量显著增加。

传统多目标问题的求解主要采用数学解析的理论及方法, 包括加权系数法和目标规划法等, 其共同之处在于都将多目标问题转化为单目标问题进行求解, 然而这些算法优化能力有限, 且无法处理 Pareto 前沿非凸等情形。进化算法具有内在的并行计算能力, 多目标计算多以此为基础进行提升和改进, 如 NSGA 算法(Non-dominated Sorted Genetic Algorithm)、NSDE 算法(Non-dominated Sorting Differential Evolution)和 MOGA 算法等。近年来, 一种弱支配原则在多目标进化计算中被提出, 并对进化效率等多方面具有显著的促进作用^[16]。

3.2 Pareto 优化下的弱支配策略

考虑实时优化调度的特点, 本文采用以弱支配原则为基础的改进 MOGA 算法, 并提出了相关的约束处理方案。该支配原则定义如下所述。

定义 1(ϵ -支配^[17]): 变量 \mathbf{X} 、 $\mathbf{Y} \in \mathbf{R}^N$, 令 $\boldsymbol{\epsilon} \in \mathbf{R}^M$ 且 $\boldsymbol{\epsilon} > 0$, 其中 N 、 M 分别为个体空间与目标空间的维数, ϵ_i 表示 $\boldsymbol{\epsilon}$ 的第 i 个元素。若 $\mathbf{X} \boldsymbol{\epsilon}$ -支配 \mathbf{Y} , 记为 $\mathbf{X} \prec_{\boldsymbol{\epsilon}} \mathbf{Y}$, 当且仅当 $\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}$, 且 $\exists i$ 满足 $f_i(\mathbf{X}) - \epsilon_i < f(\mathbf{Y})$ 。

为了防止在进化过程中, 由于种群的个体聚集而引起局部收敛、早熟等现象, 研究人员主要借鉴

该类问题在单目标优化算法中的解决方法,如小生境^[18]和适应值共享^[19]等。 ε -支配区别于传统的严格非劣排序,允许不同个体在目标空间的微小区域内不表现出支配关系。文献[20-21]在 ε -支配的基础上,提出了一种稳定的控制方法,不但更好地抑制了上述现象,且实现了精度的有效控制。根据2.1节中目标函数的个数,将目标空间划分为三维空间。 $\forall i \in \{1, 2\}$, $f_{i,\max}$, $f_{i,\min}$ 分别表示 $f_i(\mathbf{X})$ 在精英种群中的最大和最小值, n_box_i 和 ε_i 分别表示对第 i 维目标空间的划分个数及划分精度,视计算需求而定。每次迭代,通过式(11)实现动态调整。

$$\varepsilon_i = (f_{i,\max} - f_{i,\min}) / n_box_i \quad (11)$$

得到个体在目标空间中的定位为

$$box_i(\mathbf{X}) = \left\lceil \frac{f_i(\mathbf{X}) - f_{i,\min}}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \cdot n_box_i \right\rceil \quad (12)$$

$$\mathbf{box}(\mathbf{X}) = [\mathbf{box}_1(\mathbf{X}), \mathbf{box}_2(\mathbf{X}), \mathbf{box}_3(\mathbf{X})] \quad (13)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil$ 为上取整函数。式(10)一式(13)将不同个体在目标函数空间的映射转变为个体到 \mathbf{box} 空间的映射,在算法上实现动态调整的 ε -支配。如图2所示, $\mathbf{X}_1 \prec_\varepsilon \mathbf{X}_2$ 等价于 \mathbf{X}_2 在 \mathbf{box} 空间处于 \mathbf{X}_1 右上方区域。若新加入个体与某个 \mathbf{box} 方格中已有个体竞争,则选取离该方格中心较近的个体。

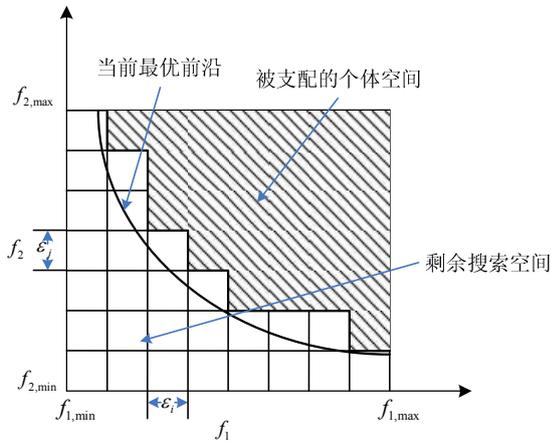


图2 ε -支配的图形表达

Fig. 2 Figure expression of ε -domination

3.3 算法流程

本文采用包含精英策略的 MOGA 算法框架,基本步骤如下所述。

1) 输入参数, $t=0$, 随机生成指定个数的初始搜索种群 $P(t)$ 。考虑到二进制编码中, 0-1 突变效应对局部搜索的不利影响, 本文对不同机组的出力采用实数编码方法。

2) 计算 $P(t)$ 中不同个体的目标函数值以及不同个体间的支配关系, 将未被支配的个体加入到精英种群 $A(t)$ 。

3) 将 $P(t)$ 中的个体进行遗传操作, 通过随机交叉变异生成辅助种群 $G(t)$ 。

4) 将辅助种群 $G(t)$ 分别与精英种群 $A(t)$ 和搜索种群 $P(t)$ 中的个体进行支配关系的比较, 淘汰 $A(t)$ 中被支配的个体, 将具有优秀基因的个体补充进入 $A(t+1)$ 和 $P(t+1)$ 。

5) $t=t+1$, 检验是否收敛或达到最大次数, 若均不满足, 则转至步骤 3)。

6) 输出由 $A(t)$ 中个体组成的 POF 解集。

3.4 约束处理

进化算法的约束处理是较为棘手的环节, 目前处理约束最主要的手段是附加惩罚因子。然而, 在实践中往往由于缺乏对惩罚尺度的适度把握, 容易产生 GA-hard 等问题。良好的惩罚因子应具有两个方面的特点: 一是对不可行解与可行空间的距离具有的度量功能, 实现个体状态的跟踪; 二是对不可行个体的后代进行正确的引导, 通过惩罚等方式使其回归可行区域。本文采用一种自适应惩罚系数方法^[22]。令个体 X 的适应度函数为

$$fitness(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^3 [f_{i,\max} - f_i(\mathbf{X})] S_i(\mathbf{X}) \quad (14)$$

惩罚系数由式(15)得到。

$$S_i(\mathbf{X}) = \theta_i \left[1 - \frac{1}{L+K} \left(\sum_{l \in V_L} \frac{g_l(\mathbf{X})}{g_{l,\max}} + \sum_{k \in V_K} \frac{|h_k(\mathbf{X})|}{|h_{k,\max}|} \right) \right] \quad (15)$$

式中: θ_i 为不同目标函数的权重系数; V_L 、 V_K 表示不满足条件的不等式和等式集合; $g_{l,\max}$ 、 $h_{k,\max}$ 分别表示不满足第 l 个不等式约束和第 k 个等式的个体中, 与可行区域距离最远个体的约束函数值。

4 实例分析

4.1 优化调度仿真分析

本文采用 IEEE 30 节点 6 机组系统进行仿真。机组投标参数(最大最小出力及报价系数)如表 1 所示, 假定每台机组分别属于不同的发电商。对于多台机组属于同一个发电商的情况, 机组仍独立调度, 只需将属于该发电商多台机组的容量进行叠加绑定即可。初步计算, 若负荷水平相对固定, 不同调度方案之间网损差异较小, 可暂不考虑网损的影响。当负荷如表 2 所示且仅根据发电机组的报价进行购电费用的最优调度, 则 HHI 及 DHHI 指数变化情况如图 3 所示。

表 1 机组报价参数

Table 1 Bidding parameters of 6 units

机组	$a_i/$ \$(/MW ² ·h)	$b_i/$ \$(/MW·h)	$c_i/$ \$(/h)	$P_{i,min}/$ MW	$P_{i,max}/$ MW
1	0.152 47	38.539 73	756.798 86	10	125
2	0.105 87	46.159 16	451.325 13	10	150
3	0.028 03	40.396 65	1049.9977	35	225
4	0.035 46	38.305 53	1243.5311	35	210
5	0.021 11	36.327 82	1658.5696	130	325
6	0.017 99	38.270 41	1356.6592	125	315

表 2 24-小时系统负荷

Table 2 24-hour system load

时段	负荷/MW					
00:00—6:00	518.4	507.6	503.4	492.3	471.9	460.2
06:00—12:00	505.8	543	645.9	799.8	930	1013.1
12:00—18:00	1111.5	1155.3	1089	1115.4	1023.9	914.7
18:00—24:00	805.2	820.8	845.7	914.1	773.4	647.7

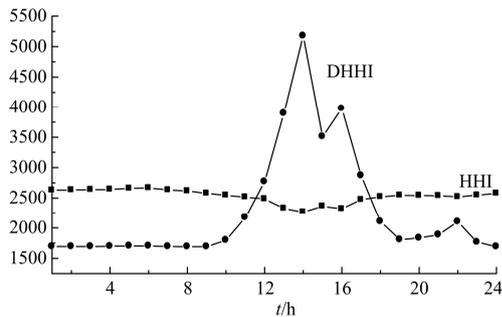


图 3 常规调度下 HHI 及 DHHI 指数变化曲线

Fig. 3 HHI and DHHI curve in traditional dispatch mode

为了通过平面图形直观地检验本文算法, 首先选取燃料费用及 HHI 指标进行双目标优化。不妨选定略微偏高的系统负荷, 即 $P_D=1100$ MW。分别采用本文的改进 MOGA 算法和 NSGA-II 算法在 AMD 2.9 GHz 处理器上对数学模型进行仿真, 前者经过 52 s 收敛, 后者耗时约为前者的 3 倍, 最终结果分别如图 4 和图 5 所示。将二者对比可以发现, 图 4 中最优解集的分布疏密有度, 且目标函数优化区间得到了更大的扩展, 由此证明了本文算法的合理性及有效性。

仍选取上述 6 机组系统, 继而完成购电成本、HHI 以及 DHHI 的三目标优化, 为展现空间坐标下的分布特性, 得到有限个方案在目标空间的 POF 三维插值曲面, 如图 6 所示。该曲面可视为对可行域及非可行域的大致划分, 位于曲面上的不同方案之间不存在支配与被支配关系, 即当其中两个目标相对固定的条件下, 另一个指标难以进一步优化。以

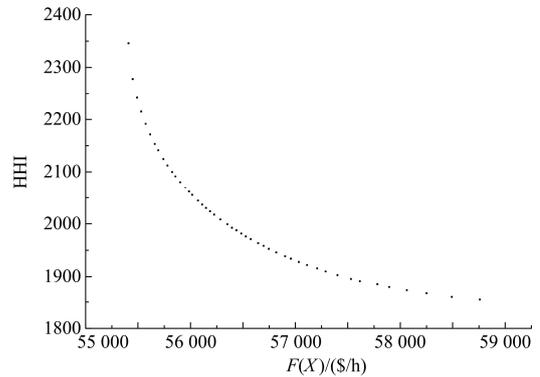


图 4 改进 MOGA 算法生成的 POF

Fig. 4 POF generated by the improved MOGA

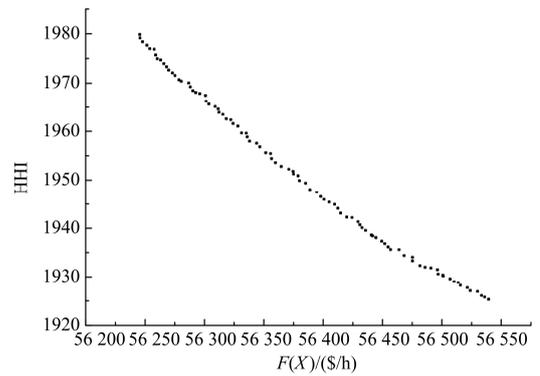


图 5 NSGA-II 算法生成的 POF

Fig. 5 POF generated by NSGA-II algorithm

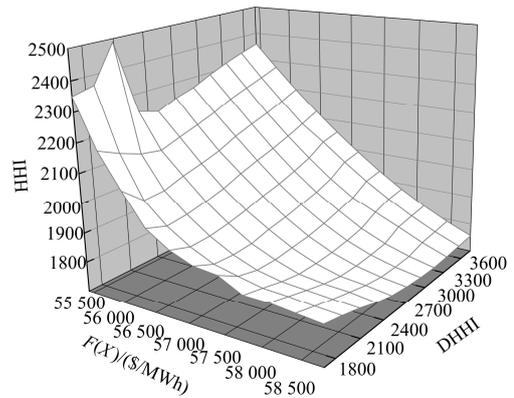


图 6 三目标优化调度 POF 插值曲面

Fig. 6 POF interpolation surface of three-objective optimal dispatch

此为基础, 不难进行有限方案的多目标决策分析, 可采用层次分析(AHP)和模糊数学等方法, 但对于风险效用值仍在一定程度上依靠管理者主观界定, 因此暂不做数值分析。

上述仿真表明, 本文提出的方法可以根据市场力指标对调度方案进行便捷有效的筛选。针对由其

他途径拟定的调度方案, 同样可以根据相应的 POF 对其进行校核。

5 结论

1) 机组经济调度是电力系统面临的传统问题。在垂直一体模式下, 电力系统经济调度不需要考虑机组策略及市场行为。而在市场环境下, 机组可能通过投机行为获得超额利润。尤其对于实时市场而言, 交易及出清时间短, 价格波动剧烈, 市场风险极高。一些投机者可能通过其市场力进行投机获得超额利润。本文通过进行多目标优化在购电成本最低的同时兼顾市场集中度水平, 有益于市场稳定。

2) 多目标优化问题可以通过加权方法将多个目标函数转化为单函数进行求解。然而在加权系数的确定上存在一定的武断性。而采用多目标进化算法可获取问题的最优 Pareto 前沿, 由操作人员自主选择不同目标函数之间的折衷比例, 然而已有算法主要以求解连续前沿为主, 造成计算时空复杂度较大。本文将弱支配理论应用于经济调度多目标求解, 实现了有限策略的快速分析, 符合实时市场时效性要求。

参考文献

- [1] 朱永胜, 王杰, 瞿博阳, 等. 采用基于分解的多目标进化算法的电力环境经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1577-1584.
ZHU Yongsheng, WANG Jie, QU Boyang, et al. Environmental economic dispatch adopting multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1577-1584.
- [2] 郑晓, 张静, 马韬韬, 等. 基于改进决策方法的电力系统多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 151-156.
ZHENG Xiao, ZHANG Jing, MA Taotao, et al. Power system multi-objective optimization dispatch based on an improved decision-making method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 151-156.
- [3] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 25-31.
LU Jinling, MIAO Yuyang, ZHANG Chengxiang, et al. Power system optimal dispatch considering wind farms based on improved multi-objective particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 25-31.
- [4] 杨家然, 王兴成, 蒋程, 等. 计及风力发电风险的电力系统多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 25-31.
YANG Jiaran, WANG Xingcheng, JIANG Cheng, et al. Multi-objective dynamic optimal scheduling of power system considering wind power risk[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 25-31.
- [5] 贺建波, 胡志坚, 刘宇凯. 大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(6): 1-7.
HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yukai. Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(6): 1-7.
- [6] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0017-x
- [7] 付一木, 刘明波. 求解多目标随机动态经济调度问题的场景解耦方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 34-40.
FU Yimu, LIU Mingbo. Scenario decomposition method for multi-objective stochastic dynamic economical dispatch problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 34-40.
- [8] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28.
HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.
- [9] BORENSTEIN S, BUSHNELL J B, WOLAK F A. Measuring market inefficiencies California's restructured wholesale electricity market[J]. The American Economic Review, 2002, 92(5): 1376-1405.
- [10] RODRIGO D. Optimal operational strategies for a day-ahead electricity market in the presence of market power using multi-objective evolutionary algorithms[D]. Manhattan: Kansas State University, 2007.
- [11] 严正, 罗玮, 杨立兵, 等. 基于市场力指标的输电容量充裕度评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 75-81.
YAN Zheng, LUO Wei, YANG Libing, et al. A method to evaluate transmission adequacy based on market power index[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 75-81.
- [12] TIROLE J H. The theory of industrial organization[M]. Cambridge: MIT Press, 1988.
- [13] 林济铿, 倪以信, 吴复力. 电力市场中的市场力评述[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 70-76.

- LIN Jikeng, NI Yixin, WU Fuli. A survey of market power in relation with electricity market structure[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 70-76.
- [14] BIALEK J W. Gaming the uniform-price spot market: quantitative analysis[J]. IEEE Transactions on Power System, 2002, 17(3): 768-763.
- [15] RACHMAWATI L, SRINIVASAN D. Multiobjective evolutionary algorithm with controllable focus on the knees of the Pareto front[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(4): 810-824.
- [16] DEB K, MOHAN M, MISHRA S. Evaluating the ϵ -domination based multi-objective evolutionary algorithm for a quick computation of Pareto-optimal solutions[J]. Evolutionary Computation, 2005, 13(4): 501-525.
- [17] LAUMANNNS M, THIELE L, DEB K, et al. Combining convergence and diversity in evolutionary multiobjective optimization[J]. Evolutionary Computation, 2002, 10(3): 263-282.
- [18] 赵亮, 睢刚, 铝剑虹. 一种改进的遗传多目标优化算法及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 96-102.
ZHAO Liang, JU Gang, LÜ Jianhong. An improved genetic algorithm in multi-objective optimization and its application[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(2): 96-102.
- [19] 商允伟, 裘聿皇. 适应值共享对遗传算法选择概率的影响分析[J]. 控制与决策, 2003, 18(6): 708-711, 715.
SHANG Yunwei, QIU Yuhuang. Influence of fitness sharing on the selection probability of genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2003, 18(6): 708-711, 715.
- [20] MARTINEZ M, HERRERO J M, SANCHIS J, et al. Applied Pareto multi-objective optimization by stochastic solver[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, 22(3): 455-465.
- [21] HERRERO J M, MARTINEZ M, SANCHIS J, et al. Well-distributed Pareto front by using the epsilon MOGA evolutionary algorithm[C] // International Work-Conference on Artificial Neural Networks, Heidelberg, German: Springer, 2007: 292-299.
- [22] COELLO C A C. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(11-12): 1245-1287.

收稿日期: 2016-09-02; 修回日期: 2016-11-30

作者简介:

汤晓青(1970—), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与高电压技术; E-mail: feiyingfy005@163.com

刘辉(1986—), 男, 工程师, 研究方向为带电作业技术; E-mail: 76984465@qq.com

范宇(1981—), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与高电压技术; E-mail: Scdyfanyu@163.com

杨胜杰(1987—), 男, 通信作者, 讲师, 主要研究电力市场运营与智能算法。E-mail: ysj427@163.com

(编辑 魏小丽)