

基于节能环保的水火电多目标调度策略

喻洁¹, 季晓明², 夏安邦¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省高淳供电公司, 江苏 高淳 211300)

摘要: 在国家节能减排的政策下, 新的发电调度方式如何与竞价上网的电力市场机制有机结合起来, 是一个值得研究的问题。主要考虑水电作为可再生能源的主要方式, 提出了一个市场环境下、考虑节能减排目标的水火发电计划多目标模型; 并提出一种改进的粒子群算法, 设计了多维粒子修正方法, 即根据各目标函数的权重系数, 修正粒子在目标空间的寻优路径。通过算例, 验证了该方法的简单有效性。最后通过基于相对熵均衡性评价模型, 对决策结果进行评价与选择。

关键词: 节能减排; 市场机制; 水火调度; 多目标决策

Multi-objective Hydro-thermal dispatch based on energy conservation and environmental protection

YU Jie¹, JI Xiao-ming², XIA An-bang¹

(1. Electricity Engineering Institute, Southeast University, Nanjing, 210096, China;

2. Jiangsu Provincial Electric Power Company, Gaochun Branch, Gaochun 211300, China)

Abstract: Under the national policy of energy saving and pollution reducing, how to combine new generation scheduling mode with the market mechanism is an issue worthy of further studying. Regarding hydropower as a main renewable energy, this paper puts forward a multi-objective model of hydrothermal power generation schedule in market environment. An improved PSO method is proposed, which modifies particle searching way based on weight factor of each objective function. The simulation results show this method is effective and feasible. Lastly, results are evaluated using relative entropy equilibrium model.

Key words: energy-saving & emission-reducing; market mechanism; hydrothermal dispatch; multi-objective decision-making

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2009)01-0024-04

0 引言

燃煤火电机组在生产电力的同时, 向大气中排放大量的污染气体。中国2007年SO₂排放高居世界第一。目前我国NO_x排放量估计在1000多万吨。为落实国家“十一五”规划提出的单位GDP能耗降低20%的战略目标, 发电环节将实行新的节能发电调度方式, 即在保障电力系统安全可靠运行的前提下, 优先安排清洁环保的可再生能源发电, 火力发电机组按照能耗和环保指标排序, 限制能耗高、污染重的机组发电。

我国部分地区水利资源丰富, 清洁环保的可再生能源中, 水力发电将是最简便可行的方式。然而在目前电力市场环境下, 水电并没有参与市场竞价。同时火力机组按照能耗与环保指标排序, 是否与市场机制中按竞价高低排序的原则相冲突? 节能发电主要考虑机组的能耗指标与污染物排放指标, 从而确定机组发电计划方案。电力市场交易则依据机组上报电价的高低来决定其发电的先后排序。从本质

上看, 两者都旨在降低能耗, 合理科学利用能源。然而, 在我国, 由于诸多因素, 通过市场机制并不能充分地发挥出节能降耗的目标。主要表现在以下几个方面:

1) 投资成本。电力建设投资成本巨大, 我国实行了短期还贷政策。新建设的大机组虽然实际生产成本较老机组低, 但还负担着还本付息的压力。因此, 在电力市场上报的电价中, 一般包括生产成本与投资成本。而对于高能耗的老机组, 大多已经完成了还贷任务, 在市场报价中可以只包括生产成本。这样, 基于市场竞价机制, 能耗低的新机组并不能占优势。

2) 节能环保成本。通常新建的大容量机组均配备了节能环保设备, 来降低能耗减少排污, 但这些投资使得单位电量生产成本增加。

3) 新能源技术成本。可再生能源(如风电、地热发电等)能耗低, 但新能源技术成本高, 也不在市场中占优势。

在电力市场改革的趋势下, 如何将环境保护与市场经济统一起来, 国内外学者从多方面进行了研究^[1~3]。为了综合协调各方面的因素, 本文提出了一个市场环境下水火电协调的日交易计划多目标模型。模型兼顾了电力市场交易的竞价公平性与环境保护之间的协调, 以火电购电费用最低, 火电污染气体排放最小和水电发电量最大为目标函数。

1 模型与分析

水火发电计划问题是个电力系统的传统难题, 在整个调度期内, 满足大量约束条件的前提下, 确定各水电厂的放水发电过程, 并合理安排各火电厂的发电出力。在考虑环保目标的市场竞争机制下, 水火发电计划不仅要考虑充分地利用水力资源, 最大限度地节省购电成本, 而且需要考虑控制火电机组的污染气体排放。因此本文构造了多目标的水火发电数学模型, 目标函数及约束条件如下。

1.1 目标函数

$$\min F_1 = \tau_1 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{Ns} C_i(P_{si}(t))P_{si}(t) \quad (1)$$

$$\min F_2 = \tau_2 \sum_{i=1}^{Ns} \alpha_{si} + \beta_{si} P_{si}(t) + \gamma_{si} P_{si}^2(t) \quad (2)$$

$$\max F_3 = \tau_3 \sum_{j=1}^{Mh} P_{hj}(t) = \tau_3 \sum_{j=1}^{Mh} C_{1j} V_{hj}^2(t) + C_{2j} Q_{hj}^2(t) + C_{3j} V_{hj}(t) Q_{hj}(t) + C_{4j} V_{hj}(t) + C_{5j} Q_{hj}(t) + C_{6j} \quad (3)$$

其中: F_1 表示购电费用, 因为水电不参与竞价, 因此是购买火电发电量的费用。 F_2 表示火电机组的污染气体排放量。 F_3 表示水电发电量。 $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 1$, 分别表示三个目标函数的权重。 P_{si} 是火电机组 i ($i=1, 2, \dots, Ns$) 的发电量, P_{hj} 是水电厂 j ($j=1, 2, \dots, Mh$) 的发电量 (决策变量)。 C_i 表示火电机组 i 的报价函数, 这里采用线性报价曲线 $C_i(P_{si}(t)) = a_i P_{si}(t) + b_i$ 。 $\alpha_{si}, \beta_{si}, \gamma_{si}$ 表示火电机组 i 的污染气体排放系数。 $C_{1j}, C_{2j}, C_{3j}, C_{4j}, C_{5j}, C_{6j}$ 是水电厂 j 的发电系数, $V_{hj}(t)$ 表示水电厂 j 的水库库容, $Q_{hj}(t)$ 表示水电厂 j 的发电流量。

1.2 约束条件

(1) 系统负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^{Ns} P_{si}(t) + \sum_{j=1}^{Mh} P_{hj}(t) = (1 + \sigma) P_D(t) \quad (4)$$

$P_D(t)$ 是系统在 t 时刻的负荷, σ

($0 < \sigma < 1$) 为系统网损或备用系数。

(2) 火电机组出力上下限约束

$$P_{si}^{\min} \leq P_{si}(t) \leq P_{si}^{\max} \quad (5)$$

$P_{si}^{\min}, P_{si}^{\max}$ 分别是火力机组 i 的出力上限和下

限。

(3) 火电机组加减载约束

$$P_{si}(t) - P_{si}(t-1) \leq R_{i,up} \quad (6)$$

$$P_{si}(t-1) - P_{si}(t) \leq R_{i,dn} \quad (7)$$

$R_{i,up}, R_{i,dn}$ 分别表示火电机组 i 的加载和减载速率限值。

(4) 水电厂出力上下限约束

$$P_{hj}^{\min} \leq P_{hj}(t) \leq P_{hj}^{\max} \quad (8)$$

$P_{hj}^{\min}, P_{hj}^{\max}$ 分别表示水电厂 j 的最大和最小出力。

(5) 水库库容和发电流量约束

$$V_{hj}^{\min} \leq V_{hj}(t) \leq V_{hj}^{\max} \quad (9)$$

$$Q_{hj}^{\min} \leq Q_{hj}(t) \leq Q_{hj}^{\max} \quad (10)$$

$V_{hj}^{\min}, V_{hj}^{\max}$ 表示最小和最大水库库容, $Q_{hj}^{\min}, Q_{hj}^{\max}$ 表示最小和最大发电流量。

(6) 水量平衡约束

$$V_{hj}(t+1) = V_{hj}(t) + I_{hj}(t) - Q_{hj}(t) - S_{hj}(t) + \sum_{k=1}^{Mh} \{Q_{kh}(t - T_{kj}) - S_{kh}(t - T_{kj})\} \quad (11)$$

$I_{hj}(t), S_{hj}(t)$ 分别表示水电厂 j 在 t 时段的自然来水流量和弃水流量; k 为位于水电厂 j 上游的水电厂, R_h 为位于水电厂 j 上游的水电厂个数, T_{kj} 为从水电厂 k 到水电厂 j 的水流到达时间。

2 多目标优化求解

水火发电计划从本质上讲是一个具有复杂约束条件的大型、动态、非凸、有时滞的混合整数非线性规划问题, 已有的解决方法概括起来主要有 2 类: 传统优化方法和现代智能启发式优化算法。传统优化算法的典型代表有等微增率法、动态规划、非线性

性规划、内点法、Lagrange 松弛法等。智能启发式算法有人工神经网络、模拟进化算法、蚁群算法、混沌优化等等^[4~7]。但这些方法都或多或少地存在一些缺陷文献[8]采用 PSO 算法求解水火优化问题,考虑火电机组成本为最小的单目标决策,取得了不错的效果。本文将改进的 PSO 算法应用于求解考虑环保目标的水火多目标决策。

2.1 PSO求解多目标

PSO系统中,每个备选解被称为一个“粒子”,多个粒子共存、合作寻优,每个粒子根据它自身的经验,在问题空间中向更好的位置“飞行”,搜寻最优解。每个粒子的位置按如下公式进行变化:

$$v_{id}(t+1) = w \times v_{id}(t) + \alpha_1 \times rand1() \times [pBest[i] - x_{id}(t)] + \alpha_2 \times rand2() \times [pBest[g] - x_{id}(t)] \quad (12)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad 1 \leq i \leq N, 1 \leq d \leq D \quad (13)$$

其中: $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$, 称为加速因子; $rand()$ 为[0, 1]之间的随机数; w 称为惯性因子。 $pBest[i]$ 代表粒子 i 所经历过的最好位置, $pBest[g]$ 表示群体中“最好”粒子的位置。粒子群初始位置和速度随机产生,然后按式(12)、(13)迭代。迭代中若位置和速度超过边界值则取边界值,直至找到满意解。

本文提出多维修正的PSO 算法,用于对多目标优化问题的非劣最优解集的搜索。算法在决策变量空间初始化一个粒子群,通过多目标优化问题中的各个目标函数来共同指导粒子在决策变量空间中的飞行,使其最终能落入非劣最优解集中;反映到目标函数空间,粒子将落入非劣最优目标域。如果只有目标函数 $\min F_1(x)$, 目标向量将沿着使 $F_1(x)$ 最小的方向变化;而存在多目标函数时,目标向量将沿着某一 $F_1(x), F_2(x)$ 不同时增大且 $F_3(x)$ 不减小的方向变化。本文采取目标向量的多维修正方法,使其最终到达非劣最优目标域。

如第 i 个粒子在第一目标函数下的极值为 $pBest[1, i] = \min F_1(X_i(t))$, 则其在第一目标函数下的全局极值为 $gBest[1] = \min pBest[1, i]$ 。全局极值的均值 $gBest = Average(gBest[1], gBest[2], gBest[3]) =$

$$(\tau_1 gBest[1] + \tau_2 gBest[2] + \tau_3 gBest[3]) / 3 \quad (14)$$

全局极值的距离

$$dgBest = Distance(gBest[1], gBest[2], gBest[3]) =$$

$$\left\{ (\tau_1 gBest[1] - \tau_2 gBest[2])^2 + (\tau_1 gBest[1] - \tau_3 gBest[3])^2 + (\tau_2 gBest[2] - \tau_3 gBest[3])^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中: τ_1, τ_2, τ_3 即三个目标函数的权重系数,体现目标函数的权重对修正距离与方向的影响。

对水电厂的发电流量和火电厂的发电功率,可以由微粒的位置取值范围直接实现。其他约束条件采用罚函数处理。

3 算例分析

本文算例包括 5 台火电机组和 4 个水电厂,其中,火电机组数据来自文献[9],水电厂数据来自文献[10]。本算例的计算周期为一个交易日,1 h 为一个时段,共 24 个时段。PSO 算法的参数设置如表 1。

表 1 PSO 算法参数

参数	值
种群个数	50
惯性因子 w	(0, 1)
加速因子 α_1, α_2	2
最大代数	20000

调整各目标函数权重系数,得到不同权重下三个目标函数的结果如表 2。

表 2 不同权重时计算结果

权重 (τ_1, τ_2, τ_3)	购电费用/千元	气体排放 /吨	水力发电 /MW
0.8, 0.1, 0.1	13 901.181 2	131.856 5	9 556.574 7
0.6, 0.2, 0.2	14 016.166 6	123.794 7	9 766.192
0.4, 0.3, 0.3	14 070.456 7	122.092 3	9 928.468 8
0.2, 0.6, 0.2	14 223.388 3	120.711 7	9 669.194 5
0.1, 0.1, 0.8	14 307.830 9	133.213 6	10 047.241 6

由文献[11]提出的基于相对熵的决策属性均衡性评价模型,定义归一化后的输入向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 熵为:

$$S = - \sum_{i=1}^m [(x_i / \sum_{j=1}^m x_j) \log(x_i / \sum_{j=1}^m x_j)] \quad (16)$$

定义相对熵为:

$$S_x = \frac{S_{\max} - S}{S_{\max}} \quad (17)$$

由熵的性质可知, $S_x \in [0, 1]$ 。 S_x 越小,输入向量各分量越接近,越均衡。基于相对熵的评价模型,如下式:

$$y = (1 - \alpha S_x) W X^T \quad (18)$$

其中: y 为输出评价; X^T 为输入向量; W 为权重向量, 即 τ_1, τ_2, τ_3 ; α 为均衡性重要程度系数。

将不同权重系数下的计算结果(表2), 归一化后, 作为输入向量 $X=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, 当 α 取不同的值时, 也即决策者对均衡性的重视程度不同, 输出评价结果如表3。

表3 不同 α 时的评价结果

Tab3. Evaluation results when different α

α	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
1	0.270 5	0.431 7	0.812 4	0.462 8	0.305 4
0.8	0.396 2	0.553 1	0.760 5	0.612 7	0.388 2
0.2	0.532 1	0.674 2	0.401 6	0.721 5	0.494 7
0	0.893 4	0.435 6	0.286 4	0.510 7	0.732 5

决策者可以依据对各目标均衡性的重视决定 α 的取值, 从而选取满意的结果。

4 结语

本文提出的多维粒子修正算法有效地依据目标函数的权重, 修正粒子的寻优路径, 从而顺利求解了不同权重系数下的水火发电优化多目标决策问题。基于相对熵的均衡性评价模型可以根据决策者对目标均衡性的重视程度, 对结果进行评价与选择。本文的水火协调计划决策模型, 将节能减排政策与电力市场竞争机制相结合, 兼顾了市场环境火电机组竞价的公平性与环境保护之间的协调。算例证明, 本文的多目标决策方法是有效和可行的。

参考文献

- [1] Bo Lu, Mohammad Shahidehpour, Unit Commitment With Flexible Generating Units[J]. IEEE Trans on P.S., 2005,20(2): 1022-1034.
- [2] Jaeseok Choi, Sangheon Jeong, Shi Bo, et al. CO₂, SO_x and NO_x Emissions Constrained Multi-Criteria-Best Generation Mix Using Fuzzy Set Theory[A]. In: 2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering[C]. 2007.118 - 124.
- [3] Kim S G. Evaluating the Impacts of Environmental Constraints on Ancillary Service in Integrated Energy and Reserve Market[A]. In: 2006 International Conference on Power System Technology[C].
- [4] Rang Jian-xin, Luh P B. Hydrothermal Scheduling Via Extended Differential Dynamic Programming and Mixed Coordination[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4): 2021-2028.

- [5] Ziad K, Shawwash, Thomas K, et al. The Hydro Short-term Term Scheduling Optimization Model[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 2000, 15(3): 1125-1131.
- [6] Hicks R H, Gagnon C R. Large Scale Nonlinear Optimization of Energy Capability for the Pacific Northwest Hydroelectric System[J]. IEEE Transactions on PAS, 1974, 5(7): 1010-1015.
- [7] 何光宇, 邓琨, 李祖毅. 新的非线性最小费用循环流算法及其在电力系统经济运行中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23(10): 40-43.
HE Guang-yu, DENG Kun, LI Zu-yi, et al. A Novel Nonlinear Minimum Cost Cycle Flow Algorithm And its Application in Economic Operation of Power System[J]. Power System Technology, 1999, 23(10):41-44.
- [8] Coello Coello C A, Lechuga M S. MOPSO : A proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization[C]. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2002), Honolulu , Hawaii , USA ,2002.
- [9] 马瑞, 刘建华, 穆大庆. 基于双目标模糊优化的电力市场短期交易计划新模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003,15(1):33-36.
MA Rui, LIU Jian-hua, MU Da-qing. A Novel Model of Double-Objective Fuzzy Optimization Short Term Trade Planning For Electricity Market[J]. Proceedings of the EPSA,2003,15(1):33-36.
- [10] Basu M. An Interactive Fuzzy Satisfying Method Based on Evolutionary Programming Technique for Multiobjective Short-term Hydrothermal Scheduling[J]. Electric Power Systems Research,2004.277-285.
- [11] 孙隼华, 刘卫宁, 宋伟. 基于相对熵的决策属性均衡性评价模型[J]. 系统工程理论与实践, 2001(06):83-85.
SUN Di-hua; LIU Wei-ning; SONG Wei. A Model with the Evaluation of the Equilibrium of Attribute Indexes Based on the Relative Entropy Measuring[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2001(06):83-85.

收稿日期: 2008-03-04; 修回日期: 2008-11-14

作者简介:

喻洁(1975-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与技术支持; E-mail: friendlyyu2000@yahoo.com.cn

季晓明(1974-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力市场运行运营与经营管理;

夏安邦(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为系统仿真与建模。