

大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解

贺建波, 胡志坚, 刘宇凯

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 考虑水、火、风能源各自的自然特性和某省级电网工程实际要求, 在风电全额上网的前提下, 以上网电价费用最小和煤耗量排放最小为目标, 同时考虑火电、水电机组出力平滑性约束和各水电厂调度日总出力定值等约束, 建立动态多目标风-火-水协调优化调度模型。由于所建立的模型是一个大规模、多维数, 多时段、多约束非连续问题, 直接求解较困难。为此, 在求解阶段, 结合分层求解思想, 通过应用提出的改进多目标“教”与“学”优化算法(Modified Multi-Objective Teaching-Learning Algorithm, MMTLA)进行求解。以某省级电网某一典型调度日实际数据进行仿真验证, 结果表明, 所建立的模型的有效性以及所提出算法的优越性。

关键词: 上网电价; 水-火-风协调调度; 多目标调度; 反向学习; MMTLA

Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model

HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yukai

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Considering practical requirements of a provincial power grid project and natural characteristics of hydro power, fire power and wind power, in the premise of full amount of wind power integrated into the grid, with minimum the power purchase cost and emissions as the objective, taking into account the thermal and hydropower units' output smoothness constraints and each day hydropower scheduling fixed constraints, a dynamic multi-objective water-fire-wind coordination optimal scheduling model is built. In order to simplify the solution of the built model, this paper proposes a new constraint processing methods. Through the introduction of quasi-opposition-based learning and self-learning mutation, an improved multi-objective "teaching" and "learning" optimization algorithm (MMTLA) is got and applied to solve the model. Taking a provincial power grid as an example, the simulation results show the validity of the built model and the superiority of the proposed algorithm.

This work is supported by Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20110141110032).

Key words: power purchase cost; water-fire-wind coordination scheduling; multi-objective dispatch; quasi-opposition-based learning; MMTL

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0001-07

0 引言

风电并网对于电网节能减排具有重要意义, 但风电出力具有随机波动性, 且现有出力预测方法存在较大的预测误差, 这给电力系统调度严峻考验^[1]。

目前国内外专家主要采用建立概率模型来处理风电。文献[2]考察了风储协调调度模型, 考察了风电和储能系统互补对系统消纳风电能力的影响; 文献[3]将风电成本纳入经济调度建模中; 文献[4]建立了基于风电极限穿透功率的经济调度优化模型。

目前, 国内外对电力系统调度问题的研究主要集中于传统火电系统经济调度和风火联合调度^[5-7], 而针对风-火-水协调优化调度的文献还较少。因此, 制定合理的考虑风-火-水各自特性的调度方案显得

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110141110032); 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室资助(EIPE13205)

尤为重要。文献[8]以火电发电成本和出力波动最小为目标函数，但是没有考虑到火电机组排放对环境的影响；文献[9]在三公调度背景下，以发电成本为目标函数，建立安全约束的多种能源调度模型，但对各种能源纳入电网后的相互影响描述不够清晰。

为适应风电出力的波动性，常规火电机组或水电机组需要频繁调整机组出力^[9]，这会缩短机组使用寿命、增加调度员的工作量，影响系统安全。国内外文献为了追求模型最优解大都忽略了这一点，而在实际调度中该因素不可忽略。此外，从电网公司侧考虑，希望从各能源侧购电费用最小。此外，所考查的某省级电网含水电厂调度日总出力要求为定值，需要在模型中体现出来。

本文在风电全额上网的前提下，以火电机组煤耗量最小和火、水电机组上网电价最小为目标函数，考虑火、水电机组调整次数约束、水电厂调度日总出力定值等约束，建立动态多目标调度模型。本文所考察的某省网公司含 15 个火电厂、28 个水电厂以及一个风电场，此外，除含有机组出力约束等“横向约束”，还含有各个水电厂一个调度日总出力为定值的“纵向约束”，因此所建立的模型为多维非线性、不连续的多目标优化问题，传统方法难以求解。本文通过引进近似反向学习和自学变异操作，得到新型教与学优化算法(NMTLA)来求解所建立的模型，此外，针对水电厂调度日总出力定值约束，本文提出一种两层出力方法，从而大大简化了模型的求解。为了验证 NMTLA 优越性，将其与经典多目标粒子群(MPSO)^[10]、多目标“教”与“学”(MTLA)^[11]算法进行比较。

1 调度模型

1.1 目标函数

(1) 能耗调度目标：火电机组煤耗量最小

$$\min F = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(P_{Gi,t}) \quad (1)$$

式中： F 为一个调度日内的系统总耗煤量； T 为调度时段数，调度机构一般每隔 15min 进行一次调度，故 24 h 时之内有 96 个调度时段； N 为参与调度的火电机组总数； $P_{Gi}(t)$ 为火电机组 i 在时段 t 的有功出力； $f_i(P_{Gi}(t))$ 为火电机组 i 的煤耗特性曲线。

火电机组的煤耗特性曲线可用二次函数进行拟合得到，火电机组 i 的煤耗特性曲线具体形式如式(2)所示。

$$f_i(P_{Gi}(t)) = a_i P_{Gi}(t)^2 + b_i P_{Gi}(t) + c_i \quad (2)$$

式中， a_i 、 b_i 、 c_i 分别为火电机组 i 的煤耗特性系数。

(2) 经济调度目标：系统购电费用最小

系统在一个调度周期内的总购电费用函数为

$$\min C = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^n Q_j P_{Gj,t} + \sum_{j=1}^{nh} HQ_j P_{HGj,t} \right) \quad (3)$$

式中： C 为水电机组的总购电费用； $P_{HGj,t}$ 为水电机组 j 在 t 时刻出力； Q_j 、 HQ_j 分别为火、水电厂 j 的电价； nh 为水电机组数； $P_{Gj,t}$ 为火、水电厂 j 的在时段 t 的有功出力。

按照某省级电网调度要求，由于各个水库提前规划各个水电厂发电水量，而水电是清洁能源，应全额上网，所以各个水电厂出力在一个调度日内是固定不变的。而水电上网电价费用与水电出力呈一次线性关系，因此，水电厂上网电价费用是固定的。

1.2 约束

(1) 火、水电机组出力平滑约束

火、水电机组的频繁调整不仅会影响机组运行寿命，还会增加调度人员工作量。为了尽量减少调整次数，本文设置以下约束：

以火电机组为例，

$$\begin{cases} \text{若 } |P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1}| \geq \Delta_i \\ \text{则 } |P_{Gi,t} = P_{Gi,t-1}| \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

其中， Δ_i 为各台机组的变化幅度，在运行中根据各个台机组出力变化范围进行设定。

本文根据机组以下公式确定：

$$\Delta_i = \left\lceil \alpha P_{Gi,\max} / 5 \right\rceil \times 5, \quad \text{其中 } \alpha \text{ 为调整系数； } P_{Gi,\max} \text{ 为机组 } i \text{ 最大出力。}$$

该约束通过约束机组出力相邻时段变化幅值，这是因为在实际求解过程中有大量机组相邻时段的出力变化幅值不大，这就可以通过将这些不大的变化通过一台大功率机组进行平衡，这就可以减少整个系统中机组出力的调整次数。

(2) 水电机组调度日出力定值约束

$$\sum_{t=1}^T P_{HGj,t} = HP_i \quad i = 1, 2, \dots, nh; t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

该约束的意图是使得水库在调度日前安排的调度用水不浪费，全额上网。

(3) 火电机组出力上下限约束

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi,t} \leq P_{Gi,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

式中： $P_{Gi,\min}$ 、 $P_{Gi,\max}$ 分别为火电机组 i 的最小有功出力和最大有功出力； $P_{Gj,\min}$ 、 $P_{Gj,\max}$ 分别为水电厂 j 的最小有功出力和最大有功出力。

(4) 水电振动区约束

不含振动区约束的水电厂，其出力约束为

$$\begin{aligned} P_{HGj,\min} \leq P_{HGj,t} \leq P_{HGj,\max} \\ j = 1, 2, \dots, hn; t = 1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $P_{HGj,\min}$ 、 $P_{HGj,\max}$ 分别为水电厂 j 的最小有功预测出力和最大有功预测出力。

含振动区约束的水电厂, 其出力约束为

$$\begin{cases} P_{HGj,\min} \leq P_{HGj,t} \leq P_{HGj,l1} \\ P_{HGj,u1} \leq P_{HGj,t} \leq P_{Gj,l2} \\ \dots \\ P_{HGj,uk} \leq P_{Gj,t} \leq P_{HGj,\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: k 为水电厂 j 的振动区个数; $P_{Gj,l1}$ 为水电厂 j 第 1 个振动区的下限值; $P_{HGj,u1}$ 为水电厂 j 第 1 个振动区的上限值; $P_{HGj,uk}$ 为水电厂 j 第 k 个振动区的上限值。

(5) 系统功率平衡约束

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_{Gi,t} + \sum_{j=1}^{hn} P_{Gj,t} + P_{W,t} = P_{D,t} + P_{\text{loss},t} \\ t = 1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $P_{Gi,t}$ 为火电机组 i 时段 t 的有功; $P_{Gj,t}$ 为水电机组 j 在时段 t 的有功; $P_{W,t}$ 为风电场在时段 t 的有功预测值; $P_{D,t}$ 为系统在时段 t 的总负荷; $P_{\text{loss},t}$ 为系统在时段 t 的总网损(本文计网损)。

(6) 火电系统爬坡速率约束

$$-DR_i \leq P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq UR_i \quad (10)$$

式中: DR_i 为火电机组 i 的在一个调度时段内允许关闭的最大出力; UR_i 为火电机组 i 在一个调度时段内允许增开的最大出力; $P_{Gi,t-1}$ 为火电机组 i 在前一时刻的出力值。结合式(6), 火电机组 i 出力范围约束调整为

$$\max(P_{Gi,\min}, P_{Gi,t-1} - DR_i) \leq P_{Gi,t} \leq \min(P_{Gi,\max}, P_{Gi,t-1} + UR_i) \quad (11)$$

(7) 火电系统旋转备用约束

风电并网后, 火电系统的上旋转备用约束修正为

$$\sum_{i=1}^N R_{Gi,t}^u \geq P_{D,t} \times L\% + P_{W,t} \times w_u\% \quad (12)$$

式中: $L\%$ 为系统对正旋转备用的需求, 取系统总负荷的 7%~10%; $R_{Gi,t}$ 为机组 i 在时段 t 的出力, 且有: $R_{Gi,t}^u = \min(P_{Gi,\max} - P_{Gi,t}, UR_i)$, $R_{Gi,t}^u$ 为火电机组 i 在时段 t 的正旋转备用容量; $P_{W,t} \times w_u\%$ 为系统为应对风电出力预测误差对正旋转备用, $P_{W,t}$ 为风电场在时段 t 的出力预测值, $w_u\%$ 大于电场出力预

测允许的最大误差, 一般取为 20%。

1.3 约束处理

由于本文考察的某省网含水电机组较多、考察时刻较多, 而对于约束(2)的处理国内外相关文献尚未有现成方法。为此, 本文提出了一种分层解决方法:

第一层: 将水电作为一个整体, 类比于一个水电机组, 和火电、风电一起优化, 从而得到关于各个火电机组和水电整体的出力。

第二层: 将水电出力再一次细分到各个水电厂, 以水电厂的上网电价最小为目标函数。

上述约束处理方法的优势在于在优化火电机组出力时, 将 28 个水电机组缩减为 1 个“水电厂”, 大大减少了问题的维数和难度, 而这样做并不影响目标函数 1(火电机组煤排放)。在得到水电整体处理后再根据水电机组上网电价费用最小进一步细化各水电厂出力。

2 新型多目标“教”与“学”优化算法

2.1 教与学优化算法

TLA算法是Rao等人于2010^[12]年提出的一种新的群智能优化算法, 它模拟了教师给学员的教学过程和学员的学习过程, 目的是通过教师的“教”和学员之间的相互“学习”来提高学员的学习成绩。与其他智能算法相比, TLA最大的优势是参数少, 真个算法不需要任何设定参数值工作, 这就大大减少了解决问题的时间和增强了算法的鲁棒性, 此外, 该算法具有极强的收敛速度^[12-14]。TLA算法从提出到现在短短的时间, 已经引起很多学者的关注, 并且得到了很好的应用^[13-14], 基本TLA具体操作见文献[12], 这里只介绍其重要操作。

“教”环节:

$$\begin{cases} X_{\text{new}}^i = X_{\text{old}}^i + \text{difference} \\ \text{difference} = r_i \times (X_{\text{teacher}} - TF_i \times \text{mean}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: X_{new}^i 为得到的新的粒子; mean 为该迭代次数产生的所有例子的平均值, $\text{mean} = \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} X^i$,

NP 是总的粒子数; TF_i 为粒子 i 的学习因子, $TF_i = \text{round}[1 + \text{rand}(0,1)]$, $r_i = \text{rand}(0,1)$ 。

“学”环节:

$$X_{\text{new}}^i = \begin{cases} X_{\text{old}}^i + r_i \times (X^i - X^j) & f(X^j) < f(X^i) \\ X_{\text{old}}^i + r_i \times (X^j - X^i) & f(X^i) < f(X^j) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $f(X^i)$ 、 $f(X^j)$ 分别表示粒子 i 、 j 的适应度值。

经典的TLA算法虽然有极快的搜索速度^[12], 但

却容易过早丢失粒子的多样性从而陷入局部最优。本文通过引入近似反向学习操作和自我学习变异操作,具体操作如下:

1) 反向学习

为了提高智能算法的收敛速度, Tizhoosh在文献[15]提出一种反响学习操作(opposition-based learning),该操作同时将某粒子及其反向位置的粒子作为最优解考察对象,相关研究人员已经验证该操作可以有效提高每一次迭代找到全局最优解的几率^[16],并已被应用于提高多种智能算法如GSA^[17]和HSA^[18]性能并取得了良好效果。

定义1: 反向学习(opposition-based learning)

$$X_{i,j}^{t,*} = \min(X_{i,j}^t) + \max(X_{i,j}^t) - X_{i,j}^t \quad (15)$$

式中: t 为当前演化代数, $i=1,2,\dots,Popsiz$, $j=1,2,\dots,D$, $X_{i,j}^t$ 表示当前种群的第 i 个粒子的第 j 维上的分量, $\min(X_{i,j}^t)$, $\max(X_{i,j}^t)$ 分别表示 i 粒子在 j 维的上下限, $X_{i,j}^{t,*}$ 对应的为其反向解, $Popsiz$ 为种群规模大小, D 为问题维数。

然而相关研究表明,近似反向粒子(quasi-opposition number)靠近最优解的概率更大^[19-20],因此本文引入近似动态反响学习操作对 MTLA 算法进行改进。

定义 2: 近似动态反向学习(Dynamic quasi-opposition-based learning)

$$X_{i,j}^{t,*} = rand * (\min(X_{i,j}^t) + \max(X_{i,j}^t)) - X_{i,j}^t \quad (16)$$

2) 自学习变异

在实际生活中,学生主要的学习方式除了向老师、同学学习还存在自学,但在基本教与学优化算法中却没有自学机制,因此本文提出一种自学变异机制。

本文提出的自学变异机制为

$$X_{new,i}^j = X_{old,i}^j + rand(0,1) \times (X_i^{U,j} - X_i^{L,j}) \quad (17)$$

式中: $X_i^{U,j}$ 、 $X_i^{L,j}$ 分别为粒子 i 对于 j 维上的上下限, $i=1,2,\dots,d$ 。

本文采用的折中解求解方案见文献[21]。

2.2 基于动态近似反向学习和自学变异的 MMTLA 算法流程

自学变异多目标反向学习 TLA 算法解决多目标问题的算法描述如下:

- a) 算法初始化。1)初始化种群,并评价粒子;
- 2)初始化备用选择集和 Pareto 最优解集。
- b) 选择种群中适应值最好的个体作为教师。
- c) 根据式(13)、式(14)进行“教”与“学”操作,

得到新的粒子。

d) 对新的粒子判断是否进行反向学习,是,进行反向学习;否,进行自我学习变异。从而再得到一组新的粒子。

e) 对新的粒子进行约束处理,使其满足约束后评价新的粒子,更新粒子和“教师”。

f) 根据支配定义更新备用选择集与Pareto最优解集。将求得的非支配解存储到备用选择集中,并将其中的可行解存储到Pareto最优解集中;基于支配定义备用选择集与Pareto最优解集中的支配解;检查备用选择集与Pareto最优解集中的个体数,若大于设定值,则基于K最邻近距离和删除多余个体,直到备用选择集中的个体数满足要求为止。

g) 基于支配定义和K最邻近距离和对备用选择集与Pareto最优解集进行修整。

h) 判断是否达到最大迭代次数,是,则停止迭代;否,则迭代次数加1,返回步骤b)进行迭代。

i) 输出 Pareto 最优前沿,根据决策者意愿选择折中最优解。

3 某省级电网算例分析

3.1 算例设置及求解

某省级电网含 24 台火电机组和 28 个水电厂,且各个水电厂含多台机组。由于各水电厂机组上网电价相同,而上网电价费用与出力为线性一次函数,故在可将各个水电厂作为一个整体考虑。一个调度日含 96 各调度时段(每个调度时段为 15min)。某一典型调度日风电场预测出力以及系统预测负荷如图 1 所示, α 取值 0.2。

分别采用 MMTLA 算法和 MTLA 算法、MPSO 算法独立计算 50 次,采用 Matlab 2012a 编写程序,取平均值。各算法的求解结果如表 1 所示,得到的 Pareto 最优前沿见图 2 所示,MMTLA 算法求得的新调度方案和原有调度方案比较如表 2 所示。限于篇幅,这里仅列出 5 台火电机组和 5 个水电厂出力曲线,分别如图 3 和图 4 所示。水电机组上网电价总费用是 13986680.53 元;风电上网电价费用为 208860 元。

3.2 约束 1 对于调度计划的影响

为了考察约束 1 设置不同约束值对于调度计划的影响,本文将 α 分别取 0.1 和 0.3,予以考察,所得到的两个目标函数变化见表 2。

3.3 结果分析

1) 由图 2 所示,MMTLA 算法得到的 Pareto 前沿比 MPSO 算法和 MTLA 算法得到的 Pareto 前沿均更为光滑,更接近真实 Pareto 前沿。分析表 2 可

知, MMTLA 算法能够找到更优的折中解, 说明所提出的操作对 MTLA 算法的改进具有明显的效果。MTLA 算法在三种算法中收敛速度最快, 但是求解精度最差, 而 MMTLA 算法的收敛速度差于 MTLA 算法, 但收敛速度快于 MPSO 算法。

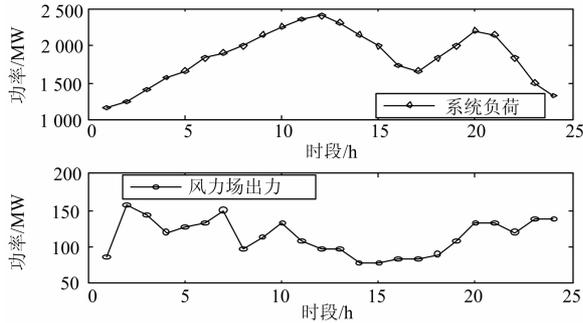


图 1 系统某一日 24 时段负荷值和风电场 C 出力预测曲线图

Fig. 1 System load values and output forecast of wind farm C in 24 hours a day

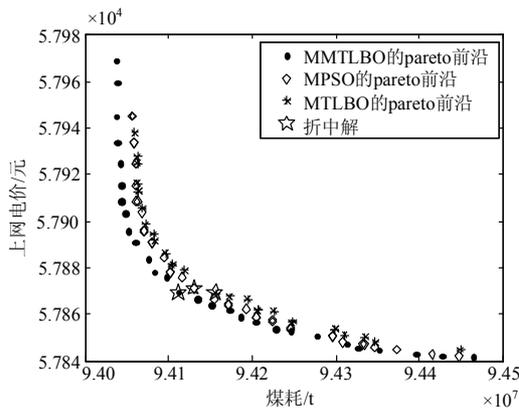


图 2 各算法求得的 Pareto 最优前沿比较

Fig. 2 Comparison of different algorithms' Pareto fronts

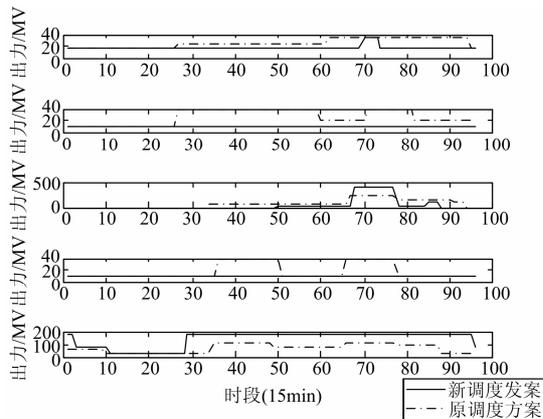


图 3 新调度方案与原调度方案水电厂出力曲线

Fig. 3 Hydropower units' output curve of new dispatching solution and the original dispatching solution

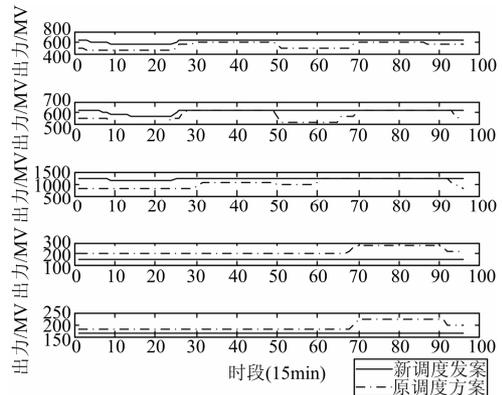


图 4 新调度方案与原调度方案火电机组出力曲线

Fig. 4 Coal units' output curve of this new dispatching solution and the original dispatching solution

表 1 计算结果比较

Table 1 Result of scheduling solution

算法	目标	购电费用/元	煤耗量/t	时间/s
MMTLA	购电费用最小	94 037 372.09	57 968.44	35.2
	煤耗量最小	94 464 919.13	57 841.61	
	折中最优解	94 112 000.11	57 869.12	
MPSO	购电费用最小	94 057 642.02	57 945.17	37.8
	煤耗量最小	94 446 070.01	57 841.97	
	折中最优解	94 130 000.57	57 871.31	
MTLA	购电费用最小	94 060 184.00	57 937.78	34.2
	煤耗量最小	94 447 959.11	57 844.86	
	折中最优解	94 155 594.76	57 869.21	

表 2 不同情形下所求得调度方案结果对比

Table 2 Result of scheduling solution in different cases

方案	系统总购电费 用/元	总煤耗 量/t	总调整次 数/次
原调度方案	108 656 915.03	58 858.17	251
本文调度方案(情形 1)	108 307 409.21	57 831.40	211
本文调度方案(情形 2)	108 307 540.64	57 869.12	170
本文调度方案(情形 3)	109 308 611.32	57 962.11	152

2) 分析表 2 可知, MMTLA 算法得到的新调度方案较原调度方案在该一个调度日内节省 349 374 元的费用和 989.05 吨的煤耗量, 从而大大节省了调度部门的购电费用和减少了火电厂的煤耗量, 创造了良好的经济效益和社会效益。此外, 本文的调度方案中火电、水电机组总的调整次数为 170 次, 比原来减少 81 次, 大大减少了机组出力调整次数, 从而验证了所建模型的有效性。

3) 由表 2 可以看出, α 值会影响模型求解结果, 初始阶段, 随着 α 的增大, 所求的调度方案上网电价费用和煤耗量会增大, 但是调整次数变小; 当 α 超过 0.4 之后, 无法找到合适的解, 这是因为此时

无法满足功率平衡。因此在工程实际中,应根据实际对煤耗量、上网电价费用、机组调整次数的要求,合理选择 α 值。

4 结论

本文以系统上网电价费用最少和煤耗量最小为目标函数,建立计及火电、水电机组出力调整次数约束、水电厂调度日出力定值约束的多目标风-火-水协调调度模型,并采用MMTLA算法进行求解,求解结果表明:

1) 该调度模型可以为省级电网制定更为经济和低煤耗量的调度方案,显著提高了经济效益和社会效益。此外,该调度模型能够减少机组的调整次数和平滑出力。

2) 所提出的MMTLA算法具有比MPSO算法和MTLA算法更为优越的搜索性能和收敛性能,且具有较快的收敛速度。

3) 考察了约束1对目标函数和调整次数的影响,调整次数越多,求取的调度方案越优。

参考文献

- [1] LIU Guodong, TOMSOVIC K. Quantifying spinning reserve in systems with significant wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2385-2393.
- [2] 张鹏, 刘继春, 吕林, 等. 基于风蓄协调的节能调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 29-34.
ZHANG Peng, LIU Jichun, LÜ Lin, et al. The energy-saving dispatch based on the coordination between pumped storage hydro and wind energy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 29-34.
- [3] 任博强, 彭鸣鸿, 蒋传文, 等. 计及风电成本的电力系统短期经济调度建模[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 67-72.
REN Boqiang, PENG Minghong, JIANG Chuanwen, et al. Short-term economic dispatch of power system modeling considering the cost of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 67-72.
- [4] 袁铁江, 晁勤, 李义岩, 等. 基于风电极限穿透功率的经济调度优化模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 15-22.
YUAN Tiejia, CHAO Qin, LI Yiyang, et al. Research on optimization model of economic dispatch based on wind power penetration limit[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 15-22.
- [5] 喻杰, 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 sub-area coordinated optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 129-136.
- [6] 吴杰康, 李金艳, 黄荣雄. 基于机会约束规划的电力系统安全定价随机模型与算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 160-166.
WU Jiekang, LI Jinyan, HUANG Rongxiong. A stochastic model and algorithm for security pricing of power systems based on chance-constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 160-166.
- [7] 葛亮, 谢宇翔, 李湘祁, 等. 与市场机制相协调的发电交易与调度的节能减排方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 167-173.
GE Liang, XIE Yuxiang, LI Xiangqi, et al. The method about energy saving and emission reduction of power generation transaction dispatch conformed to market mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 167-173.
- [8] 朱泽磊, 周京阳, 潘毅, 等. 考虑电力平衡的安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 168-176.
ZHU Zelei, ZHOU Jingyang, PAN Yi, et al. Security constrained economic dispatch considering balance of electric power and energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 168-176.
- [9] 孙荣富, 张涛, 梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 70-76.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 70-76.
- [10] ABDO M A. Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem[J]. Electric Power Research, 2009, 79(7): 1105-1113.
- [11] RAO R V, PATEL V. Multi-objective optimization of heat exchangers using a modified teaching-learning-based optimization algorithm[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(3): 1147-1162.
- [12] RAO R V, SAVSANI V J, VAKHARIA D P. Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems[J]. Computer Aided Design, 2011, 43(3):

- 303-315.
- [13] NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOOEE R, AGHAEI J. A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 13(3): 749-763.
- [14] RAO R V, SAVSANI V J, BALIC J. Teaching-learning-based optimization algorithm for unconstrained and constrained real parameter optimization problems[J]. Engineering Optimization, 2012, 44(2): 1447-1462.
- [15] TIZHOOSH H. Opposition-based learning: a new scheme for machine intelligence[C] // Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, Austria, November 28-30, 2005: 695-701.
- [16] RAHNAMAYAN S, TIZHOOSH H R, SALAMA M M A. Opposition versus randomness in soft computing techniques[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(2): 906-918.
- [17] SHAW B, MUKHERJEE V, GHOSHAL S P. A novel opposition-based gravitational search algorithm for combined economic and emission dispatch problems of power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 35(1): 21-33.
- [18] CHATTERJEE A, GHOSHAL S P, MUKHERJEE V. Solution of combined economic and emission dispatch problems of power systems by an opposition-based harmony search algorithm[C] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 39(1): 9-20.
- [19] RAHNAMAYAN S, TIZHOOSH H R, SALAMA M M A. Quasi oppositional differential evolution[C] // Proceeding of IEEE Congress on Evolution Computation, CEC 2007, September 25-28, 2007: 2229-2236.
- [20] ROY P K, MANDAL D. Quasi-oppositional biogeography-based optimization for multi-objective optimal power flow[J]. Electric Power Components and Systems, 2011, 40(2): 236-256.
- [21] 吕清洁. 含风/水/火电的电力系统动态经济调度和节能调度[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
-
- 收稿日期: 2014-06-13; 修回日期: 2014-07-31
- 作者简介:
- 贺建波(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为含新能源接入的电力系统优化调度; E-mail: jianbohe0523@163.com
- 胡志坚(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源与分布式发电。E-mail: zhijian_hu@163.com
- (编辑 张爱琴)