

水火电力系统短期实用化调度模型及求解方法

仇梦林,胡志坚,王小飞,胡梦月

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 以某电网的大型水火电力系统为研究对象,从节能降耗及与生产实际接轨的角度出发,基于水火电力系统的解耦机制,将水火联合调度问题建模为 2 个具有优化时序的子优化问题。在火电优化子问题中,在考虑常规约束的基础上,提出火电机组出力升降走向约束及相邻时段火电总负荷波动阈值约束,以保证火电机组出力平滑;在水电优化子问题中,考虑水电厂日平均出力约束及振动区约束,以保证水电的充分利用。采用改进的具有柔性更新策略的教与学优化算法依次求解 2 个子优化问题,并针对 2 个子优化问题中呈现强耦合性的复杂约束,设计不同的启发式约束处理方法。对含有 15 座火电厂和 29 座水电厂的某水火电力系统的日前调度进行仿真测试,验证了所提调度模型的可行性和实用性及求解方法的有效性。

关键词: 水火电力系统; 实用化调度模型; 机组出力平滑性约束; 教与学优化算法; 启发式约束处理; 柔性更新策略

中图分类号: TM 862

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.018

0 引言

水火电力系统的短期优化调度是在满足系统负荷需求以及各种复杂约束的条件下,利用优化的方法制定出一个调度周期内的水火电最佳出力计划,以实现系统的燃料总耗量最小或成本最低。水火电联合调度符合低碳、节能的新调度机制^[1],长期以来都是国内外学者关注和研究的热点。

在水火电力系统调度模型方面的研究中,现有文献^[2-11]主要从经济或节能的角度出发,调度模型多以总发电成本、总燃料费用或火电煤耗量最小等为调度目标。不同的是,各文献根据各自系统特点,分别建立了与系统特点和要求相适应的调度模型,如对火电开机机组问题的考虑:文献[2]基于开停机时间约束考虑了机组组合问题;文献[3]则通过检修计划、比耗量等因素确定开机机组数,对未选中机组,在调度过程中不予考虑,减少了优化问题的寻优空间;而其他多数文献则不考虑火电开机机组确定问题。对水电约束问题的考虑:文献[4-9]考虑了梯级水电的动态水量平衡约束;而文献[3,10-11]则对水电模型进行简化,仅考虑了水电的上下限约束和日流量约束。上述研究具有基础性和前瞻性,但部分研究的建模还缺少对实际因素的考虑,如实际系统在安排火电机组的开机计划时要综合各火电厂的三公电量完成率、日检修计划、事故备用等,且参与开机计划的机组,在日调度周期内通常不会在中途处于停机状态;

制定火电机组发电计划曲线时,在寻求经济最优或能耗最小的同时,还应使曲线平滑无毛刺以便在实际运行中更容易控制和实施^[12];安排水电出力时应避开其振动区以保证水电机组的寿命和安全运行^[13];在水电占比较大的系统中,通常有专门的水调自动化系统编制水电计划,且在实际系统中真正考虑库容、水头等梯级约束^[14]的水火协调调度并不多见^[15],实际系统在制定水火协调计划时考虑的主要是水电的出力上下限预测值约束、日平均出力预测值约束和振动区约束。对这些实际因素考虑的缺乏,可能致使调度结果在实际中难以被执行。

近年,随着群智能优化理论不断发展,差分进化算法^[16]、粒子群优化算法^[17]等都被应用到水火联合调度的求解中。群智能算法对优化问题无连续、可微、凸性要求,概念简单,容易实现^[18],易于处理复杂动态约束,逐渐成为优化领域研究的热点。但多数群智能算法存在敏感参数对优化结果影响大的难题,此外,群智能算法在处理优化问题的约束时,多采用惩罚函数法^[9]或者惩罚函数法与其他机制相结合^[19]的方法来处理约束,但惩罚函数法涉及大量惩罚因子,其选择困难而复杂^[20]。相比惩罚函数法,文献[8]采用启发式约束处理方法求解带约束优化问题,提高了求解效率。

基于上述背景,本文针对具体的系统,先建立了一种系统化的、更加符合工程实际的水火电协调调度模型,利用水火电系统的关联约束,将水火联合调度问题解耦为具有优化时序的火电子优化问题和水电子优化问题,在考虑常规约束的基础上,增加了控制火电机组出力曲线形状的约束,考虑了具有非线性特征的水电振动区约束等;然后,采用一种无需敏

收稿日期:2016-02-09;修回日期:2016-10-13

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(201101-41110032)

Project supported by the Special Scientific and Research Funds for the Doctoral Program of Higher Education(201101-41110032)

感参数设置的教与学优化 TLBO (Teaching-Learning-Based Optimization) 算法^[21-23]依次求解 2 个子问题,并针对模型中的强耦合约束设计了相应的启发式约束处理方法以提高求解效率;最后,对南方某省级电网的实际算例进行了测试,验证了模型的合理性和求解方法的有效性。

1 水火电力系统解耦机制

在水火联合调度系统中,水电和火电共同承担系统负荷,二者的关联约束如下所示:

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi,t} + \sum_{m=1}^M P_{m,t} = P_{load,t} \quad (1)$$

其中, $P_{Gi,t}$ 为火电机组 i 在时段 t 的出力; $P_{m,t}$ 为水电厂 m 在时段 t 的出力; N 为火电机组总数; M 为水电厂总数; $P_{load,t}$ 为时段 t 的负荷预测值。

首先,将所有水电厂在各时段的出力之和等效为一个总的变量 $P_{hydro,t}$, 即 $\sum_{m=1}^M P_{m,t} = P_{hydro,t}$, 称 $P_{hydro,t}$ 为时段 t 的水电出力,以日煤耗量最小为调度目标,确定各火电机组在各时段的最佳出力计划以及等效水电和在各时段的出力;然后,在水电厂的相关约束下,以水电厂日前计划曲线的最小相对波动量为目标,确定各水电厂在各时段的出力计划。

2 水火电力系统短期实用化调度模型

2.1 子优化问题 1: 火电最小煤耗量优化问题

火电计划安排以煤耗量最小为调度目标:

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i P_{Gi,t}^2 + b_i P_{Gi,t} + c_i) \quad (2)$$

其中, f 为火电系统的总煤耗量; $T=96$ 为日前调度时段总数; a_i, b_i, c_i 为火电机组 i 的煤耗量系数。

子优化问题 1 的约束条件如下。

①系统有功平衡约束。

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi,t} + P_{hydro,t} = P_{load,t} \quad (3)$$

②火电机组上下限约束。

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi,t} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (4)$$

其中, $P_{Gi}^{\max}, P_{Gi}^{\min}$ 分别为火电机组 i 的最大、最小出力。

③火电爬坡速率约束。

$$\begin{cases} P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq u_{ri} \\ P_{Gi,t-1} - P_{Gi,t} \leq d_{ri} \end{cases} \quad (5)$$

其中, u_{ri}, d_{ri} 分别为火电机组 i 在 15 min 之内的最大升出力值和降出力值。

④火电出力波动约束。

在实际运行中,机组出力的频繁调整会给实际操作造成不便,并导致机械磨损^[10]。为解决该问题,在模型中加入控制火电机组出力曲线形状的约束,其建模思路的切入点为机组出力升降走向跟踪总负荷的

升降走向。南方某省电网一个典型负荷日的日负荷曲线如图 1 所示,图中每个时段长度为 15 min,后同。

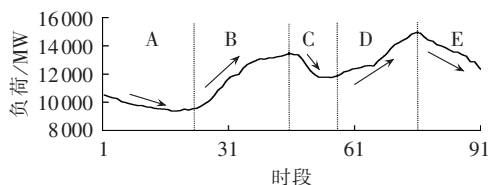


图 1 南方某省级电网典型日负荷曲线图

Fig.1 Typical daily load curve of a southern provincial power grid

对日负荷曲线按照升降走向来进行分段,共可划分为 A、B、C、D、E 共 5 个时间区段,在各个时间区段内,按照负荷升降走向确定各火电机组在 2 个相邻时段中的出力关系:

$$\begin{cases} P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq 0 & t \in \{A, C, E\} \\ P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \geq 0 & t \in \{B, D\} \end{cases} \quad (6)$$

此外,为避免两相邻时段的火电总负荷波动量过大,加入波动量的阈值约束:

$$\left| \sum_{i=1}^N P_{Gi,t} - \sum_{i=1}^N P_{Gi,t-1} \right| \leq \delta \quad (7)$$

其中, δ 为火电总负荷在 2 个相邻时段间的最大允许波动量。

⑤水电发电量约束。

$$\sum_{m=1}^M P_m^{\min} \leq P_{hydro,t} \leq \sum_{m=1}^M P_m^{\max} \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{hydro,t} = \sum_{m=1}^M P_{av,m} T \quad (9)$$

其中, $P_m^{\max}, P_m^{\min}$ 分别为水电厂 m 的日最大出力和最小出力; $P_{av,m}$ 为水电厂 m 的日平均出力预测值。式(9)的目的是保证水资源的充分利用。

2.2 子优化问题 2: 水电最小相对波动量优化问题

为提高水电计划质量,避免各水电厂日计划曲线的频繁调整,提出采用水电相对波动量最小作为水电调度目标。水电最小相对波动量的目标函数如下所示:

$$\min \Delta p = \sum_{m=1}^M \sum_{t=2}^T \frac{|P_{m,t} - P_{m,t-1}|}{(P_m^{\max} - P_m^{\min})(T-1)} \mu_m \quad (10)$$

其中, Δp 为水电系统的总相对波动量; $P_{m,t-1}$ 为水电厂 m 在时段 $t-1$ 的有功输出; S 为系统平衡机组,其相对波动量不计入目标函数; μ_m 为水电厂 m 的相对波动量的惩罚系数,该系数用于反映对不同容量水电厂出力波动的限制程度。

子优化问题 2 的约束条件如下。

①水电有功平衡约束。

$$\sum_{m=1}^M P_{m,t} = P_{hydro,t} \quad (11)$$

②最大最小出力约束。

$$P_m^{\min} \leq P_{m,t} \leq P_m^{\max} \quad (12)$$

③日平均出力约束。

$$\sum_{t=1}^T P_{m,t} = TP_{av,m} \quad (13)$$

④振动区间约束。

水电厂在实际运行中存在振动区间,水电计划安排应避开振动区间。

$$(P_{m,t} - \underline{P}_{Nm,s})(P_{m,t} - \bar{P}_{Nm,s}) \geq 0 \quad s=1,2,\dots,s_m \quad (14)$$

其中, $\bar{P}_{Nm,s}$ 、 $\underline{P}_{Nm,s}$ 分别为水电厂 m 的第 s 个振动区的上、下限; s_m 为水电厂 m 的振动区间个数。

3 改进 TLBO 算法

3.1 基本 TLBO 算法

基本 TLBO 算法包含 2 个阶段:教师教学阶段、学生相互学习阶段。

3.1.1 教师教学阶段

在该阶段,教师 TR 试图将班级的平均成绩提高到与自身相近的水平,其教学过程如下所示:

$$p_{new1,j}^{n_{iter}} = p_j^{n_{iter}} + r_1(T_R^{n_{iter}} - t_i^{n_{iter}} c_{mean}^{n_{iter}}) \quad (15)$$

$$c_{mean}^{n_{iter}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J p_j^{n_{iter}} \quad (16)$$

其中, J 为学生数; n_{iter} 为迭代次数; $p_j^{n_{iter}}$ ($j=1,2,\dots,J$) 为学生 j 在第 n_{iter} 次迭代中的知识水平; $c_{mean}^{n_{iter}}$ 为班级第 n_{iter} 次迭代中的平均知识水平; r_1 为 $(0,1)$ 区间内的随机数; $t_i^{n_{iter}}$ 为第 n_{iter} 次迭代的教学因子,随机取值为 1 或 2; $p_{new1,j}^{n_{iter}}$ 为学生 j 第 n_{iter} 次迭代更新后的知识水平,若 $p_{new1,j}^{n_{iter}}$ 具有更小的评价函数值,则用 $p_{new1,j}^{n_{iter}}$ 替代 $p_j^{n_{iter}}$ 。

3.1.2 学生相互学习阶段

在该阶段,学生 j 随机选择一个班级中的其他成员进行交流讨论,若其他成员具有更高的知识水平,则学生 j 向其学习。学习过程如下所示:

$$p_{new2,j}^{n_{iter}} = \begin{cases} p_j^{n_{iter}} + r_2(p_{j_1}^{n_{iter}} - p_j^{n_{iter}}) & f(p_{j_1}^{n_{iter}}) < f(p_j^{n_{iter}}) \\ p_j^{n_{iter}} + r_3(p_j^{n_{iter}} - p_{j_1}^{n_{iter}}) & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

其中, j_1 代表班级中的其他成员; r_2 、 r_3 为 $(0,1)$ 区间内的随机数; f 为评价函数。若 $p_{new2,j}^{n_{iter}}$ 具有更小的评价函数值,则用 $p_{new2,j}^{n_{iter}}$ 替代 $p_j^{n_{iter}}$ 。

3.2 改进的更新策略

基本的 TLBO 算法仅通过比较评价函数值进行更新,但当优化问题中含有约束时,对 2 个解的比较和更新还要考虑约束的满足情况。为保证班级成员的多样性,对不满足约束的解执行灵活的保留与更新策略,称之为柔性更新策略。当约束的违背量不超过一定阈值时,仅通过比较适应度函数来更新学生知识水平;当约束的违背量超过阈值时,仅通过比较约束违背量来更新学生。为使所有的个体在算法进入迭代后期时均成为可行解,将阈值设定为与迭代次数

相关的函数,具体如下所示:

$$p_j^{n_{iter}} = p_{new,j}^{n_{iter}} \Leftrightarrow \begin{cases} f(p_{new,j}^{n_{iter}}) \leq f(p_j^{n_{iter}}) \& \psi(p_{new,j}^{n_{iter}}), \psi(p_j^{n_{iter}}) \leq \theta \\ f(p_{new,j}^{n_{iter}}) \leq f(p_j^{n_{iter}}) \& \psi(p_{new,j}^{n_{iter}}) = \psi(p_j^{n_{iter}}) \\ \psi(p_{new,j}^{n_{iter}}) \leq \psi(p_j^{n_{iter}}) \& \psi(p_{new,j}^{n_{iter}}), \psi(p_j^{n_{iter}}) > \theta \end{cases} \quad (18)$$

$$\theta = \begin{cases} \theta_{\max} & n_{iter} \leq \frac{n_{iter\max}}{2} \\ \left(1 - \frac{n_{iter}}{n_{iter\max}}\right) \theta_{\max} & \frac{n_{iter\max}}{2} < n_{iter} \leq n_{inner} \\ 0 & n_{inner} < n_{iter} \leq n_{iter\max} \end{cases} \quad (19)$$

其中, ψ 为约束违背量函数; $n_{iter\max}$ 为算法的最大迭代次数; $\theta_{\max}$ 为约束违背量阈值,从第 n_{inner} 代开始,要求每个学生满足所有约束, n_{inner} 位于 $[0.5, 1]n_{iter\max}$ 区间内。

4 复杂约束条件的启发式处理方法

定义:将优化问题中的不等式约束称为弱约束,等式约束称为强约束;当一个待求解变量同时存在于 2 个或 2 个以上的强约束中时,称该变量为强耦合变量,将由该变量联系起来的强约束组合称为强耦合约束。

在子问题 1 中,式(3)和式(9)为一组强耦合约束, $P_{hydro,t}$ 为强耦合变量;在子问题 2 中,式(11)和式(13)为一组强耦合约束, $P_{m,t}$ 为强耦合变量。强耦合变量的取值会同时影响多个等式约束,对强耦合约束的有效处理是高效求解优化问题的关键。

4.1 子优化问题 1 的启发式约束处理方法

子优化问题 1 的启发式约束处理方法见图 2。具体步骤如下。

a. 设置初始迭代次数,令 $k=1$ 。

b. 执行模块 A。模块 A 为系统功率平衡约束、火电机组爬坡约束、升降走向约束及相邻时段波动量约束的处理流程。在模块 A 中, $\Delta P_{G,t}$ 为时段 t 机组出力与负荷的不平衡量,通过将不平衡量平均分配到有出力调整空间的火电机组及水电负荷上来逐步减小 $\Delta P_{G,t}$ 。 $P_{Gi,t}^{\max}$ 、 $P_{Gi,t}^{\min}$ 分别为机组 i 在时段 t 的最大出力 and 最小出力,计算公式如式(20)、式(21)所示。 $P_{hydro,t}^{\max}$ 、 $P_{hydro,t}^{\min}$ 分别为时段 t 水电总负荷的出力上、下限,计算公式如式(22)、式(23)所示。为提高计算效率,减少循环次数,允许 $\Delta P_{G,t}$ 有一个较小的违背量 ξ ,并设置有功平衡的最大调整次数 $a_{\max}$ 。

$$P_{Gi,t}^{\max} = \begin{cases} \min(P_{Gi,t}^{\max}, P_{Gi,t-1}) & t \in \{A, C, E\} \\ \min(P_{Gi,t}^{\max}, P_{Gi,t-1} + u_{ri}) & t \in \{B, D\} \end{cases} \quad (20)$$

$$P_{Gi,t}^{\min} = \begin{cases} \max(P_{Gi,t}^{\min}, P_{Gi,t-1} + d_{ri}) & t \in \{A, C, E\} \\ \max(P_{Gi,t}^{\min}, P_{Gi,t-1}) & t \in \{B, D\} \end{cases} \quad (21)$$

$$P_{hydro,t}^{\max} = \begin{cases} \min\left(\sum_{m=1}^M P_m^{\max}, P_{load,t} - P_{load,t-1} + P_{hydro,t-1} + \delta\right) & t \in \{A, C, E\} \\ \min\left(\sum_{m=1}^M P_m^{\max}, P_{load,t} - P_{load,t-1} + P_{hydro,t-1}\right) & t \in \{B, D\} \end{cases} \quad (22)$$

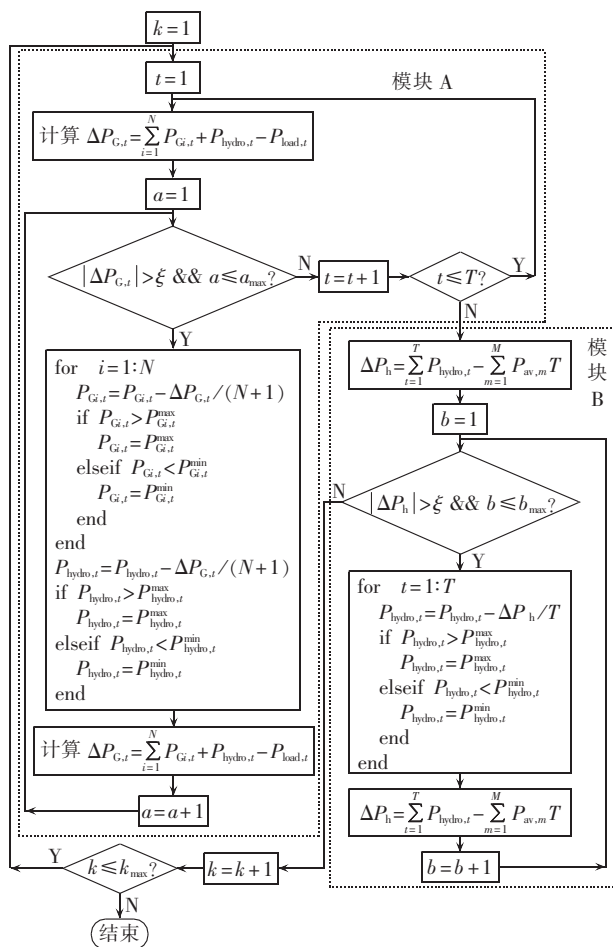


图 2 子问题 1 的约束处理流程图

Fig.2 Flowchart of constraint handling for sub-problem 1

$$P_{\text{hydro},t}^{\min} = \begin{cases} \max \left(\sum_{m=1}^M P_m^{\min}, P_{\text{load},t} - P_{\text{load},t-1} + P_{\text{hydro},t-1} \right) & t \in \{A, C, E\} \\ \max \left(\sum_{m=1}^M P_m^{\min}, P_{\text{load},t} - P_{\text{load},t-1} + P_{\text{hydro},t-1} - \delta \right) & t \in \{B, D\} \end{cases} \quad (23)$$

c. 执行模块 B。模块 B 为水电发电量的约束处理流程。其处理方法与步骤 **b** 中的功率平衡等式约束处理方法类似,通过多次循环将不平衡量 ΔP_h 分配到各时段的水电总负荷上。

d. 令 $k=k+1$,若 $k \leq k_{\max}$ 成立,则转到步骤 **b; 否则程序结束,约束处理完毕。**

4.2 子优化问题 2 的启发式约束处理方法

子优化问题 2 的启发式约束处理流程与子优化问题 1 相似。具体步骤如下。

a. 设置初始迭代次数,令 $k=1$ 。

b. 计算等式约束(11)的不平衡量 $\Delta P_{h,t} = \sum_{m=1}^M P_{m,t} - P_{\text{hydro},t}$,通过循环将不平衡量 $\Delta P_{h,t}$ 平均分配到各水电厂。在分配过程中,若水电厂出力位于振动区之内,则水电厂的出力随机设置为振动区上限值 $\bar{P}_{Nm,s}$ 或振动

区下限值 $\underline{P}_{Nm,s}$ 。

c. 计算等式约束(13)的不平衡量 $\Delta P_m = \sum_{t=1}^T P_{m,t} - P_{\text{av},m} T$,通过循环将水电厂 m 的不平衡量 ΔP_m 平均分配到各时段。在分配过程中,若水电厂出力位于振动区之内,则水电厂的出力随机设置为振动区上限值 $\bar{P}_{Nm,s}$ 或振动区下限值 $\underline{P}_{Nm,s}$ 。

d. 令 $k=k+1$,若 $k \leq k_{\max}$ 成立,则转到步骤 **b; 否则程序结束,约束处理完毕。**

5 调度模型求解

本文采用改进 TLBO 算法依次求解子优化问题 1 和 2,以子问题 1 为例说明具体的求解步骤。

a. 解的初始化与表达。一个学生代表一个调度方案,其结构如下所示:

$$p_j^0 = \begin{bmatrix} P_{1,1}^0 & P_{1,2}^0 & \cdots & P_{1,N}^0 & P_{\text{hydro},1}^0 \\ P_{2,1}^0 & P_{2,2}^0 & \cdots & P_{2,N}^0 & P_{\text{hydro},2}^0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ P_{T,1}^0 & P_{T,2}^0 & \cdots & P_{T,N}^0 & P_{\text{hydro},T}^0 \end{bmatrix} \quad j=1,2,\dots,J \quad (24)$$

其中,火电机组 i 在时段 t 的出力 $P_{t,i}^0$ 按式(25)计算,时段 t 的水电和 $P_{\text{hydro},t}^0$ 按式(26)计算, r_4, r_5 均为(0,1)区间内的随机数。

$$P_{t,i}^0 = P_{Gi}^{\min} + r_4 (P_{Gi}^{\max} - P_{Gi}^{\min}) \quad (25)$$

$$P_{\text{hydro},t}^0 = \sum_{m=1}^M P_m^{\min} + r_5 \left(\sum_{m=1}^M P_m^{\max} - P_m^{\min} \right) \quad (26)$$

由于初始班级中的每个学生仅满足上下限约束,因此,对班级中的每个学生执行子问题 1 的启发式约束处理策略,使每个初始解都尽可能成为可行解。

b. 设置初始迭代次数,令 $n_{\text{iter}}=1$ 。

c. 教师教学阶段。计算班级平均值,并选择最优解作为教师,根据 3.1.1 节的教学机制生成新的解,并对新生成的解执行启发式约束处理策略,根据柔性更新策略的比较机制判断是否用新生成的解替换原来的解。

d. 学生相互学习阶段。根据 3.1.2 节的学习机制生成新的解,对新生成的解执行子问题 1 的启发式约束处理策略,根据柔性更新策略的比较机制判断是否用新生成的解替换原来的解。

e. 令 $n_{\text{iter}}=n_{\text{iter}}+1$,若 $n_{\text{iter}} \leq n_{\text{itermax}}$,转到步骤 **c; 否则结束程序,以 $T_{\text{R}}^{\text{itermax}}$ 作为子问题 1 的最优解。**

6 算例分析

6.1 算法性能测试

为验证改进 TLBO 算法及启发式约束处理方法的有效性,采用 10 机系统^[24]的最小发电费用作为测试算例。改进 TLBO 算法的求解结果与其他优化算法的对比结果如表 1 所示,机组出力方案如表 2 所示。

表 1 改进 TLBO 算法与其他算法的寻优结果对比

Table 1 Comparison of optimization result between improved TLBO algorithm and other algorithms

算法	最小发电成本/¥	算法	最小发电成本/¥
改进 TLBO 算法	2.4630×10^6	文献[25]	2.4893×10^6
文献[24]	2.5168×10^6	文献[26]	2.4817×10^6

从表 1 可以看出,含启发式约束处理方法的 TLBO 算法的求解结果要优于其他算法。

6.2 工程实例

以南方某省级电网的水火电力系统日前调度为研究对象,选用该电网某日的日前调度计划作为测试算例,对提出的调度模型和求解方法进行验证。调度模型和约束处理策略涉及到的参数设置如下:两相邻时段的火电和的波动量阈值 $\delta=200$ MW;启发式约束处理的循环次数 $k_{\max}=5,a_{\max}=25,b_{\max}=25$;允许的最大有功违背量 $\xi=10^{-4}$;学生的约束总违背量阈值 $\theta_{\max}=50,n_{\text{inner}}=0.9$ 。在 2 个子优化问题中,班级成员数和最大迭代次数均分别设置为 $n=30,n_{\text{ilemax}}=200$ 。

6.3 仿真结果分析

6.3.1 子优化问题 1 的求解结果

分别采用不同方法求解子问题 1,所得火电系统的最小煤耗量如表 3 所示。

在表 3 中,电网当日实际的调度方案也是以节能降耗为目标,先基于其现有的发电调度软件平台获得初始调度方案,但初始调度方案不满足机组出力平滑性的要求,因而调度人员对初始调度方案进行人工

表 3 最小煤耗量

Table 3 Minimum coal consumptions

调度方案	煤耗量/t
电网当日实际的调度方案	6.0076×10^4
case1:改进 TLBO 算法(不考虑约束(6)、(7))	5.9267×10^4
case2:改进 TLBO 算法(考虑约束(6)、(7))	5.9273×10^4
case3:基本 TLBO 算法(考虑约束(6)、(7))	5.9430×10^4

调整和修正来编制最终调度方案;从 case2 与 case1 的对比可看出,case2 在考虑新增约束式(6)、式(7)后,煤耗量比 case1 的煤耗量有所增加,也即考虑机组出力的平滑性后,最优煤耗量会有一定量的下降,但相比电网的人工调整获得的调度方案要节约用煤 1.34%;从 case2 与 case3 的对比可看出,改进的 TLBO 算法比基本的 TLBO 算法可节约用煤 0.26%。

此外,为说明机组出力平滑性的约束对机组出力曲线的影响,给出了图 3 的结果。图 3 为该电网火电厂 C 一台 630 MW 机组的日前发电计划曲线。从图

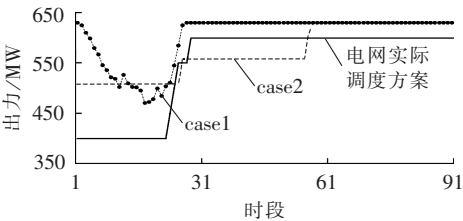


图 3 火电厂 C 机组 1 日前计划曲线

Fig.3 Day-ahead schedule for unit 1 of thermal power plant C

表 2 改进 TLBO 算法的 10 机系统调度方案

Table 2 Dispatch scheme of improved TLBO algorithm for 10-unit system

时段	出力/MW										网损/ MW
	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	
1	150.00	135.00	73.00	118.28	172.72	122.20	129.40	119.98	20.00	15.00	19.58
2	150.00	135.00	128.66	120.42	221.52	122.05	129.71	90.00	20.00	15.00	22.43
3	150.00	135.00	174.94	169.64	222.09	121.74	128.62	119.62	49.84	15.00	28.62
4	150.00	135.50	234.16	192.23	223.60	159.51	129.55	119.34	52.61	44.94	35.52
5	150.00	135.00	298.99	241.87	223.01	122.46	129.80	119.63	51.09	47.90	39.42
6	150.05	135.30	311.88	291.87	242.76	160.00	129.84	120.00	79.88	54.42	48.06
7	150.00	176.95	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	52.95
8	184.13	222.27	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	58.40
9	264.13	302.27	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	70.54
10	291.31	382.27	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	79.57
11	369.06	396.80	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	87.86
12	344.53	470.00	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	92.53
13	331.62	396.80	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	84.42
14	251.62	316.80	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	53.16	70.58
15	171.63	236.80	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	53.00	58.43
16	150.03	156.81	297.52	250.00	233.59	159.74	129.59	119.92	52.03	48.48	43.71
17	150.12	135.03	297.57	241.29	222.51	123.12	129.60	120.00	51.98	48.53	39.43
18	150.06	151.20	301.68	291.21	242.98	160.00	130.00	120.00	80.00	48.92	48.05
19	226.74	231.20	296.19	299.92	242.49	160.00	129.95	119.97	80.00	48.32	58.79
20	306.74	311.20	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	74.80
21	257.02	309.53	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	70.55
22	177.03	229.54	287.68	250.01	222.61	159.97	129.64	120.00	51.97	48.40	48.85
23	150.00	149.59	207.84	241.06	172.87	122.91	129.55	119.65	52.04	18.53	32.02
24	150.01	135.04	132.15	191.15	222.05	122.56	129.47	89.73	22.11	15.05	25.21

3 可以看出,case2 的火电机组出力曲线在各个时间区段内都呈平缓的阶梯状,这说明考虑新增约束式(6)、式(7)后,case2 的机组调度方案能够符合工程实际需求,且 case2 的机组调度方案不再需要人工手动调整,相比电网调度方案的制定过程,在实际中更容易执行和操作。

6.3.2 子优化问题 2 的求解结果

在子问题 2 中,选择系统中容量最大的水电厂作为平衡电厂,承担水电负荷的主要波动,另外一些调节性能好的大容量水电厂也会被用来分担水电负荷波动。因此,对于出力上下限差值超过 100 MW 的水电厂,设置其相对波动量的惩罚系数 $\mu_m=1$;上下限差值小于等于 100 MW 的水电厂,设置其相对波动量的惩罚系数 $\mu_m=10$ 。采用改进 TLBO 算法及启发式约束处理策略求解子优化问题 2,水电厂相对波动量最小的求解结果如表 4 所示,从表 4 可以看出,改进 TLBO 算法的求解结果要优于基本 TLBO 算法。

表 4 水电厂最小相对波动量
Table 4 Minimum relative fluctuation of hydropower plant

求解方法	相对波动量
基本 TLBO 算法	3.3359
改进 TLBO 算法	3.0124

图 4、图 5 分别为水电厂 d(出力上下限差值超过 100 MW)和水电厂 r(出力上下限差值小于等于 100 MW)的日前计划曲线。从图 4、图 5 可以看出,2 个水电厂在各时段的出力均位于其最大出力预测值和最小出力预测值的区间内,且二者均能有效避开各自的振动区间。此外,水电厂 d 和水电厂 r 的日平均出力的实际值分别为 193 MW、10 MW,与预测的平均值相符。可见,本文所提启发式约束处理策略能有效

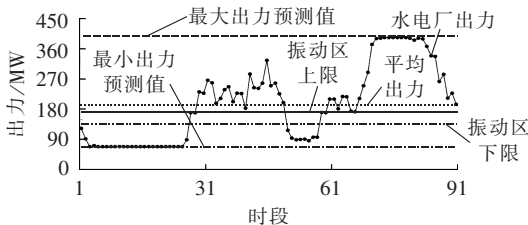


图 4 水电厂 d 的日前计划曲线

Fig.4 Day-ahead schedule for hydropower plant d

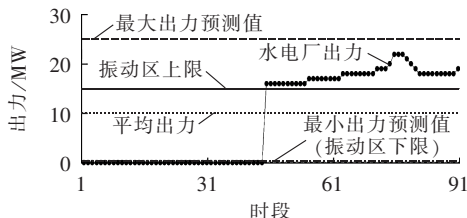


图 5 水电厂 r 的日前计划曲线

Fig.5 Day-ahead schedule for hydropower plant r

保证各项约束满足。同时,对比图 4、图 5 可以发现,水电厂 r 出力更加平滑、波动更小,这是因为水电厂 r 容量小,其对应的相对波动量的惩罚系数要大于调节能力强水电厂 d 的惩罚系数,目标函数在优化时更侧重于小容量水电厂的平滑性。

7 结论

针对南方某省级电网的大型水火电力系统的日前计划制定问题,建立了一种实用化的水火协调调度模型,调度模型包含 2 个具有优化时序的子优化问题,采用 TLBO 算法及启发式约束处理方法对 2 个子问题进行了求解。仿真结果表明:

a. 火电优化子问题在考虑机组升降走向约束和波动阈值约束后,最优煤耗会有少量增加,但相比不考虑这 2 项约束的调度方案,其火电机组出力曲线要更光滑平稳,调度结果更加符合工程需求;

b. 水电优化子问题的目标函数针对不同上下限差值的水电厂设置不同的惩罚系数,能灵活反映对不同容量水电厂平滑性要求的侧重程度;

c. 在强耦合约束致使可行域狭窄的情况下,启发式约束处理策略依然能快速找到可行解,保证各水电厂达到日平均出力的要求,并能有效避开各自的振动区,提高了计算精度和效率。

参考文献:

[1] 张森林. 节能发电调度实用化措施框架体系[J]. 电网技术, 2008, 32(20):81-85.
ZHANG Senlin. A framework system of practicable measures for energy-saving power generation dispatching[J]. Power System Technology, 2008, 32(20):81-85.
[2] 吴宏宇,管晓宏,翟桥柱,等. 水火电联合短期调度的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28):82-88.
WU Hongyu, GUAN Xiaohong, ZHAI Qiaozhu, et al. Short-term hydrothermal scheduling using mixed-integer linear programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28):82-88.
[3] 王开艳,罗先觉,吴玲,等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13):27-35.
WANG Kaiyan, LUO Xianjue, WU Ling, et al. Optimal dispatch of wind-hydro-thermal power system with priority given to clean energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13):27-35.
[4] 郭壮志,吴杰康,陈少华,等. 基于改进类电磁机制的水火电力系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12):188-198.
GUO Zhuangzhi, WU Jiekang, CHEN Shaohua, et al. Enhanced electromagnetism-like mechanism based hydrothermal power systems optimization scheduling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12):188-198.
[5] 袁旭峰,韩士博,熊炜,等. 计及梯级水电站群的水火电节能调度策略[J]. 电网技术, 2014, 38(3):616-621.
YUAN Xufeng, HAN Shibao, XIONG Wei, et al. Energy-saving generation scheduling strategy of hydropower and thermal power plants considering cascaded hydropower stations[J]. Power System Technology, 2014, 38(3):616-621.

- [6] ZHANG J, LIN S, QIU W. A modified chaotic differential evolution algorithm for short-term optimal hydrothermal scheduling[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 65: 159-168.
- [7] AHMADI A, MASOULEH M S, JANGHORBANI M, et al. Short term multi-objective hydrothermal scheduling[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121: 357-367.
- [8] 刘静, 罗先觉. 处理梯级水电站复杂约束的短期水火系统环境经济优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 27-35.
LIU Jing, LUO Xianjue. Short-term optimal environmental economic hydrothermal scheduling based on handling complicated constraints of multi-chain cascaded hydropower station[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 27-35.
- [9] 杭乃善, 郭小璇, 郑斌, 等. 基于互补机制的水火电力系统短期节能发电调度[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 107-114.
HANG Naishan, GUO Xiaoxuan, ZHENG Bin, et al. Complementary mechanism-based short-term energy conservation generation scheduling for hydrothermal power system[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 107-114.
- [10] 覃晖, 周建中. 基于多目标文化差分进化算法的水火电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 90-97.
QIN Hui, ZHOU Jianzhong. Optimal hydrothermal scheduling based on multi-objective cultured differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 90-97.
- [11] 贺建波, 胡志坚, 仇梦林, 等. 考虑系统实时响应风险水平约束的风-火-水电力系统协调优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1898-1906.
HE Jianbo, HU Zhijian, ZHANG Menglin, et al. Coordinated optimal dispatching of wind-thermal-hydro power system considering constraint of real-time expected demand not supplied [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1898-1906.
- [12] 徐帆, 李利利, 陈之栩, 等. 平抑机组出力波动的发电计划模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 45-50.
XU Fan, LI Lili, CHEN Zhixu, et al. Generation scheduling model and application with fluctuation reduction of unit output [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 45-50.
- [13] 李文武, 郑俊, 吴稀西, 等. 考虑振动区的水电机组组合优化研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 122-124.
LI Wenwu, ZHENG Jun, WU Xixi, et al. Unit commitment of hydropower station considering vibration zone[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(9): 122-124.
- [14] 纪昌明, 周婷, 向腾飞, 等. 基于网格搜索和交叉验证的支持向量机在梯级水电系统随机调度中的应用[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 125-131.
JI Changming, ZHOU Ting, XIANG Tengfei, et al. Application of support vector machine based on grid search and cross validation in implicit stochastic dispatch of cascaded hydropower stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 125-131.
- [15] 许丹, 赵鸿图, 丁强, 等. 基于实用化安全约束经济调度扩展建模策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 76-81.
XU Dan, ZHAO Hongtu, DING Qiang, et al. Modeling strategy based on utility of security constrained economic dispatch [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 76-81.
- [16] QIN H, ZHOU J, LU Y, et al. Multi-objective differential evolution with adaptive Cauchy mutation for short-term multi-objective optimal hydro-thermal scheduling[J]. Energy Conversion & Management, 2010, 51(4): 788-794.
- [17] YU B, YUAN X, WANG J. Short-term hydro-thermal scheduling using particle swarm optimization method[J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(7): 1902-1908.
- [18] 牛林华, 龚庆武, 黄炳翔, 等. 大规模风电入网下的风火电力系统联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 52-58.
NIU Linhua, GONG Qingwu, HUNAG Bingxiang, et al. Optimal dispatch of wind-gas-coal power generation system with large-scale wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 52-58.
- [19] 卢有麟, 周建中, 覃晖, 等. 基于自适应混合差分进化算法的水火电力系统短期发电计划优化[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 32-36.
LU Youlin, ZHOU Jianzhong, QIN Hui, et al. Short-term scheduling optimization for hydro-thermal power systems based on adaptive hybrid differential evolution algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 32-36.
- [20] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 186(2): 311-338.
- [21] 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.
- [22] BASU M. Teaching-learning-based optimization algorithm for multi-area economic dispatch[J]. Energy, 2014, 68: 21-28.
- [23] MANDAL B, ROY P K. Multi-objective optimal power flow using quasi-oppositional teaching learning based optimization [J]. Applied Soft Computing, 2014, 21(3): 590-606.
- [24] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2008, 30(2): 140-149.
- [25] 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.
- [26] NICOLE P, ANSHULT, SHASHIKALA T, et al. An improved bacterial foraging algorithm for combined static/dynamic environmental economic dispatch [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(11): 3500-3513.

作者简介:



仇梦林

仇梦林(1987—),女,山东青岛人,博士研究生,研究方向为新能源并网的电力系统优化调度(E-mail: 951057354@qq.com);

胡志坚(1969—),男,湖北荆州人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,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)。

Practical short-term dispatch model of hydro-thermal power system and solution

ZHANG Menglin, HU Zhijian, WANG Xiaofei, HU Mengyue

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

Abstract: With a large-scale hydro-thermal power system in a power grid as an example, its combined dispatch problem is formulated as two sub-problems of time-sequence optimization based on its decoupling mechanism for energy saving and practical application. In the sub-problem of thermal power optimization, apart from the conventional constraints, the up-down direction constraints of thermal power unit outputs and the fluctuation threshold constraint of total thermal power load between adjacent time intervals are applied to ensure the smooth output of thermal power units; in the sub-problem of hydro power optimization, the daily average output constraints and vibration zone constraint of hydropower plants are considered to make full use of hydropower. The improved teaching-learning-based optimization algorithm with flexible updating strategy is adopted to solve two sub-problems and different heuristic constraint handling strategies are designed for the complex constraints with strong coupling between two sub-problems of optimization. The simulative results of day-ahead dispatch for a hydro-thermal power system with 15 thermal power plants and 29 hydro power plants verify the feasibility and practicability of the proposed model and the effectiveness of the proposed solution.

Key words: hydro-thermal power system; practical dispatch model; smooth unit output constraint; teaching-learning-based optimization algorithm; heuristic constraint handling; flexible updating strategy

.....

(上接第 114 页 continued from page 114)

Automatic transmission line path selection based on GIS and improved CA

SU Haifeng¹, SHI Jingwei¹, LIANG Zhirui¹, WU Changqing²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Chongqing Electric Power Design Institute, Chongqing 400030, China)

Abstract: The complicated geographical information in the geographical units is integrated by the GIS technology and the analytic hierarchy process, and based on the CA (Cellular Automata) model, an automatic transmission line path selection model is built according to the features of transmission line design, which adopts the heuristic search, includes the partial cost control and overall direction control, and integrates the pheromone updating mechanism of ant colony algorithm. With the geographical data provided by Google GIS, an automatic transmission line path selection program is developed by C#2010 to verify the efficiency of the proposed model.

Key words: power transmission; transmission line path selection; geographic information system; analytic hierarchy process; cellular automata; heuristic search; ant colony optimization