

电力市场环境下解决机组组合问题的研究

王承民¹, 郭志忠¹, 姜雨²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 东北电力学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 提出了一种解决电力市场环境下机组组合的新方法, 考虑了包括网络安全约束在内的多种约束条件。这种方法首先将一个系统按系统通常的运行方式分成一些小的子系统, 满足联络线功率不过载的约束条件, 并在这些小的子系统之间分配负荷; 然后将各子系统的机组组合问题分为两层的规划问题, 用动态规划法和分段线性规划算法分别解决这两个问题, 并满足时间约束、机组出力上升、下降速度约束等各种约束条件。本算法经一个8机系统的检验, 说明本算法是非常有效的。

关键词: 电力市场; 机组组合; 动态规划法; 分段线性规划法

中图分类号: TM73; F123.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)04-0010-06

1 引言

进入90年代以来, 世界各国的电力系统争相引入竞争机制, 以使古老的电力行业重新充满活力, 从而推动电力系统的发展。目前美、英等国家在电力市场的研究和运行方面起步较早, 我国的电力工业也正在施行市场机制。

由于电力市场的特殊性, 电力市场的模式也是各种各样的。我国处于电力市场的初级阶段, 为了积累经验, 所以首先开放的是发电侧电力市场。在发电侧电力市场中, 竞价是决定机组开、停和负荷分配的主要手段, 为了体现市场环境下的“公平”原则, 必须有效地解决系统的机组组合问题。目前, 已经提出了各种算法用于解决机组组合问题, 主要有排队法^[1], 动态规划法^[2], 混合整数规划法^[3], 拉格朗日松弛法^[4]等等。

排队法^{[1][5][6]}首先是按照经济原则建立一个优先次序表, 以后决定机组开、停就是在此表的基础上进行的, 这种方法比较简单, 但优化的效果比较差。混合整数规划法^[7]和分支定界法^[8]无法解决“维数灾”问题。拉格朗日松弛法^[9]是目前比较关注的方法之一, 在解决网络约束方面存在困难, 且收敛性也是一个主要问题。以前的工作对动态规划法研究的比较多, 以往对动态规划法的研究大多是针对动态规划方法的“维数灾”问题的。DP-SC法^{[10][11]} (dynamic programming sequential combination) 将动态规划法与排序法相结合, 机组只能按优先顺序开停, 大大减少了状态数, 但可能丢失最优解或次优解; DP-TC^{[2][12][13]} (dynamic programming truncated combination) 法只考虑机组开停机表后面一定数量的机组组

合作为各阶段的状态数, 优化的范围有所扩大, 但计算时间也随着激增; 在处理运行约束方面, 大多数文献并没有解决机组功率上升、下降速度约束 (ramp constrains 简称爬坡约束), 特别是机组启动、停机时的爬坡问题^[14] (start-up ramp, shut-down ramp), 但这些约束又是机组运行所不能违背的, 因为机组组合确定后, 经济调度算法就会在在线的发电机组之间分配功率, 但机组的开机或停机是有一定过程的, 特别是火电机组, 必须考虑锅炉的燃烧特性, 在表1中列出了一些发电机组的启动特性, 由此可见, 在某时段确定某台机开(停)后, 在此时段的前若干时段(后若干时段)这台机就应该逐步加负荷(减负荷), 也就是说, 考虑了机组的开机(停机)特性后, 在某些时段, 这些机组等值于有固定出力的机组。

本文介绍一种解决电力市场环境下机组组合问题的新方法, 这种方法将整个的机组组合问题划分成三层的优化问题: 在第一层优化问题中考虑了网络安全约束条件, 用分段线性规划法求解系统的初始运行费用; 第二层优化问题用动态规划方法确定满足机组开停时间约束和系统旋转备用约束的机组组合; 第三层优化问题在现机组组合上分配功率, 满足系统功率平衡, 发电机组出力上、下限及发电机组出力上升、下降速度约束。本文提出的方法考虑了机组组合问题的多种约束条件, 经一个8机系统的检验证明其在实际系统的运行中是完全有效的。

2 数学模型

电力市场环境下机组组合问题可以描述为:

目标函数:

$$\min z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} c_i \cdot p_i \cdot x_{i,t} \quad (1)$$

系统功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t} = p_{d,t} \quad (2)$$

发电机组出力上、下限约束:

$$P_{i,t}^{\min} \leq p_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (3)$$

系统旋转备用约束:

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\max} - \sum_{i=1}^N p_{i,t} \geq S_{\max,t},$$

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t} - \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\min} \geq S_{\min,t} \quad (4)$$

发电机出力上升、下降速度约束:

$$p_{i,t} - p_{i,t-1} \leq R_{i,\max}, p_{i,t-1} - p_{i,t} \leq R_{i,\min} \quad (5)$$

发电机最小运行时间和最少停机时间约束:

$$(t_{i,t-1}^{\text{on}} - T_{i,\min}^{\text{on}}) \cdot (x_{i,t-1} - x_{i,t}) \leq 0$$

$$(t_{i,t-1}^{\text{off}} - T_{i,\min}^{\text{off}}) \cdot (x_{i,t-1} - x_{i,t}) \leq 0 \quad (6)$$

其中:

$$t_{i,t}^{\text{on}} = (t_{i,t-1}^{\text{on}} + T_0) \cdot x_{i,t}$$

$$t_{i,t}^{\text{off}} = (t_{i,t-1}^{\text{off}} + T_0) \cdot (1 - x_{i,t})$$

电网传输容量约束:

$$|d_{l,t}| \leq D_{l,t}^{\max} \quad (7)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N_G$, 为发电机集合; $t = 1, 2, \dots, T$ 为时段数; $l = 1, 2, \dots, N_L$ 为联络线集合; $c_{i,t}$ 为第 i 台机组在第 t 时段的报价; $p_{i,t}$ 为第 i 台机组在第 t 时段的出力; $x_{i,t}$ 为第 i 台机组在第 t 时段的状态, 为 0、1 变量, 0 表示停机, 1 表示开机; $P_{i,t}^{\max}$, $P_{i,t}^{\min}$ 为第 i 台机组在 t 时段的最大、最小出力; $S_{\max,t}$ 为系统负荷旋转上备用要求; $S_{\min,t}$ 为系统负荷旋转下备用要求; $R_{i,\min}$ 为第 i 台机组的最大下降功率速度限值; $R_{i,\max}$ 为第 i 台机组的最大上升功率速度限值; $t_{i,t}^{\text{on}}$ 为第 i 台机组连续开机到 t 时段的开机时间; $t_{i,t}^{\text{off}}$ 为第 i 台机组连续停机到 t 时段的停机时间; $T_{i,\min}^{\text{on}}$ 为第 i 台机组的最小开机时间; $T_{i,\min}^{\text{off}}$ 为第 i 台机组的最小停机时间; T_0 为一个时段的时间间隔; $d_{l,t}$ 为联络线传输功率; $D_{l,t}^{\max}$ 为联络线传输功率限值。

这是一个多约束的混合整数规划问题, 本文将问题化为三层的子规划问题分别求解。

3 算法描述

3.1 分块法的数学模型

在编制短期发电计划时, 电网的运行方式和拓扑结构一般来说变化不大, 针对系统近期可能出现的各种运行方式用潮流和稳定程序计算出各线路的安全限值, 再将其转化为地区功率的安全限值, 在实

际编制计划时, 只控制地区功率的安全限值就可以了。从而可将一个大系统分成几个地区型的子系统, 在保持联络线功率不越界的情况下在子系统之间分配负荷。

将系统划分为几个子系统之后, 问题 (1) ~ (7) 变换为:

$$\min z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} c_{i,t} p_{i,t} \quad (8)$$

(1) 功率平衡

$$\sum_{i=1}^{N_s} p_{i,t} = p_{d,t} \quad (9)$$

(2) 发电机组出力上、下限约束

$$P_{i,t}^{\min} \leq p_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (10)$$

(3) 系统旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^{N_s} P_{i,t}^{\max} - \sum_{i=1}^{N_s} p_{i,t} \geq S_{\max,t},$$

$$\sum_{i=1}^{N_s} p_{i,t} - \sum_{i=1}^{N_s} P_{i,t}^{\min} \geq S_{\min,t} \quad (11)$$

(4) 发电机出力上升、下降速度约束

$$p_{i,t} - p_{i,t-1} \leq R_{i,\max}, p_{i,t-1} - p_{i,t} \leq R_{i,\min} \quad (12)$$

(5) 电网传输容量约束

$$|d_{l,t}| \leq D_{l,t}^{\max} \quad (13)$$

其中: N_s 为子系统集合; 相应的 $c_{i,t}$ 为第 i 个子系统在第 t 时段的报价; $p_{i,t}$ 为第 i 个子系统在第 t 时段的出力; $P_{i,t}^{\max}$, $P_{i,t}^{\min}$ 为第 i 个子系统在 t 时段的最大、最小出力; $S_{\max,t}$ 为系统负荷旋转上备用要求; $S_{\min,t}$ 为系统负荷旋转下备用要求; $R_{i,\min}$ 为第 i 个子系统的最大下降功率速度限值; $R_{i,\max}$ 为第 i 个子系统的最大上升功率速度限值; N_L 为子系统间联络线集合; $d_{l,t}$ 为联络线传输功率; $D_{l,t}^{\max}$ 为联络线传输功率限值。

因为各子系统之间不应该存在开、停问题, 因此问题 (8) ~ (13) 为一个连续变量的优化问题, 此优化问题的解为在各子系统间分配的功率。这样, 问题 (1) ~ (7) 由发电机组之间的竞价问题就变为各子系统之间的竞价问题。

3.2 参数的确定

当问题变为各子系统之间的竞价问题时, 问题 (8) ~ (13) 的参数需要确定, 具体的确定方法如下。

1) 报价曲线的确定: 将多台发电机的报价曲线拟合成一条曲线, 如图 1 所示的两条报价曲线为例, 将其拟合成一条报价曲线。

$$\text{设 } C_{\min} = \min\{c_{1,\min}, c_{2,\min}\}, C_{\max} = \max\{c_{1,\max}, c_{2,\max}\},$$

在报价范围 $c_{\min} \sim c_{\max}$ 内,子系统输出的功率为每一报价点所对应的两台机出力之和。如图 1 黑线所示,当报价为 c 时,相应的子系统出力为 $p_1 + p_2$,此值说明在价格 c 上,此子系统所提供的最大功率。

2) 各子系统最大出力为此子系统内各机组的最大出力之和减去此子系统的旋转备用约束;各子系统的最大出力为此子系统中最小出力机组的最小出力加上此子系统的旋转备用约束。

3) 各子系统的负荷上升、下降速度约束为此子系统内各机组的负荷上升、下降速度约束参数之和。

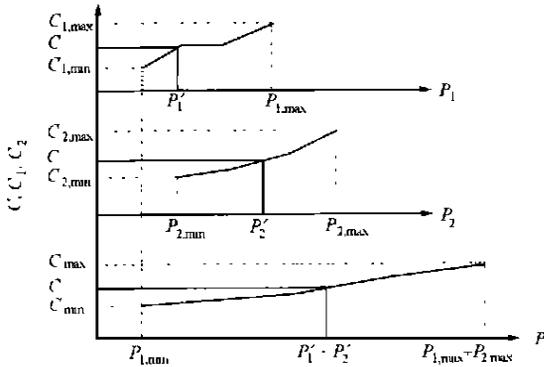


图 1 报价曲线的拟合

4) 子系统之间联络线功率的确定:以三个子块的系统为例,如图 2 所示,共有 3 条联络线,设各区域的发电功率为 $\{p_1, p_2, p_3\}$,负荷为 $\{p_{L,1}, p_{L,2}, p_{L,3}\}$,联络线功率分别为 $\{p_4, p_5, p_6\}$,参考方向如图 2 所示。

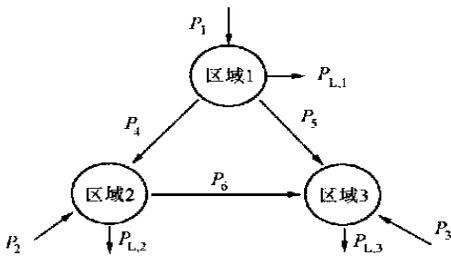


图 2 联络线功率的确定

则有:

$$\begin{cases} p_4 + p_5 = p_1 - p_{L,1} \\ p_6 - p_4 = p_2 - p_{L,2} \\ -p_5 - p_6 = p_3 - p_{L,3} \end{cases} \quad (17)$$

在此线性方程组中,设 $|p_4|$ $p_{4,max}$, $|p_5|$ $p_{5,max}$, $|p_6|$ $p_{6,max}$, 则有:

$$\begin{cases} |p_1 - p_{L,1}| & p_{4,max} + p_{5,max} \\ |p_2 - p_{L,2}| & p_{6,max} + p_{4,max} \\ |p_3 - p_{L,3}| & p_{5,max} + p_{6,max} \end{cases} \quad (18)$$

从而将联络线的传输容量界限转换为各子系统的功率限值。

用(18)取代(13),将问题(8)~(13)变换为以各子系统出力为变量的线性规划问题。用分段线性规划法解此问题,可得到各子系统的经济功率分配,将各子系统所分配的功率作为各子系统的负荷,在各子系统之间重新进行机组组合优化。

3.3 分段线性规划法

发电公司的报价曲线一般是多段的折线,如图 3 中虚线所示(横坐标为发电机组输出的功率,纵坐标为发电公司的单位电量报价)。

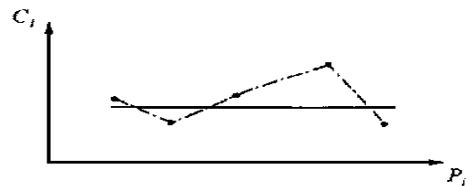


图 3 发电公司报价曲线

从图 3 中可见,因为报价曲线的分段特性,如果取不变的报价系数(如图 3 中实线所示),则不能充分体现市场的竞价规则。一般将报价曲线等值成为分段线性的形式,如图 4 所示(图中 $p_{2,min} = p_{1,max}$, $p_{3,min} = p_{2,max}$, $p_{4,min} = p_{3,max}$)。但报价曲线的分段特性给算法带来了困难,因为随着发电机组出力界限的变化,报价也随着改变,普通的线性规划算法解决这种问题有困难。本文提出一种改进的线性规划方法解决报价曲线的分段特性,这种线性规划算法称为分段线性规划算法。

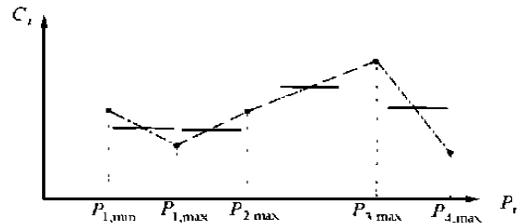


图 4 报价曲线分段处理

考虑报价系数和发电机出力上、下限的变化,将问题(1)~(5)变换为如下形式:

目标函数:

$$z = \min_{c_{i,t}, p_{i,t}^{\max}, p_{i,t}^{\min}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_t} c_{i,t} p_{i,t} \quad (14)$$

满足约束条件(9)~(13)。式(14)变换为:

$$z = \min_{c_{i,t}, p_{i,t}^{\max}, p_{i,t}^{\min}} \min_{p_{i,t}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_t} c_{i,t} p_{i,t} \quad (15)$$

满足约束条件(9)~(13)。

设问题(15)的子规划问题为:

$$z_1 = \min_{p_{i,t}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} c_{i,t} p_{i,t} \quad (16)$$

满足约束条件(9)~(13)。

分段线性规划法如下:给定 $c_{i,t}$ 的初值,用单纯型法解问题(16),检查各发电机组在各时段的出力 $p_{i,t}$,若达到出力上限,则向上一报价段推移;若出力达到下限,则向下一报价段推移;相应的发电机组出力界限和报价系数都变为相应报价段的值。重复进行,直到目标函数值不再下降为止,此时的目标函数值为问题(14)的最优值。

3.4 子系统的机组组合问题

将一个大系统分成多个小的子系统之后,问题的模型如式(1)~(6),由于系统的维数大大减少了,应用动态规划方法解决机组组合问题变的方便起来。由于传统的动态规划方法无法处理机组功率上升、下降速度约束,本文采用一种改进的动态规划算法。

动态规划方法是一种求解多阶段决策问题的优化方法,用于求解有离散变量的机组组合问题是比较方便的,如图5所示,为一简单系统的动态规划法示意图(两台机,三个时段),其中0、1表示机组的开停状态,每一圆圈表示的是一时段机组的组合状态,状态数为 $2^N - 1$ 。对于每时段的每个状态,可检查其是否满足旋转备用约束,将不满足旋转备用约束的状态剔除,这样可减少计算量。设每一状态的购电成本为:

$$F_t = \sum_{i=1}^N c_{i,t} p_{i,t} x_{i,t} \quad (19)$$

其中: F_t 为第 t 时段系统的运行成本;

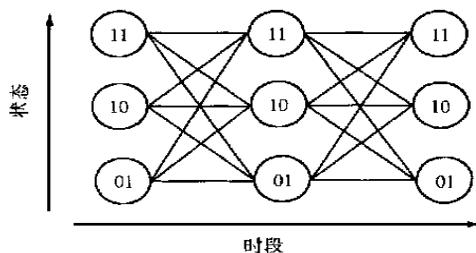


图5 动态规划法示意图

因为考虑了爬坡约束和机组的开停机特性之后,在单一时段内无法确定功率 $p_{i,t}$ 的值,所以 F_t 的值也无法确定,传统动态规划算法的应用受到限制,为了解决这个问题,本文采用了一种改进的动态规划算法,这种算法的特点是不去求解某一时段状态变量的值,而是求解由所有时段组成的路径的状

态变量的值。

首先定义路径的概念。如图2黑线所示,在从时段1到时段T的所有时段中,每一时段任取一种机组组合状态,这样组成的一个决策集合称为一条路径。

下面介绍这种改进的动态规划算法。设:满足约束条件(4)和(6)的所有路径集合为L。则式(1)~(6)所描述的问题等价于以下问题:

$$\min_L F_l \quad (20)$$

其中: F_l 为一子优化问题,表达式如下:

$$F_l = \min_{p_{i,t}} \sum_{t=1}^T F_t \quad (21)$$

满足约束(2)、(3)、(5);

对于任一条路径 l ,因为各机组的开停状态已经确定,且满足时间约束,所以 F_t 只是功率 $p_{i,t}$ 的函数,可用分段线性规划方法解(21)式的子规划问题。

对于集合L,取其中的M条路径进行寻优,这M条路径均匀地分布在集合L中,对于M条路径中的最优路径,在其一定的邻域内进行进一步优化,所得到的解即为机组组合问题的解。M可视系统的规模及计算时间确定。

4 算例

经过一个8机系统的检验,说明本算法在发电侧电力市场的交易过程中是非常有效的。

以电力系统的一天为周期的发电计划为例,将全天分为24时段,每时段1h,(系统的数据如下:表1为系统的技术参数;表2为系统负荷及旋转备用数据;由于报价数据十分庞大,在这里没有列出来)将系统划分为两个子系统,机组1~4为第一个子系统,机组5~8为第二个子系统。两个子系统之间的联络线功率限值如表3所示,各子系统的负荷如表4所示,应用分段线性规划法计算得各子系统的功率分配如表5所示。

表1 系统的技术参数

机组号	出力上限	出力下限	出力上升速度	出力下降速度	最小开机时间	最小停机时间
1	130	20	130	130	24	24
2	130	20	130	130	24	24
3	460	100	460	460	24	24
4	465	100	465	465	24	24
5	160	100	160	160	24	24
6	455	100	455	455	24	24
7	455	100	455	455	24	24
8	470	100	470	470	24	24

表2 系统的负荷及旋转备用

负荷(1~12时段)	940	900	933	930	940	945	942	972	931	956	937	900
(13~24时段)	949	982	935	942	942	972	946	935	920	900	920	900
旋转(1~12时段)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
备用(13~24时段)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

表3 联络线功率限值

传输容(1~12时段)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
量极限(13~24时段)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

表4 各子系统的负荷

子系统1(1~12时段)	470	450	463	465	470	470	470	486	461	478	467	450
(13~24时段)	475	491	465	470	472	486	473	465	460	450	460	450
子系统2(1~12时段)	470	450	470	465	470	475	472	486	470	478	470	450
(13~24时段)	474	491	470	486	473	470	460	450	460	450	460	450

表5 各子系统的功率

子系统1(1~12时段)	420	400	413	415	420	420	420	436	411	428	417	400
(13~24时段)	425	441	415	420	422	436	423	415	410	400	410	400
子系统2(1~12时段)	520	500	520	515	520	525	522	536	520	528	520	500
(13~24时段)	524	541	520	522	520	536	523	520	510	500	510	500

以各子系统所分配的功率值作为各子系统的负荷,应用改进的动态规划法和分段线性规划法解各子系统的机组组合问题,各子系统的旋转备用约束如表6所示,各机组的初始开停机时间如表7所示。计算结果如下:表8为机组的开、停状态;表9为各机组的出力 and 价格,子系统1的购电费用为9.98998

$\times 10^6$ 元,子系统2的购电费用为 1.23226×10^7 元,则系统总的购电费用为 2.231258×10^7 元。

从计算结果显示,各机组在各时段的出力满足各种约束条件,且购电费用比较小,这说明了本算法的有效性,完全可以运用到实际系统的运行中去。

表6 各子系统的旋转备用

子系统1(1~12时段)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
(13~24时段)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
子系统2(1~12时段)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
(13~24时段)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

表7 各机组的初始开停机时间

机组	1	2	3	4	5	6	7	8
机组开机时间	10	10	10	10	10	10	10	10
机组停机时间	0	0	0	0	0	0	0	0

表8 机组的开停状态

机组	时段(1~24)																					
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表9 机组的出力 and 价格

时段	机组1		机组2		机组3		机组4		机组5		机组6		机组7		机组8	
	出力	价格														
1	20	974.46	20	1028.27	280	762.885	100	915.35	100	879.355	120	792.735	200	597.665	100	1017.38
2	80	883.893	20	940.836	100	1010.08	200	544.978	100	853.05	100	853.05	200	792.55	100	853.05
3	93	676.299	20	732.05	100	732.05	200	663.758	110	732.05	140	732.05	170	732.05	100	732.05
4	40	732.383	40	732.05	195	756.25	140	732.05	100	732.05	115	732.05	200	722.55	100	732.05
5	40	853.05	40	853.05	200	877.25	140	853.05	110	853.05	140	853.05	170	853.05	100	853.05
6	40	853.05	40	853.05	200	877.25	140	853.05	100	853.05	125	853.05	200	835.82	100	853.05
7	40	974.05	40	974.05	150	979.55	190	986.15	110	974.05	140	974.05	172	974.05	100	974.05
8	40	1095.05	40	1095.05	216	1119.25	140	1095.05	110	1095.05	140	1095.05	186	1095.05	100	1095.05
9	40	1149.5	40	1149.5	191	1167.65	140	1149.5	110	1149.5	140	1149.5	170	1149.5	100	1149.5
10	40	1137.4	40	1137.4	208	1155.55	140	1137.4	110	1137.4	140	1137.4	178	1137.4	100	1137.4
11	40	1125.3	40	1125.3	197	1143.45	140	1125.3	110	1125.3	140	1125.3	170	1125.3	100	1125.3
12	40	1113.2	40	1113.2	150	1040.6	170	1113.2	110	1113.2	140	1113.2	150	1113.2	100	1113.2
13	40	974.05	40	974.05	205	992.2	140	974.05	110	974.05	140	974.05	174	974.05	100	974.05
14	40	853.05	40	853.05	150	853.55	211	877.25	110	853.05	140	853.05	191	853.05	100	853.05
15	40	974.05	40	974.05	195	998.25	140	974.05	110	974.05	140	974.05	170	974.05	100	974.05
16	40	1052.7	40	1052.7	200	1070.85	140	1052.7	110	1052.7	140	1052.7	172	1052.7	100	1052.7
17	40	1095.05	40	1095.05	150	1095.05	192	1107.15	110	1095.05	140	1095.05	170	1095.05	100	1095.05
18	40	1095.05	40	1095.05	216	1119.25	140	1095.05	110	1095.05	140	1095.05	186	1095.05	100	1095.05
19	40	1191.85	40	1191.85	203	1270.5	140	1191.85	110	1191.85	140	1191.85	173	1191.85	100	1191.85
20	40	1082.95	40	1082.95	150	1082.95	185	1095.05	120	1095.05	260	1107.15	0	1122.27	140	1082.95
21	0	1124.63	40	1082.95	230	1107.15	140	1082.95	130	1107.15	240	1107.15	0	1122.27	140	1082.95
22	0	1015.73	40	974.05	0	1014.06	360	1022.45	130	998.25	230	998.25	0	1013.37	140	974.05
23	0	991.528	40	949.85	0	990.656	370	998.25	130	974.05	240	974.05	0	989.168	140	949.85
24	0	1015.73	0	1015.73	0	1014.42	400	1022.45	130	998.25	130	998.25	0	1013.37	140	974.05

5 结论

本文提出了一种组合优化算法解决电力市场环境下的机组组合问题,首先将发电机组之间的竞价问题转换为各子系统之间的竞价问题,然后在各子系统内进行竞争,这符合电力系统的实际情况,因为电力系统受地域的限制是自然分块的;另外,在电力市场条件下,一个系统中一般都有一些大的电力公司,这些大的电力公司本身就是一些子系统,电力公司也可以在其内部展开竞争。

因为,在电力系统正常的运行过程中,不可能将一部分系统切除,也就是各子系统之间不存在开停问题,这样,将原问题转换为连续变量的优化问题,大大地简化了计算。经一个试验系统的检验说明本算法是简单、实用的。

参考文献:

- [1] Lee F N and Feng Q. Multi-Area Unit Commitment. IEEE Transactions on PWRs, Paper 91 WM 180-0, New York, 1991.
- [2] Pang C K and Sheble GB and Albuyeh F. Evaluation of Dynamic Programming Based Method and Multiple Area Representation for Thermal Unit Commitment. IEEE Transactions on PAS, 1981, 100(3) :1212 ~ 1218.
- [3] Habibollahzadeh H and Bubenko J A. Application of Decomposition Techniques to Short-Term Operation Planning of Hydrothermal Power System. IEEE Transactions on Power System, 1986, 1(1) :41 ~ 47.
- [4] Ruzic S and Rajakovic N. A New Approach for Solving Extended Unit Commitment Problem. IEEE Transactions on Power System, 1991, 6(1) :269 ~ 275.
- [5] Lee F N. The Application of Commitment Utilization Factor (CUF) to Thermal Unit Commitment. IEEE Transactions on Power System, 1991, 6(2) :691 ~ 698.
- [6] Lee F N. Short-Term Unit Commitment-A New Method. IEEE Transactions on Power System, 1988, 3(2) :421 ~ 428.
- [7] Shaw J J and Bertsekas D P. Optimal Scheduling of Large Hydrothermal Power Systems. IEEE Transactions on PAS 1985, 104(2) :286 ~ 294.
- [8] Cohen A I and Yoshimura M. A Branch and Bound Algorithm for Unit Commitment. IEEE Transactions on PAS, 1983, 102(2) :444 ~ 451.
- [9] Ruzic S and Rajakovic N. A New Approach for Solving Extended Unit Commitment Problem. IEEE Transactions on Power System, 1991, 6(1) :269 ~ 275.
- [10] Tong S K and Shahidehpour S M. Hydrothermal Unit Commitment with Probabilistic Constraints Using Segmentation Method. IEEE Transactions on Power System, 1990, 5(1) :276 ~ 282.
- [11] Hsu Y Y, Su C C, Liang C C, Lin C J and Huang C T. Dynamic Security Constrained Multi-Area Unit Commitment. IEEE Transactions on Power System, 1991, 6(3) :1049 ~ 1056.
- [12] Pang C K and Chen H C. Optimal Short-Term Thermal Unit Commitment. IEEE Trans, 1976, PAS-95/4.
- [13] Ouyang Z and Shahidehpour S M. An Intelligent Dynamic Programming for Unit Commitment Application, IEEE Transaction on Power System, 1991, 6(3) :1203 ~ 1209.
- [14] Walker J Hobbs and Gary Hermen Stephen Warner and Gerald B Sheble. An Enhanced Dynamic Programming Approach for Unit Commitment. IEEE Trans, 1988, PWRs 3/3.

收稿日期: 2000-08-21; 改回日期:2000-10-18

作者简介: 王承民(1970-),男,博士研究生,研究方向为电力市场; 郭志忠(1961-),男,博士生导师,教授,研究方向为电力市场和电力系统稳定; 姜雨(1975-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统经济运行。

A new method for unit connection in competitive environment

WANG Cheng-min¹, GUO Zhi-zhong¹, JIANG Yu²

(1. Harbin University of Technology, Harbin 150001, China; 2. Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

Abstract: In this paper a new method was proposed for solving unit connection problem in the electric power market, considered multiple constrains included network security constrain. First, it divided a large scale system into some small scale subsystems according to general system operation mode, satisfying restricted transfers power limit in interconnect links, then scheduled generation between subsystems. Secondly, it independently solved unit connection problem for subsystems using dynamic programming and section linear programming. The algorithm was tested by eight-machine system.

Keywords: electric power market; unit connection; dynamic programming; section linear programming