

# 引入 SO<sub>2</sub> 排放惩罚价格因子的 节能减排发电调度模型及实用算法

韩彬, 周京阳, 崔晖, 李晓磊

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## An Energy Conservation and Emission Reduction Based Power Generation Scheduling Model Leading in Factor of Penalty Price due to SO<sub>2</sub> Emission and Its Practical Algorithm

HAN Bin, ZHOU Jing-yang, CUI Hui, LI Xiao-lei

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Under the presupposition that the startup and shutdown states of units are determined, the respective advantages and defects of four kinds of energy conservation and emission reduction based power generation scheduling models are compared and the fourth kind of model is analyzed in detail. Because of leading factor of penalty price due to SO<sub>2</sub> emission into the fourth kind of model, it is considered that the fourth kind of model can coordinate the two optimization objects, namely the energy conservation and emission reduction, so it is practicable. Taking daily load data of a certain provincial power grid for example, four day-ahead power generation scheduling models are contrasted and analyzed. By means of modifying the factor of penalty price due to SO<sub>2</sub> emission in the fourth kind of model, the economy and the feature of environment protection of power generation scheduling are coordinated flexibly, thus the practicality and effectiveness of the fourth kind of model are verified.

**KEY WORDS:** energy conservation and pollution reduction; daily generation scheduling; energy-conservation based generation; economic dispatch; coal consumption; factor of penalty price

**摘要:** 在确定机组开停状态的前提下, 分析了 4 种节能减排发电调度模型各自的优缺点, 详细分析了第 4 种模型, 认为第 4 种模型通过引入 SO<sub>2</sub> 排放惩罚价格因子, 能够协调节能和减排 2 个优化目标, 具有实用性。以某省电网日负荷数据为例, 对 4 种日前发电计划模型进行了对比分析, 通过调整模型中 SO<sub>2</sub> 的惩罚价格因子, 灵活协调发电调度的经济性和环保性, 验证了模型的实用性与有效性。

**关键词:** 节能减排; 日前发电计划; 节能发电调度; 经济调度; 煤耗; 惩罚价格因子

## 0 引言

长期以来, 我国发电调度一直以电厂或发电机组为单位大致平均分配发电量指标, 没有很好地协调节能性和环保性。2007 年 8 月 8 日发布的《国务院办公厅关于转发发展改革委等部门节能减排发电调度办法(试行)的通知》<sup>[1]</sup>要求改革现行发电调度方式, 开展节能减排发电调度。节能减排发电调度是指在保障电力可靠供应的前提下, 按照节能、经济的原则, 优先调度可再生发电资源, 按机组能耗和污染物排放水平由低到高排序, 依次调用化石类发电资源, 最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放。

与传统调度方式相比, 节能减排发电调度强调在考虑环境约束的条件下尽可能实现节约能源的目标。节能减排发电调度模式是当前我国电力调度的发展趋势, 是科学发展观的直接体现。

从数学模型上看, 节能减排发电调度就是在传统经济调度的基础上, 计入污染物排放量限制形成的新数学规划问题。文献[2]首次明确提出了计算及污染物排放的经济调度问题, 随后随着环境问题越来越受到重视, 学者们对这一问题进行了深入的研究。文献[3-4]是这一领域内的综述性文献。文献[5-6]探讨了求解计及排放约束的机组组合问题。文献[7]根据上述思路测试了 IEEE14 节点和 131 节点系统。文献[8]在求解经济调度方案中说明了如何应用线性规划求解多目标规划问题, 对越界约束如何进行调整, 提出了修正单纯型法和第三种单纯型线性规划法求解思路, 其模型包括了机组的有功调整

和无功调整。反馈式求解方法是一种从电力系统控制出发的求解思路:文献[9]在求解出常规经济调度方案后,在校核的时候有越界的排污约束,然后计及起作用的排污约束重新求解经济调度。文献[10]提出了应用二次规划方法求解计及网络约束和污染物排放约束的实时经济调度问题,它将所求问题构造成一个标准的二次规划模型,用导数寻优的方法迭代求解,并测试了5机10节点13支路的系统。

国内研究有关节能减排调度的文献并不多。文献[11]探讨了节能降耗和电力市场联合实施的方案。文献[12]结合四川电网发电运行特点,研究了节能减排实时调度的优化模型。文献[13]以广东电网数据为依据,分析了节能发电调度的计划模型与算法。其他还有文献[14-17]等。

本文将根据对污染物排放的不同处理,分析4种节能减排发电调度模型的特点,重点研究适用于实用化的第4种模型,该模型能够按照调度部门的要求选择侧重节能或者减排。文章还将根据某省电网实际数据验证模型和算法的有效性和实用性。

## 1 发电调度模型

### 1.1 问题简介

节能减排发电调度可以分成2部分:一部分是机组组合,另一部分是经济调度的负荷分配。

机组组合问题的研究方法有优先次序法、动态规划法、整数规划法等。本文重点研究考虑节能减排的经济调度问题,是在机组组合状态已经确定的前提下考虑如何分配负荷以实现目标的最优。

从经济调度的观点来看,电厂的2种主要排放物是硫氧化物和氮氧化物。本文对于SO<sub>2</sub>的计算方法采用的是文献[18]所提出的物料衡算法,SO<sub>2</sub>的排放速率限值可以根据GB13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》中的公式计算得来;由于氮氧化物的排放要求是定性的,且氮氧化物排放的计算较复杂,目前还处于摸索阶段,本文暂不定量考虑氮氧化物的排放影响。

从数学模型上看,节能减排发电调度就是通过改变传统经济调度的目标函数或约束条件,形成并求解一个计及污染物排放量限制的数学规划问题。

### 1.2 目标函数和约束条件

节能减排发电调度模型有4种。

1) 模型1,最小化燃料量,表示为

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} F_{i,t}(P_{i,t}) \quad (1)$$

式中: $F_{i,t}(P_{i,t})$ 为 $t$ 时段第 $i$ 发电机组输出 $P_{i,t}$ 对应的煤耗量, $t$ ;  $N_g$ 为运行机组总数量。

从式(1)可以看到只要知道机组的煤耗特性曲线,就可以得到机组的煤耗和功率的关系。

2) 模型2,最小化SO<sub>2</sub>排放量,表示为

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} E_{SO_2(i,t)}(P_{i,t}) \quad (2)$$

式中 $E_{SO_2(i,t)}(P_{i,t})$ 为 $t$ 时段第 $i$ 发电机输出(MW)对应的SO<sub>2</sub>排放量, $t$ 。

3) 模型3,计及SO<sub>2</sub>排放量约束下最小化燃料量,表示为

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} F_{i,t}(P_{i,t}) \quad (3)$$

可以看到,模型3的目标函数与模型1相同。

4) 模型4,计及SO<sub>2</sub>排放量的条件下最小化燃料费用和SO<sub>2</sub>排放量的复合,表示为

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} [F_{i,t}(P_{i,t})C_{P_{i,t}}^F + E_{SO_2(i,t)}(P_{i,t})E_{\text{value}}] \quad (4)$$

式中: $C_{P_{i,t}}^F$ 为 $t$ 时段第 $i$ 发电机组燃料成本; $E_{\text{value}}$ 为SO<sub>2</sub>排放惩罚价格。

上述4个模型考虑的共同约束条件有:

1) 负荷平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} = P_{\text{load},t} + P_{\text{losses},t} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{load},t}$ 为 $t$ 时段系统总负荷; $P_{\text{losses},t}$ 为 $t$ 时段系统传输损耗。

2)  $t$ 时段第 $i$ 机组出力上下限约束。

$$P_{i,t}^{\text{Mn}} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{Mx}}, \quad i=1, \dots, N_g \quad (6)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{Mn}}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 发电机组最小发电功率; $P_{i,t}^{\text{Mx}}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 发电机组最大发电功率; $P_{i,t}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 发电机组发电功率。

3) 机组爬坡速率的约束。

$$\Delta \bar{P}_i < P_{i,t} - P_{i,t-1} < \Delta \underline{P}_i \quad (7)$$

式中: $P_i(t)$ 为第 $i$ 发电机组第 $t$ 时段发电功率; $\Delta \bar{P}_i$ 为机组 $i$ 最大降出力速率约束; $\Delta \underline{P}_i$ 为机组 $i$ 最大升出力速率约束。

另外,模型3和模型4考虑的约束条件为SO<sub>2</sub>约束,即

$$\sum_{i=1}^{N_g} E_{SO_2(i,t)}(P_{i,t}) \leq L_{SO_2} \quad (8)$$

式中 $L_{SO_2}$ 为控制区域内每时段SO<sub>2</sub>的限值, $t$ 。

本文研究经济调度问题,机组的备用约束和机

组的最小开停机约束在机组组合中考虑，网络约束在安全校核中考虑。

### 1.3 SO<sub>2</sub> 排放量的计算模型

排放调度需要建立排放与机组输出功率的函数模型。可以建立 2 种模型：1) 与燃料消耗相关的模型；2) 与烟囱排放测量相关的模型。后一种模型拥有更高的精确度，但是需要从电厂烟囱实时检测 SO<sub>2</sub> 的排放量，因此本文 SO<sub>2</sub> 的模型采用与燃料消耗相关的模型。

对于 SO<sub>2</sub>，其模型可以定义为消耗的燃料总量乘以一个常量的函数，即

$$E_{\text{SO}_2(i,t)}(P_{i,t}) = 2F_{i,t}(P_{i,t})FS_i(1 - N_{i,\text{SO}_2}) \quad (9)$$

式中： $F$  为煤中 S 转化成 SO<sub>2</sub> 的转化率(火力发电厂锅炉取 0.90，工业锅炉、炉窑取 0.85，营业性炉灶取 0.80)； $S_i$  为第  $i$  机组所用煤的含硫量，%； $N_{i,\text{SO}_2}$  为第  $i$  机组的脱硫效率，%，若未采用脱硫装置， $N_{i,\text{SO}_2} = 0$ 。

由式(9)可见，SO<sub>2</sub> 的计算方法涉及燃煤的重量  $F_{i,t}(P_{i,t})$ 、锅炉的类型( $F$ )、含硫量( $S_i$ )以及脱硫效率( $N_{i,\text{SO}_2}$ )的等量值的计算。

燃煤量以  $F_{i,t}(P_{i,t})$  表示，即计算 SO<sub>2</sub> 的排放量应以机组发电耗煤量为准。原因是：1) 由于发电厂要保证连续发电，发电厂内的煤场(罐)应有一定的储备量，煤在储存过程中会有一定的损失(通常称为“存损”)，因此统计期内入厂煤量并不一定等于入炉耗煤量；2) 同一发电厂可能有不同型式的锅炉，其烟气处理方式也不尽相同，因此不同锅炉的脱硫效率是不同的，对于不同脱硫效率的锅炉，要分别计算其耗煤量；3) 同一发电厂，燃用同一含硫量煤种，在同样耗煤量下，不同脱硫效率锅炉的耗煤量不同，排入大气的 SO<sub>2</sub> 量也不同，所以，必须以入炉煤量作为计算 SO<sub>2</sub> 排放量的基准。煤中的含硫量( $S_i$ )需要化验室测定并换算成实际入炉煤的含硫量。

### 1.4 模型对比分析

建立节能减排发电调度模型时，既可以将污染物排放计入目标函数中，也可以将其列入约束条件中，不同的处理方法可以建立对应的不同模型。本文分析了 4 种节能减排发电调度模型的特点：模型 1 的目标函数为最小化燃料，它是传统的经济调度模型；模型 2 的目标函数为最小化污染物排放量，它是不考虑燃料费用情况下单纯的追求优化排放；模型 3 的目标函数是包含排放约束的条件下最小化

燃料费用，它适应现有的法律法规对排放的要求；模型 4 是在考虑了排放的约束的情况下，优化污染物排放费用和燃料费用 2 个目标。

4 种模型的不同点是目标函数，以及是否考虑了 SO<sub>2</sub> 排放总量的约束；相同点是考虑的约束有爬坡速率约束、负荷平衡约束、机组出力上下限约束、机组电量约束。4 种模型包含的共同约束条件有式(5)(6)(7)，后 2 种模型同时还包括式(8) SO<sub>2</sub> 约束。

节能和减排是 2 个相互冲突的优化目标。如果仅寻求煤耗最小，优化算法会趋向于选择耗煤少、没有安装脱硫装置的机组，这类机组的排放会比较大，这样最后得到的排放不会是最小的；若仅寻求排放最小的机组，同样煤耗不可能是最小。协调节能和减排的方法是寻求一个因子将 2 者转化成单目标。模型 4 是将燃料量和污染物排放量 2 个优化目标乘以价格因子从而转化为单目标规划。煤价由电厂报价可以得到，而对于 SO<sub>2</sub> 的排放惩罚价格，相应的规定并没有给出具体的值或者计算方法。本文通过算例分析，调整这个排放惩罚价格的值，可以获得不同的优化结果，由结果可以发现：当排放惩罚价格设定得比较高时，排放值会比较低，煤耗值相应地比较高；排放惩罚价格设定得比较低时，排放值会比较高，煤耗值相应地就比较低。这样排放惩罚价格可以做为一个调整因子，调度机构可以根据自己对排放的要求高低修改具体的排放惩罚价格对应的调整因子的值，改变煤耗和 SO<sub>2</sub> 的对比权重就会得到不同的优化结果，模型 4 也考虑了现行的法律法规所要求的 SO<sub>2</sub> 的限制约束。

## 2 算法分析

日前发电计划包含 96 个时段，整体求解比较难，上述 4 种模型基于 1 个时段，可对各时段循环运算。虽然经济调度程序是分段运行的，但本文模型的约束条件考虑了机组爬坡速率的约束，机组运行考虑了其前一状态的发电功率，不会出现相邻 2 时段机组出力出现陡降、陡升的过程。

求解经济调度的算法主要有拉格朗日算法、线性规划法、动态规划法等。由于机组的煤耗微增率曲线是非线性的，且 SO<sub>2</sub> 的排放量表示成燃料量的线性表达式时，污染物排放函数仍然是非线性的。实际的煤耗微增率特性曲线并不全是连续的，约束条件也是非线性的。通过对煤耗微增率特性曲线分段线性化，采用线性规划法能够有效快速地解决这种问题。文献[8]说明了如何应用线性规划法求解多

目标多约束的问题。

另外,根据节能发电调度的要求,将不同机组分成以下几种类型:必停机组、经济调度机组和固定出力机组。其中水电机组、风电机组等做为固定出力机组处理。

基于 CC-2000A 调度自动化系统,开发了节能减排发电调度算法应用程序,该应用与调度员潮流、静态安全分析等软件一体化设计<sup>[19]</sup>,潮流和安全分析可对日前发电计划进行安全校核,校验支路和断面是否过负荷,同时潮流向发电计划提供网损修正系数,协调了节能减排、网络约束和网损,保证了发电计划不仅考虑电力系统的经济性,而且考虑运行的安全性。

### 3 算例分析

本文算例采用某省一天的实际发电负荷曲线,基于上述 4 种模型,计算了采用不同模型的机组日前发电计划、煤耗和 SO<sub>2</sub> 排放量,见表 1。本文主要分析火电机组的发电计划,水电机组和风电机组不参加经济调度,作为固定出力机组从总负荷中减去。

表 1 不同经济调度模型的对比分析

模型	煤耗量/t	SO <sub>2</sub> 排放量/t
1	274 756.968 750	4 380.264 160
2	282 189.000 000	4 022.093 750
3	280 557.031 250	4 141.817 383
4	282 355.718 750	4 068.033 447

由表 1 可见,最小化燃料模型的煤耗量最小,排放量最大;最小化 SO<sub>2</sub> 排放量模型的煤耗量最大,排放量最小;后 2 种模型的煤耗量和排放量处于前 2 种模型之间。以模型 1 和模型 2 对比可以看到,模型 1 的煤耗量比模型 2 的煤耗量少 7432.031 25 t,而排放量相应地增加了 358.17041t。

模型 4 在不同 SO<sub>2</sub> 排放惩罚价格因子条件下的计算结果见表 2。由表 2 可见,当排放惩罚价格为 0 时,模型 4 就相当于模型 3,这由结果可以证明。当排放惩罚价格增大时,SO<sub>2</sub> 在目标函数里的权重

表 2 模型 4 在不同的 SO<sub>2</sub> 排放惩罚价格因子下的计算结果

排放惩罚价格/元	煤耗量/t	SO <sub>2</sub> 排放量/t
0	280 557.031 250	4 141.812 988
500	280 761.593 750	4 121.026 855
1000	280 940.093 750	4 116.255 859
2500	281 532.468 750	4 090.322 266
5000	282 355.718 750	4 068.033 447
10000	282 638.468 750	4 045.827 881

随之增加,相应地排放量减少,煤耗量也随之增加。

由表 2 分析,如果排放惩罚价格取值点数足够多,可以得到煤耗量和排放量的精确变化曲线。在实际应用中可以根据排放要求的高低,应用此曲线选择排放惩罚价格值。若对排放要求高,而对煤耗要求相对小,那么可以选择比较高的排放惩罚价格;相反,选择比较低的排放惩罚价格。

需要说明的是,可以在法律法规的要求的范围内修改 SO<sub>2</sub> 排放约束限值。当 SO<sub>2</sub> 的约束限值比较低时,排放量会比较低,煤耗值也会相应地增高;当 SO<sub>2</sub> 约束限值比较高时,排放量就会增高,煤耗值也会相应地降低。此外,SO<sub>2</sub> 的约束限值还根据机组的实际排放要求在不同的时段分别进行调整,但是如果限值取得过低或不合理,会致使调度无法满足负荷要求,此时线性规划法无解。

因此,通过调整排放惩罚价格因子在节能和减排之间实施灵活调度更具有普遍性和适应性。

### 4 结论

本文所述 4 种模型中,模型 3 可以满足现有的法律法规对于节能减排的要求;模型 4 通过价格因子把煤耗和排放 2 个优化目标转化成 1 个优化目标,在编制发电计划时,根据对排放的要求,通过调整排放的价格因子,从而改变煤耗和排在目标函数里的权重,相应地就会得到侧重降低排放,或者侧重降低煤耗的结果。因此模型 4 为发电计划的编制提供了一个在节能和减排之间更加灵活的调度方法。

### 参考文献

- [1] 国务院办公厅. 国办发[2007]53 号 关于转发发展改革委等部门节能发电调度办法(试行)的通知[S]. 北京: 国务院办公厅, 2007.
- [2] Gent M R, Lamont J W. Minimum emission dispatch[J]. IEEE Trans on PAS, 1971, PAS-90: 2650-2660.
- [3] Lamont J W, Obessis E V. Emission dispatch models and algorithms for the 1990s[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 941-947.
- [4] Talaq J H, EI-Hawary F, EI-Hawary M E. A summary of environmental/economic dispatch algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1508-1516.
- [5] Gjengedal T. Emission constrained unit commitment[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(1): 132-138.
- [6] Lu Bo, Shahidehpour M. Unit commitment with flexible generating units[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 1022-1034.
- [7] Talaq J H, EI-Hawary F, EI-Hawary M E. A sensitivity analysis approach to minimum emission power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 436-442.
- [8] Farag A, Al-Baiyat S, Cheng T C. Economic load dispatch and multiobjective optimization procedures using linear programming

- techniques[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 731-738.
- [9] Ramanathan R. Emission controlled economic dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(4): 1994-2000.
- [10] Fan Jiayuan, Zhang Lan. Real-time economic dispatch with line flow and emission constraints using quadratic programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 320-325.
- [11] 胥传普, 杨立兵, 刘福斌. 关于节能降耗与电力市场联合实施方案的探讨[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 99-102.  
Xu Chuanpu, Yang Libing, Liu Fubin. Analysis on the project of energy-conservation associated with electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 99-102(in Chinese).
- [12] 王超, 张晓明, 唐茂林, 等. 四川电网节能减排发电实时调度优化模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 89-92.  
Wang Chao, Zhang Xiaoming, Tang Maolin, et al. Real-time dispatching optimization model for energy-saving and emission-reduction generation in Sichuan grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 89-92(in Chinese).
- [13] 张宁, 陈慧坤, 骆晓明, 等. 广东电网节能发电调度计划模型与算法[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 11-15.  
Zhang Ning, Chen Huikun, Luo Xiaoming, et al. Model and algorithm of energy-conservation based generation dispatching for Guangdong Power Grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(25): 11-15(in Chinese).
- [14] 钟海旺, 康重庆, 陈慧坤, 等. 广东电网节能发电调度潜力分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 7-12.  
Zhong Haiwang, Kang Chongqing, Chen Huikun, et al. Analysis on potential of energy-conservation based dispatch for Guangdong Power Grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 7-12(in Chinese).
- [15] 范玉宏, 张维, 叶永松, 等. 基于机组煤耗高低匹配替换的区域电网节能调度模型[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 78-81.  
Fan Yuhong, Zhang Wei, Ye Yongsong, et al. Energy conservation generation dispatching model in regional power network based on high-low matching of coal consumption rates of units[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 78-81(in Chinese).
- [16] 陈皓勇, 张森林, 张尧. 区域电力市场环境下节能发电调度方式[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 16-21.  
Chen Haoyong, Zhang Senlin, Zhang Yao. Energy saving power generation dispatching in regional electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 16-21(in Chinese).
- [17] 李晓磊, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于动态搜索线性混合整数法的机组组合新算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 21-25.  
Li Xiaolei, Zhou Jingyang, Yu Erkeng, et al. Linear mixed integer programming algorithm for unit commitment based on dynamic search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 21-25(in Chinese).
- [18] 安洪光. 火力发电厂二氧化硫排放量的计算方法[J]. 华北电力技术, 2000(1): 11-12.  
An Hongguang. Calculation method on SO<sub>2</sub> emission in fossil-fuel power plants[J]. North China Electric Power, 2000(1): 11-12(in Chinese).
- [19] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统(EMS)[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 100-160.



韩彬

收稿日期: 2009-06-30。

作者简介:

韩彬(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为经济调度、发电计划, E-mail: hb\_xsp@163.com;

周京阳(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统 EMS、电力市场等方面的研究工作;

崔晖(1982—), 男, 工程师, 从事电力系统经济调度等方面的研究工作;

李晓磊(1981—), 男, 博士研究生, 从事电力系统经济调度、分析和控制的研究工作, E-mail: mcmeili@126.com。

(责任编辑 李兰欣)