

# 基于节能发电原则的实时发电调度优化模型的研究

唐茂林, 王超

(四川省电力公司调度中心, 四川 成都 610041)

**摘要:** 随着国家实施节能发电调度的逐步展开, 电网调度机构如何落实节能减排政策已成为当前重要的研究课题。论文从影响实时发电调度的因素出发, 研究了适用于电网调度员节能发电实时调度的优化模型, 以指导调度员实时发电调度。该模型依据节能发电排序表, 采用小步长最优次序法, 以发电能耗最少为目标函数, 并以四川电网发电运行实例, 计算验证了该模型的正确性。

**关键词:** 节能减排; 发电调度; 小步长最优次序法

## Research on the real-time dispatching optimization model of energy-saving generation in Sichuan grid

TANG Mao-lin, WANG Chao

(Dispatching Center, Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** During carrying on the energy-saving policy, how to operate this police is studying in grid dispatching center. From the factors of influencing the real-time generating dispatching, this paper studies the real-time dispatching optimization model of energy-saving generation, which is useful for grid dispatchers to instruct their real-time dispatching. This model is used by the way of merit-order-based dispatch. Its objective function is the minimum consumption of the generation energy. The model is proved accurate by the example computation.

**Key words:** energy-saving; generation dispatching; merit-order-based dispatch

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)07-0047-04

## 0 引言

2007年8月, 国务院办公厅印发《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》, 指出改革现行发电调度方式, 开展节能发电调度, 减少能源消耗和污染物排放。电网调度员如何从传统发电调度模式转变为节能发电调度模式, 面临巨大的压力。从目前的文献资料<sup>[1~3]</sup>来看, 对节能发电调度, 更多的从政策、策略方面探讨和研究, 或者针对日前发电计划来建立优化模型<sup>[4,5]</sup>, 而针对电网调度员实时发电调度的优化模型研究却很少。在此背景下, 本文将依据节能发电调度原则<sup>[6]</sup>, 并结合电网发电运行特点, 研究适用于电网调度员实时节能发电调度的优化模型。

## 1 影响实时发电调度的因素

从实施节能发电调度模式初期来看, 发改委(或经委)按照节能原则编制的发电排序表, 是电网调度机构实施节能发电调度的重要依据。在保证电网

安全、稳定运行的基础上, 电网调度员根据电网运行特点, 在实时发电调度中, 除了参照各电厂日前发电计划外, 还需考虑如何科学地根据不同季节、不同时段实时地调整发改委(或经委)已做的发电厂排序表次序进行发电调度, 既满足电网安全运行, 又达到节能减排目标。主要考虑如下因素:

① 电网日负荷特性。如果电网在不同季节、单日内不同时段发电负荷变化大, 电网调度员就需要结合发电机组运行特点, 实时调整发电排序表中机组次序。比如, 在水电装机容量较多的电网, 没有库容调节能力水电机组, 只能按天然来水发电, 应优先按来水发电。而对于具有可调容量较小的水库(日、周调节能力水库)的机组来说, 虽然调节性能差, 但是仍然具有5~8h的调节能力, 对于这部分水电机组(以下统称为弱调节水电机组)的发电调度, 调度员必须考虑实时调整排序表, 以满足电网负荷需求和安全运行, 尤其是在平水期和枯水期, 在全网负荷低谷和平段期间, 必须减少弱调节水电机组发电来蓄水, 以满足高峰时段负荷需求。

② 电网发电机组运行特点。不同类型的发电机组，其发电运行特点也有很大区别，如启停机速度、机组爬坡率、水库调节能力、检修计划等等。

③ 电网安全约束。当出现危及电网安全、稳定运行的突发事件时，调度员在考虑安全约束的基础上，按照节能发电原则进行实时调度发电。

## 2 建立优化模型

由于负荷预测精度、天气和事故等因素，日前计划给出的发电容量与电网实际运行的情况会有一定差别。在实时调度中，如果需要在日前预调度计划基础上增加购买电量，比如超短期负荷预测比日前负荷预测值高，则实时调度为上调调度。否则，如果需要减少日前购买的电量，则实时调度为下调调度。根据排序表，在上调调度中，找出排序最前的机组上调，下调调度中找出排序最后的机组下调。

因此，调度员需参考发电计划，根据下一个调度时段的发电厂排序和超短期负荷预报，考虑机组发电容量限值和爬坡速率情况下，在满足系统安全稳定运行的基础上，按发电能耗最小的目标安排各机组实际发电计划。

### 2.1 优化模型函数

电力系统为非线性系统，在某一运行点处做一阶 Taylor 展开可得到线性近似模型。实时平衡发电调度是在日前发电计划曲线结果的基础上进行调整，所以采用了线性化的增量交易模型，列写如下：

$$\min f(\Delta P) = \sum_{i \in N_G} C_i(\Delta P_i) \quad (1)$$

$$H(\Delta P) = \sum_{i \in N_G} h_i \cdot \Delta P_i \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \Delta P_{\text{NET}} = \sum_{i \in N_G} \Delta P_i \quad (3)$$

$$\Delta L = S^* \cdot \Delta P \quad (4)$$

$$\Delta G = A \cdot \Delta L \quad (5)$$

$$\Delta L_{\min} \leq \Delta L \leq \Delta L_{\max} \quad (6)$$

$$\Delta G_{\min} \leq \Delta G \leq \Delta G_{\max} \quad (7)$$

$$\Delta P_{\min} \leq \Delta P \leq \Delta P_{\max} \quad (8)$$

式中： $\Delta P$  为机组有功调整矢量， $N$  是机组所在节点的集合， $C_i(\Delta P_i)$  是机组  $i$  出力增加  $\Delta P_i$  所增加的能耗， $C_i$  是机组单位发电能耗指标，具体数值由发改委（或经委）确定。 $h_i$  是火电机组  $i$  煤耗， $\Delta P_{\text{NET}}$  是全网功率调整总量。 $\Delta L$  和  $\Delta G$  分别是线路和断面的有功潮流变化。 $\Delta P_{\min}$  和  $\Delta P_{\max}$  是机组的出力极限约束（包含爬坡速率约束）， $\Delta L_{\min}$  和  $\Delta L_{\max}$  是线路的功率变化约束， $\Delta G_{\min}$  和  $\Delta G_{\max}$  是断面的功率变

化约束。 $S^*$  是灵敏度矩阵， $A$  是断面-线路关联矩阵。

式（1）~（8）中，约束均为线性表达式，只有目标函数比较复杂，它可以用分段水平线表示，此时的模型为分段线性规划模型。

模型中考虑的电网安全约束主要包括线路热稳定极限和断面的暂态稳定极限。暂态稳定极限采用离线计算出的极限值，并包括正向极限  $G_{\text{pos}}$  和反向极限  $G_{\text{neg}}$ 。在实时调度中，根据开关的遥信来判断断线路是否运行，从而选择合适运行方式下的断面暂稳极限。

式（3）~（8）中的增量约束只要在开始前计算好，在迭代中不需要重新计算。

$$\Delta P_{\text{NET}} = F + X - \sum_{i=1}^{N_p} P_{0i} \quad (9)$$

$$\Delta P_{\min} = P_{\min} - P_0 \quad (10)$$

$$\Delta P_{\max} = P_{\max} - P_0 \quad (11)$$

$$\Delta L_{\min} = -L_{\max} - L_0 \quad (12)$$

$$\Delta L_{\max} = L_{\max} - L_0 \quad (13)$$

$$\Delta G_{\min} = -G_{\text{neg}} - G_0 \quad (14)$$

$$\Delta G_{\max} = G_{\text{pos}} - G_0 \quad (15)$$

式中： $F$  是超短期负荷预测的负荷值， $X$  是区域交换计划值， $P_{0i}$  是第  $i$  台机组的日前发电计划， $N_p$  是日前发电计划机组集合， $L_0$  和  $G_0$  分别是初始状态下线路和断面的潮流， $L_{\text{M}}$  是线路热稳定约束矢量， $G_{\text{pos}}$  和  $G_{\text{neg}}$  是断面正向和反向暂态稳定极限。

### 2.2 优化算法：小步长最优次序法

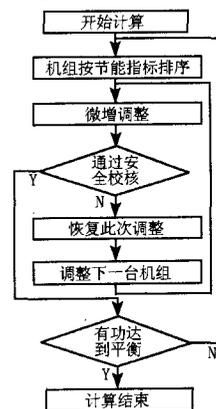


图 1 计算流程图

Fig.1 Computation flow diagram

最优次序法来源于用在经济调度中的等微增

率原理, 因其计算快速并且鲁棒性好, 得到了广泛应用。

图 1 即为最优次序法的计算流程框图。

考虑到各种机组的爬坡速率不同, 故在最优次序法中引入机组调节小步长, 并针对不同机组应用不同步长。设系统不平衡功率为  $\Delta P_{NET}$ , 每台机组每次调节小步长为  $\delta_i$ ,  $\delta_i$  取第  $i$  台机组的爬坡率。当  $\Delta P_{NET} > 0$  时  $\delta_i > 0$ , 当  $\Delta P_{NET} < 0$  时  $\delta_i < 0$ 。

此时算法流程可以描述为:

① 形成初始机组排序表, 机组调整计划全部清零, 设置发电调节总量  $\Delta P$  为 0。

② 在电网安全稳定运行基础上, 调整发改委(或经委)编制的发电排序表, 根据机组的预调度计划、调整计划及实时运行情况, 并参考节能减排指标, 对机组进行排序, 如果是上调调度按由先到后的顺序排序, 如果是下调调度按由后到先的顺序排序。

③ 设置开始调节机组编号  $i = 0$ 。

④ 选排从编号为  $i$  的机组开始, 在第  $i$  台机组的调整计划加上调节小步长  $\delta_i$ , 即  $\Delta P_i = \Delta P_i + \delta_i$ 。如果  $i + 1$  大于排序表机组总数, 那么系统中没有充足的可调发电消除不平衡功率, 退出计算。

⑤ 校验第  $i$  台机组如果调节  $\Delta P_i$  后, 是否满足机组技术出力限制、机组爬坡约束、备用和 AGC 机组可调范围约束等机组可调范围约束。如果不满足, 记录第  $i$  台机组的调节容量  $\Delta P_i = \Delta P_i - \delta_i$ 、以及是什么约束导致的机组不参加调节, 并根据其煤耗率计算其增加的煤耗量及排放指标, 设置  $i = i + 1$ , 并转到第④步。

⑥ 校验可调机组在调节小步长  $\delta_i$  后是否满足网络安全约束。如果不满足, 记录第  $i$  台机组的调节容量  $\Delta P_i = \Delta P_i - \delta_i$ 、以及在什么条件下引起什么元件越限了什么约束(线路传输功率、断面传输功率或母线电压等), 并根据其煤耗率计算其增加的煤耗量及排放指标, 设置  $i = i + 1$ , 并转到第④步。

⑦ 设置调整总加  $\Delta P = \Delta P + \delta_i$ , 如果  $|\Delta P| \geq |\Delta P_{NET}|$  跳到步骤⑧, 如果  $|\Delta P| < |\Delta P_{NET}|$ , 则跳到步骤④。

⑧ 计算结束, 形成平衡计划。

### 3 计算实例

本文以四川电网发电运行为例, 来验证该模型的正确性。

#### 3.1 四川电网发电运行特点

四川作为全国水电资源大省, 电网水电火电并存, 水电比重大, 为充分利用水力资源, 四川电网发电运行有不同于其它省级电网的鲜明特点。如水电厂水库调节能力差、火电机组调峰能力差、水电火电在不同季节单日不同时段发电负荷变化大, 等等。结合四川电网运行特性, 考虑电网安全稳定运行的基础上, 调整发改委(或经委)编制的发电机组排序次序, 如表 1 所示。其中, 次序 1、2、3、4 表示先后次序, ①代表无库容的径流式水电机组类、②代表弱调节水电机组类、③代表季调节及以上水库水电机组类、④代表火电机组类。

表 1 不同时期发电排序表

Tab. 1 Generation sorting in different times

次序	丰水期			平水期			枯水期		
	低谷	平段	高峰	低谷	平段	高峰	低谷	平段	高峰
1	①	①	①	①	①	①	①	①	①
2	②	②	②	③	③	②	④	④	②
3	③	③	③	②	②	③	③	③	③
4	④	④	④	④	④	④	②	②	④

在四川电网中, 风能、太阳能等可再生能源比重很少, 不到 1%, 另外, 考虑电网安全稳定运行因素, 进入 AGC 调整容量的机组不参与排序。因此本文不考虑这两类能源发电机组的优化问题。

#### 3.2 计算结果

以四川电网中水电火电并存的川西、以及眉山、乐山地区电厂为例, 这些地区包括 43 个径流式水电站(可调节容量 6794.89 MW)、3 个季调节及以上水电站(可调节容量 1560 MW)、10 个火电厂(6 个燃煤、4 个燃气, 可调节容量 2432.2 MW)。限于篇幅, 仅以丰水期低谷(07 年 8 月 10 日 00:00—00:15 时段)和枯水期低谷(06 年 12 月 18 日 00:00—00:15 时段)的上调调度情况的计算结果来说明模型的正确性。同时, 使用相同的优化方法, 采用电力市场中电网购电费用最少为目标函数, 来比较两种模型的节能效果。表中标准煤耗及排放  $SO_2$  浓度结果, 主要参考相关电厂技术指标求得。

表 2 是丰水期低谷时段节能发电调度计算结果, 可知: 在负荷预测功率缺额 382.9MW 情况下, 水电在完成日前发电计划基础上, 首先将安排径流式水电(包括无调节、日、周调节能力水电)满发, 未满发的弱调节水电厂(如龚嘴、冷竹关、小关子、阿坝地区水电厂)受电网稳定要求限制, 其次安排季调节及以上水电参与部分电力调节, 剩余电力调节由火电(金堂电厂)完成调节, 其余火电机组基本在最低技术出力运行。

表 2 丰水期低谷实时节能发电优化表

Tab.2 Optimized table of real-time energy-saving generation for valley load in full water season

电厂	计划出力 /MW	调整出力 /MW	未调发电	新增标准煤耗/T 排放 SO <sub>2</sub> 浓度/ (mg/m <sup>3</sup> )
弱调节水电	6462.5	193.56	9个	0
季调节水电	1345	214.83	0	0
火电	655	金堂 74.53	10个	煤耗 6.587 排放 49
合计	8462.5	382.92	19个	煤耗 6.587 排放 49

表 3 丰水期低谷实时购电费用最少优化表

Tab.3 Optimized table of real-time minimum fee-purchasing for valley load in full water season

电厂	计划出力 /MW	调整出力 /MW	未调发电	新增标准煤耗/T 排放 SO <sub>2</sub> 浓度/ (mg/m <sup>3</sup> )
弱调节水电	6462.5	193.56	9个	0
季调节水电	1345	164.83	1个	0
火电	655	岷江 32.16 江油 92.35	8个	岷江: 煤耗 5.026、 排放 345 江油: 煤耗 6.735 排放 218
合计	8462.5	382.90	18个	煤耗 11.761、 排放 563

通过与表 3 电力市场中购电费用最少优化模型得出的结果比较可知,某些火电竞价比水电低,安排先于某些水电,这样就造成增加煤耗和 SO<sub>2</sub>排放量,同样,也没有安排大容量、低煤耗的火电厂(如金堂电厂:装机 2×600 MW)发电,而是先安排容量较小、煤耗较高的火电(如岷江电厂:装机 2×135 MW,江油电厂:装机 2×330 MW)发电,节能减排效果明显下降。

表 4 枯水期低谷实时节能发电优化表

Tab.4 Optimized table of real-time energy-saving generation for valley load in dry season

电厂	计划出力 /MW	调整出力/MW	未调发电厂
火电	2166.2	246.19	
季调节水电	1245	313.0	
弱调节水电	4129.5	129.75	38个
合计	7540.7	688.94	38个

表 4 是枯水期低谷时段节能发电调度计算结果,可知:在负荷预测功率缺额 688.94 MW 情况下,水电来水较少,为满足高峰时段负荷需求,无调节

能力径流式水电按来水发电外,考虑弱调节水电厂蓄水,以满足高峰时段负荷需求。因此,首先安排火电满发,季调节以上水电参与部分电力调节,尽量保持高水位,剩余电力再由弱调节水电厂完成调节。

从以上分析中,可以看出,四川电网在不同时期的发电调度具有很大的差异,这些差异,都需要调度员根据当值电网运行情况,依据节能减排策略,采取适用的发电调度优化模型方案,以达到充分利用能源、合理降低能耗的目的。

## 4 结论

通过以上分析和研究,并以实例计算可知,本文研究的节能减排发电实时调度优化模型,结合四川电网发电运行特点,非常适用于电网调度员实时发电调度,可协助调度员从传统发电调度模式向节能减排调度模式转变,有效地适应了国家节能减排的发展战略。

## 参考文献

- [1] 赵风云.对新型节能发电调度方式的探讨[J].电业政策研究,2007,(3):23-24.  
ZHAO Feng-yun.Discussion on New Energy Conservation Generation Dispatching Way[J].Electrical Industry Policy Research,2007,(3):23-24.
- [2] 白建化,张风营.发电调度:电力降耗突破口[J].中国电力企业管理,2007,(2):22-23.  
BAI Jian-hua,ZHANG Feng-ying.Electricity Generation Dispatching: Breach of the Electric Power Falling Consumption[J].China Power Enterprise Management,2007,(2):22-23.
- [3] 梁志宏.集散式交易模式:节能调度的有效选择[J].中国电力企业管理,2007,(3):13-15.  
LIANG Zhi-hong.Collecting and Distributing Transaction: Effective Choose of the Energy Conservation Dispatching[J].China Power Enterprise Management,2007,(3):13-15.
- [4] 马瑞.考虑水火协调的多目标优化分组分段竞标模型[J].中国电机工程学报,2004,24(11):53-57.  
MA Rui. Considering the Model of the Multi-objective Optimization Grouping and Partition Competition of the Hydro and Thermal[J].Proceedings of the CSEE,2004,24(11):53-57.
- [5] 赵永龙,牛蓓.四川电网水电运行管理探讨[J].四川水力发电,2004,(9):81-83.  
ZHAO Yong-long, NIU Pei.Discussion on Hydro-power Operating Management in Sichuan Grid[J].Sichuan Water Power,2004,(9):81-83.
- [6] 国务院办公厅.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[Z].2007.

(下转第 61 页 continued on page 61)

要是由于延用了原来的测试软件。

#### 4 数字化保护的测试方法

利用 3 中所述的测试系统, 可以实现对数字化保护装置的功能测试。进行测试时, 测试仪、控制测试仪的 PC 机、被测装置的 IP 地址应该设置在同一网段。

##### 4.1 通过订阅 GOOSE 测试保护装置的跳闸信号

测试仪要能够感受被测对象发出的 GOOSE 信息中的跳闸信号, 必须先订阅 GOOSE。订阅时, 根据保护装置的配置文件, 在 GOOSE 配置模块中配置好将要接收的 GOOSE 的具体细节, 包括数据集中的数据。另外必须指定下列参数: 1) GOOSE control reference (GOOSE 控制参引); 2) GOOSE ID (GOOSE 标识); 3) Application ID (应用标识); 4) MAC Address (MAC 地址), 以保证测试仪可靠收到 GOOSE 信息。

配置完成后, 将 GOOSE 中表示跳闸信号的数据映射到测试仪的开关量输入上, 这样当测试仪接收到 GOOSE 报文时, 便将该数据的状态反映在测试仪相应的开入位上, 测试模块根据该开入位的状态判断保护是否动作。

要订阅一个 GOOSE, 必须准确配置 GOOSE 的数据集。创建数据集时, 需要指定数据名和数据类型。数据集结构必须与被测装置发出的 GOOSE 中数据集结构一样, 不需要映射到测试仪的数据也必须指定好, 因为测试仪要为这些数据预留地址空间, 这样才能得到正确的数值。

除可以通过手动的方式编辑 GOOSE 信息外, 测试软件还应提供自动配置的功能, 可以直接读入 SCL 文件, 从中获取 GOOSE 配置, 然后由测试员根据需要完成映射。

##### 4.2 通过测试仪发送 GOOSE

利用测试仪的 GOOSE 发送功能时, 被测装置需要订阅测试仪的 GOOSE。

测试仪发送 GOOSE 是通过将数据集中的数值映射到开关量输出上来实现的, GOOSE 数据集及参数也必须先创建, 并指定必须的参数, 部分参数测试

仪已经给出默认值。具体测试时, 在被测装置端订阅测试仪中配置好的 GOOSE, 测试员在测试模块中控制测试仪的开出, 这样伴随着测试仪开关量的输出, 携带一定信息的 GOOSE 会发送到以太网上, 被测装置收到后会做出一定的反应, 测试员通过判断被测装置的反映来评价被测对象是否有缺陷。

#### 5 结语

本文介绍的测试系统及测试方法, 在数字化产品的开发过程中应用后反应良好, 继承性强, 测试人员很快就可以掌握其使用方法, 测试系统使用方便, 性能可靠。本文介绍的测试系统, 将对国内数字化继电保护测试仪的开发提供积极的参考价值。

#### 参考文献

- [1] 朱炳铨, 任雁铭, 姜健宁, 等. 变电站自动化系统实现 IEC 61850 的过渡期策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 54-57.  
ZHU Bing-quan, REN Yan-ming, JIANG Jian-ning, et al. Strategy for Implementation of IEC 61850 in Substation Automation System During Transitional Period[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 54-57.
- [2] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 的通用变电站事件模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 45-50.  
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. Generic Substation Event Model Based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 45-50.

收稿日期: 2007-04-29; 修回日期: 2007-12-18

作者简介:

李晓朋 (1979-), 女, 本科, 从事微机继电保护产品的测试; E-mail: xiaopengl@xjgc.com

赵成功 (1979-), 男, 本科, 从事微机继电保护产品研发和测试的技术管理;

李刚 (1979-), 男, 本科, 从事微机继电保护的研究和开发。

(上接第 50 页 continued from page 50)

The State Council Office. Note About the Ways of the Energy-saving Generation Dispatching from National Development and Reform Commission (for Trial Implementation) [Z]. 2007.

作者简介:

唐茂林 (1962-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行管理、电力市场等方面的研究工作;

王超 (1976-), 男, 硕士, 主要从事电网调度运行、电力市场等方面研究工作。E-mail: ayestone@163.com

收稿日期: 2007-09-09; 修回日期: 2007-12-05