

# 考虑“三公”调度的两阶段年滚动发电计划优化模型

谢冰<sup>1</sup>, 杨小卫<sup>2</sup>, 于壮壮<sup>3</sup>, 罗刚<sup>4</sup>, 郭瑞鹏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 广西电网公司电力调度控制中心, 广西 南宁 530023;  
3. 国家电网公司华北电力调控分中心, 北京 100053; 4. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:**随着我国电力体制改革的不断深化,常用的安全约束经济调度模型不能满足“三公”调度计算周期的要求,且为克服电量直接交易对“三公”调度的影响,提出考虑“三公”调度的两阶段年滚动发电计划优化模型。第一阶段建立考虑直接交易及“三公”调度的滚动机组组合优化模型,在年度剩余周期内优化机组组合及电量计划;第二阶段建立考虑电厂日负荷率均衡的发电计划优化模型,避免电厂日平均负荷率的快速变化。某省级电网的实际算例仿真结果验证了所提模型的正确性及方法的有效性。

**关键词:**“三公”调度;发电计划;机组组合;电量完成率;直接交易

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.023

## 0 引言

发电计划的优化编制是电网调度运行的基础环节。目前我国各级调度中心大多采用“三公”调度模式,即公平、公正、公开地安排机组的发电计划<sup>[1]</sup>。“三公”调度的关键指标是各电厂年度计划电量完成进度的趋同。相较于各电厂机组的日出力计划,“三公”调度更关注电厂能否宽松地完成年度计划电量,并且当年度需求预测与预控电量有偏差时能否平等地分配偏差电量<sup>[2]</sup>。随着清洁能源的大量接入以及直接交易电量比例的大幅增加,“三公”调度面临更加艰难的处境,对发电计划的制定提出了新的要求。

安全约束经济调度通常针对发电机组的日出力计划,使购电成本或发电成本目标函数最低,环境经济调度还考虑污染物排放量<sup>[3]</sup>,优化机组日内发电计划,目前已有较多研究<sup>[4-8]</sup>。文献<sup>[5]</sup>提出考虑电量协调的日内发电调度方法,通过建立电量、电力两级优化模型,实现兼顾日内风电波动的电量进度控制;文献<sup>[6-7]</sup>基于华北电网日内调度系统,将日前发电计划结果与长、短周期优化结果关联起来,为日内实时调度提供支持;文献<sup>[8]</sup>提出了考虑机组合同电量完成动态均衡的日内安全经济调度模式。传统的安全约束经济调度发电计划优化模型一般以日为优化计算范围,无法在长时间范围内考虑“三公”调度的要求。

“三公”调度的日计划编制应在全年时间范围内进行优化,需要站在计划日“瞻前顾后”,滚动计

算年度剩余周期的发电计划。文献<sup>[2]</sup>以机组年度计划发电量与合同电量的偏差最小为目标,并依据不同时段发电计划的需求差异,进一步建立了全周期变时段发电计划优化模型。文献<sup>[9]</sup>通过时段简化和电力电量解耦,建立了以电量进度偏差最小为目标的月度安全约束机组组合模型。文献<sup>[10]</sup>考虑风电接入对火电“三公”调度的影响,提出了出力计划两阶段优化方法,首先编制风电出力和火电出力的期望计划,其次在优先风电的前提下,使火电出力与期望计划偏差最小。上述研究均建立在将年度计划电量向月度目标电量及日前目标电量进行分解的前提下,保证日内或者月度的电量完成进度相近,从而使年度电量完成情况趋同,无法在长周期范围内优化资源配置以及发电计划。

在中长期范围内优化机组发电计划及机组组合,能够考虑机组启停机、机组检修、直接交易等的协调性,可以在更大的时间范围实现资源优化配置。为兼顾节能经济的要求,在制定整体发电计划的优化决策时需统筹兼顾安全与经济、节能与减排、效率与公平等诸多因素,建立发电计划的多目标优化模型可实现节能减排与经济性等多个目标的综合优化<sup>[11-13]</sup>。

本文提出考虑“三公”调度的两阶段年滚动发电计划优化模型,引入直接交易通过率、平均负荷率以及机组启停次数等多个优化目标,在满足“三公”调度电量完成率趋同的要求下,尽可能满足直接交易计划,提高电网运行的经济和节能性,并在此基础上保持电厂日负荷率的平稳性。

## 1 考虑“三公”调度的两阶段年滚动发电计划优化模型

火电机组发电计划优化时首先需要根据下述因素预测火电机组的总体发电计划:

- a. 根据历史网供电量预测电量需求;

收稿日期:2018-02-06;修回日期:2018-08-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902800);浙江省电力有限公司科技项目(5211SX16000F)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0902800) and the Science and Technology Project of Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (5211SX16000F)

b. 预测清洁能源(水电、核电、风电、光伏发电、气电)等优先上网电量;

c. 基于跨区跨省联络线交易合约确定月度交易电量,形成联络线计划。

在年度滚动发电计划的实际应用中,当月或次月的负荷预测、省间送受电计划及水电计划一般按日给出,并拥有相对较高的精度,机组检修计划一般也按日编制,故年度滚动发电计划也以日为单位,月度需求电量计划也需要分解至日。

发电计划安排是一个持续滚动修正的过程<sup>[14]</sup>。在计划执行过程中逐日跟踪机组运行状态、新能源出力、负荷预测等边界条件的变化,根据发电计划的执行偏差进行滚动分析、目标调整与计划电量修正,以适应新的情况,降低计划执行偏差的风险<sup>[15]</sup>。

### 1.1 考虑直接交易及“三公”调度的滚动机组组合优化模型

a. 日电量平衡约束:

$$\sum_{p=1}^P (K_p E_p^d) = D^d \quad d \in \{d_t, d_t + 1, \dots, d_1\} \quad (1)$$

其中, $p$ 为电厂编号, $P$ 为电厂数; $K_p$ 为电厂 $p$ 的发电利用率,即电厂上网电量与电厂发电量的比例; $d$ 为日编号, $d_t$ 为起始日, $d_1$ 为终止日; $E_p^d$ 为电厂 $p$ 第 $d$ 日的日发电量; $D^d$ 为第 $d$ 日的火电总电量需求。

b. 各电厂日发电量与累计电量的关系约束:

$$A_p^d - A_p^{d-1} = E_p^d \quad d \in \{d_t, d_t + 1, \dots, d_1\} \quad (2)$$

其中, $A_p^d$ 为电厂 $p$ 第 $d$ 日日末的累计发电量, $A_p^{d-1}$ 对应于滚动计算起始日前一天末的累计电量,可以由实际系统统计得到。

c. 各机组各日是否启停机与机组运行状态的关系约束:

$$U_g^d \geq |G_g^{d-1} - G_g^d| \quad (3)$$

其中, $g$ 为机组编号; $U_g^d$ 表示机组 $g$ 第 $d$ 日是否启停机; $G_g^d$ 为机组 $g$ 第 $d$ 日的运行状态, $G_g^d = 1$ 表示机组运行, $G_g^d = 0$ 表示机组停运。实际中,式(3)可替换为式(4)及式(5)。

$$U_g^d \geq G_g^{d-1} - G_g^d \quad (4)$$

$$U_g^d \geq G_g^d - G_g^{d-1} \quad (5)$$

d. 各机组各日的运行状态约束:

$$0 \leq G_g^d \leq \bar{G}_g^d \quad (6)$$

其中, $\bar{G}_g^d$ 表示机组 $g$ 第 $d$ 日是否允许运行,若机组 $g$ 第 $d$ 日处于检修状态则取0,否则取1。

e. 机组最小连续停机天数约束。

机组启停的代价较大,故停机后一般应连续停机一定天数,即:

$$\alpha U_g^d + (1-\alpha) G_g^d + \sum_{i=1}^{\alpha-1} G_g^{d+i} \leq \alpha \quad (7)$$

其中, $\alpha$ 为允许最小连续停机天数,为已知常量,实际中一般取为7 d。由式(7)可知:若 $U_g^d = 1, G_g^d = 0$ ,即机组 $g$ 在第 $d$ 日开始停机,则第 $d$ 日之后的 $\alpha-1$ 日均停机;否则式(7)恒成立。

f. 机组最小连续运行天数约束。

机组启停的代价较大,故开机后一般应连续运行一定的天数,即:

$$\bar{\alpha} U_g^d + (\bar{\alpha} - 1) G_g^d - \sum_{i=1}^{\bar{\alpha}-1} G_g^{d+i} \leq \bar{\alpha} \quad (8)$$

其中, $\bar{\alpha}$ 为允许最小连续运行天数,为已知常量,实际中一般取为7 d。由式(8)可知:若 $U_g^d = 1, G_g^d = 1$ ,即机组 $g$ 在第 $d$ 日开机,则第 $d$ 日之后的 $\bar{\alpha}-1$ 日均运行;否则式(8)恒成立。

g. 各电厂各日的最大发电量约束:

$$24 \sum_{g \in S_p} G_g^d L_g \leq E_p^d \leq 24 \bar{R} \sum_{g \in S_p} G_g^d C_g \quad (9)$$

其中, $S_p$ 为电厂 $p$ 拥有的机组编号集合; $L_g$ 为机组 $g$ 处于运行状态时的允许最小出力; $\bar{R}$ 为火电机组的日平均最大可发负荷率,实际中一般取0.85; $C_g$ 为机组 $g$ 的单机容量。

h. 各电厂各日的最小发电量约束:

$$E_p^d \geq \underline{E}_p^d \quad (10)$$

其中, $\underline{E}_p^d$ 为电厂 $p$ 第 $d$ 日的安全约束最小发电量,由运行方式专业人员综合考虑网络安全及热电联产机组供热等多方面因素给出,在优化计算中为已知的常量。

i. 各电厂月度直接交易电量约束。

实际应用中,各电厂各月的直接交易计划需向营销部上报,并经调控中心校核后确定,故营销部提供的直接交易计划事实上为交易电量的上限,即:

$$T_p^m \leq \bar{T}_p^m \quad m \in \{m_t, m_t + 1, \dots, 12\} \quad (11)$$

其中, $m$ 表示月份; $m_t$ 为滚动计算起始月份; $T_p^m$ 为电厂 $p$ 第 $m$ 月的月交易电量值; $\bar{T}_p^m$ 为电厂 $p$ 第 $m$ 月的月交易电量上限,即营销部提供的直接交易电量计划。若 $T_p^m$ 无法达到 $\bar{T}_p^m$ 值,即表明无法完成直接交易电量,应给出告警信息,营销部应进行直接交易电量调整。

j. 各电厂月交易电量与累计交易电量的关系约束:

$$B_p^m - B_p^{m-1} = T_p^m \quad m \in \{m_t, m_t + 1, \dots, 12\} \quad (12)$$

其中, $B_p^m$ 为电厂 $p$ 第 $m$ 月月末的累计交易电量, $B_p^{m-1}$ 对应于滚动计算起始月前一月末的累计交易电量,可以由直接交易计划统计得到。

k. 各电厂各月底的累计电量完成率约束:

$$K_p A_p^{e_m} - B_p^m = Y_p^m \quad (13)$$

其中, $e_m$ 为第 $m$ 月最后一天的日编号; $A_p^{e_m}$ 为电厂 $p$

第  $e_m$  日日末的累计电量,即电厂  $p$  第  $m$  月月末的累计电量; $Y_p$  为电厂  $p$  的年度计划电量,在优化计算中为常量; $r_p^m$  为电厂  $p$  在第  $m$  月月底的累计计划电量完成率。

l. 各电厂月底电量完成率上下限约束:

$$\underline{r}^m \leq r_p^m \leq \bar{r}^m \quad (14)$$

其中,  $\bar{r}^m$  和  $\underline{r}^m$  分别为第  $m$  月月底所有电厂电量完成率的上、下限。

m. 各日的火电总开机容量约束。

我国的装机以燃煤火电大机组为主,由于机组启动过程步骤多、时间长,且具有负荷率越低单位煤耗越高的特性,因此日内启停的操作性、经济性和节能性不佳,需要在中长时间跨度上优化机组启停,通过有序调停<sup>[16]</sup>提高运行机组的平均负荷率水平以及系统的经济性和节能性<sup>[17]</sup>。

因此,在实际运行中,若运行机组的平均负荷率过低,可通过优化机组组合,调停部分机组,提高运行机组的负荷率,从而降低电网的总体煤耗,故有目标约束:

$$\frac{D^d}{\sum_{p=1}^P \sum_{g \in S_p} G_g^d C_g} \geq \underline{K} \quad (15)$$

其中,  $\underline{K}$  为火电机组平均负载率的期望下限,在优化中为常量,由广西电网的轮停规则要求取  $\underline{K} = 0.55$ ,即火电机组平均负载率应尽量高于 55%。

式(15)的目标约束可以用式(16)–(18)替代。

$$\min s^d \quad (16)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{g \in S_p} G_g^d C_g \leq \frac{D^d}{\underline{K}} + D^d s^d \quad (17)$$

$$s^d \geq 0 \quad (18)$$

其中,  $s^d$  为第  $d$  日火电开机容量比超出期望上限的幅度。

n. 目标函数。

“三公”调度发电计划的主要优化目标是使各电厂的年度电量完成率趋同,即可以表示为各电厂的年度电量完成率之间的差额最小。同时考虑到中长期负荷及水文预测的精度较低,为减小因预测误差对年底电量完成率造成调度困难,应该在优化目标中加入各电厂的各月底累计电量完成率趋同。

优化的多个目标包含下面几项:

$$\min \left[ 10(\bar{r}^{12} - \underline{r}^{12}) + \sum_{p=1}^P |r_p^{12} - r'^{12}| \right] \quad (19)$$

$$\min \sum_{m=m_f}^{11} \left[ 10(\bar{r}^m - \underline{r}^m) + \sum_{p=1}^P |r_p^m - r'^m| \right] \quad (20)$$

$$\max \sum_{m=m_f}^{12} T^m \quad (21)$$

$$\min \sum_{g=1}^G \sum_{d=d_f}^{d_1} U_g^d \quad (22)$$

其中,  $r'^m$  为第  $m$  月电厂的参考电量完成率,由优化计算得到;  $T^m$  为第  $m$  月的各电厂交易电量之和,即

$$T^m = \sum_{p=1}^P T_p^m; G \text{ 为火电机组数量。式(19)表示各火电厂年度最大及最小电量完成率偏差尽可能小,并在此基础上使各电厂电量完成率与参考值的偏差绝对值之和最小,是“三公”调度的主要目标;式(20)表示各电厂的各月底累计电量完成率趋同,保证了计划执行过程中的“三公”要求,为“三公”调度的次要目标;式(21)表示各电厂各月的直接交易电量计划应尽可能予以满足;式(22)表示应尽可能减少机组的启停机次数。}$$

式(19)及(20)中存在取绝对值函数,实际中可以替换为式(23)–(26)。

$$\min \left[ 10(\bar{r}^{12} - \underline{r}^{12}) + \sum_{p=1}^P \eta_p^{12} \right] \quad (23)$$

$$\min \sum_{m=m_f}^{11} \left[ 10(\bar{r}^m - \underline{r}^m) + \sum_{p=1}^P \eta_p^m \right] \quad (24)$$

$$\eta_p^m \geq r_p^m - r'^m \quad (25)$$

$$\eta_p^m \geq r'^m - r_p^m \quad (26)$$

其中,  $\eta_p^m$  为第  $m$  月电厂  $p$  电量完成率与第  $m$  月各电厂参考电量完成率  $r'^m$  的偏差绝对值。

考虑直接交易及“三公”调度的滚动机组组合优化模型存在 5 个目标,实际应用中需要对 5 个目标进行协调。这里对 5 个目标进行加权处理,即将式(16)和式(21)–(24)综合为:

$$\begin{aligned} \min W_1 & \left[ 10(\bar{r}^{12} - \underline{r}^{12}) + \sum_{p=1}^P \eta_p^{12} \right] - W_2 \sum_{m=m_f}^{12} T^m + \\ & W_3 \sum_{d=d_f}^{d_1} s^d + W_4 \sum_{g=1}^G \sum_{d=d_f}^{d_1} U_g^d + \\ & W_5 \sum_{m=m_f}^{11} \left[ 10(\bar{r}^m - \underline{r}^m) + \sum_{p=1}^P \eta_p^m \right] \end{aligned} \quad (27)$$

其中,  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  及  $W_5$  分别为 5 个目标的权重,实际应用中应取  $W_1 \gg W_2 \gg W_3 \gg W_4$ ,  $W_5$ , 在广西电网的实际应用中取  $W_1 = 1\ 000$ 、 $W_2 = 100$ 、 $W_3 = 10$ 、 $W_4 = W_5 = 1$ 。由于优化模型为线性混合整数优化问题,取上述权重系数保证优化目标的不同优先级,即可得到较合理的结果。

本节给出的考虑直接交易及“三公”调度的滚动机组组合优化模型在数学上为线性混合整数优化

问题,可以采用 CPLEX 等商业优化软件求解。

### 1.2 考虑电厂日负荷率均衡的发电计划优化模型

机组的计划电量和功率平衡是横纵方向的 2 个交叉约束,在考虑直接交易及“三公”调度的滚动机组组合优化模型中,功率平衡为纵方向约束条件,要求各电厂第  $d$  日的上网电量之和等于该日的负荷电量需求;而该模型中以年度和月度电量完成率为优化目标,优化结果即确定了各电厂月度发电量以及年度发电量,因此各电厂的月度发电量作为横向约束条件。

从数学寻优的角度,1.1 节优化问题的最优解是不唯一的,可能出现日间电厂负荷率大幅度波动的情况。在各月份各电厂电量完成情况均不变的情况下,对同一月份内任意 2 d 的 2 座电厂 A 及 B,按照图 1 所示的方法调整电量,例如在第一天电厂 A 增加出力 1 kW·h,电厂 B 减少相应的出力 1 kW·h,在第二天电厂 A 减少出力 1 kW·h,电厂 B 增加出力 1 kW·h,若调整后电厂负荷率不越限,则优化问题的可行性及最优性均不变。这说明对于以电厂年度及月度电量完成率为

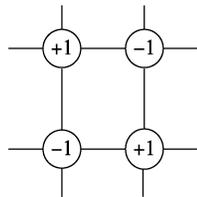


图 1 最优解非唯一性说明图

在目标函数值相同的情况下,各发电厂各天的出力计划是不确定的,可能出现电厂日负荷率大幅波动的不合理情况。

Fig.1 Illustration of non-uniqueness of optimal solutions

从实际运行的角度来看,火电厂负荷率大幅度波动,就需要频繁调节蒸汽轮机进汽阀门,这给实际操作造成不便,并导致机械磨损的加重<sup>[18]</sup>。考虑实际操作的可行性,为使得火电厂负荷率尽可能平稳,应该最小化火电机组相邻时段出力波动,使电厂机组的日负荷率保持相对稳定<sup>[19]</sup>。

根据 1.1 节的机组组合优化模型可以确定机组的开停机计划,在机组组合确定的基础上对发电计划进一步优化,以均衡电厂日负荷率。

#### a. 各电厂各日负荷率约束:

$$C_p^d r_p^d = E_p^d \quad d \in \{d_t, d_t+1, \dots, d_1\} \quad (28)$$

其中,  $C_p^d$  为由 1.1 节优化问题求得的电厂  $p$  在第  $d$  日的开机容量,在这里为已知常量;  $r_p^d$  为电厂  $p$  在第  $d$  日的负荷率。

#### b. 电厂日负荷率变化之和最小目标:

$$\min \sum_{d=d_t}^{d_1} |r_p^d - r_p^{d-1}| \quad (29)$$

式(29)的目标函数中存在取绝对值函数,实际中可采用式(30)—(32)替代。

$$\min \sum_{d=d_t+1}^{d_1} \lambda_p^d \quad (30)$$

$$\lambda_p^d \geq r_p^d - r_p^{d-1} \quad d \in \{d_t, d_t+1, \dots, d_1\} \quad (31)$$

$$\lambda_p^d \geq r_p^{d-1} - r_p^d \quad d \in \{d_t, d_t+1, \dots, d_1\} \quad (32)$$

其中,  $\lambda_p^d$  为电厂  $p$  在第  $d$  日与第  $d-1$  日的负荷率差值的绝对值。

由于机组开停机计划在本阶段已经确定,故式(27)中  $W_3$  及  $W_4$  对应的目标函数值为常量,考虑电厂日负荷率均衡的发电计划优化模型的目标函数如下:

$$\begin{aligned} \min W_1 & \left[ 10(\bar{r}^{12} - \underline{r}^{12}) + \sum_{p=1}^P \eta_p^{12} \right] - W_2 \sum_{m=m_f}^{12} T^m + \\ & W_5 \sum_{m=m_f}^{11} \left[ 10(\bar{r}^m - \underline{r}^m) + \sum_{p=1}^P \eta_p^m \right] + \\ & W_6 \sum_{p=1}^P \sum_{d=d_t+1}^{d_1} \lambda_p^d \end{aligned} \quad (33)$$

其中,  $W_6$  为电厂日负荷率均衡目标的权重,应取较小值,实际应用中取  $W_6=0.1$ 。本节的优化模型在数学上为线性规划问题,其数值求解可靠高效。

理论上,可以将电厂日负荷率均衡目标加权到 1.1 节中的机组组合优化模型,并进行统一求解。由于机组组合优化模型为混合整数线性规划问题,整数变量多,计算规模大,统一求解不仅会增加混合整数优化问题的计算规模,优化算法还需要在第一阶段目标函数值相同的众多解中寻找第二阶段目标函数最优的解,分支定界树的规模将大幅增加,计算量巨大,难以满足实际电网的要求。为提高计算速度,电厂日负荷率均衡目标采用第二阶段模型单独考虑。采用两阶段法求解不能严格保证获得综合目标的全局最优解,但能够在其余目标最优的同时获得负荷率较为均衡的解,能够较好地满足实际电网的应用要求。

## 2 算例分析

考虑“三公”调度的两阶段年滚动发电计划优化模型在数学上为混合整数线性规划问题,采用 CPLEX 优化工具求解该优化问题。基于所提出的模型,采用标准 C++ 开发了年度滚动发电计划与机组组合优化软件,并在广西电网试运行,取得了较好的效果。

以广西电网 2016 年 9 月 12 日的实际数据为算例,对 2016 年 9 月 13 日至 12 月 31 日的发电计划及机组组合情况进行优化。仿真环境为 Microsoft Visual Studio 2010,计算机硬件配置为 2.5 GHz CPU, 8 GB 内存。整个计算过程所需的 CPU 时间为 93.3 s,能够较好地满足电网实际应用的要求。

根据广西电网的具体情况可知,广西电网水电资源丰富,但电网结构薄弱,火电厂又以热电联产为主,多座主力火电厂因供热及网络安全原因存在安全约束最小出力,年度“三公”调度存在困难。因此,采用广西电网“三公”电量优化结果可较好地说明该模型的可用性。

### 2.1 年度“三公”电量完成率情况

广西电网参与“三公”调度的火电厂共 17 座,其中 9 座火电厂因为供热及网络安全约束等原因存在最小技术出力,故存在安全约束的机组不能停机。表 1 为优化后广西电网火电厂 2016 年 9—12 月累计计划电量完成率情况。

表 1 火电厂发电计划完成率进度

Table 1 Completion rate of generation schedule for thermal power plants

电厂名称	完成率/%				
	9月12日前	9月	10月	11月	12月
BH	71.484 8	80.507 5	91.265 3	101.676 0	111.476
FCG	72.096 8	72.096 8	79.670 6	89.553 9	122.971
FCG2	0	0	0	48.530 0	122.971
SL	0	0	0	86.412 1	122.971
FC	52.883 3	62.730 2	76.396 7	96.571 8	122.971
GG	39.341 4	61.109 9	79.670 6	100.291 0	122.971
HS6	47.284 1	47.284 1	69.539 5	96.571 8	122.971
HS	35.978 3	62.730 2	70.860 1	96.571 8	122.971
LB	60.762 4	71.937 8	93.638 6	106.595 0	122.971
LB2	54.874 4	58.412 8	70.403 8	82.198 3	94.386
LZ	88.335 6	100.882 0	116.605 0	119.834 0	122.971
LJ	66.320 7	73.496 1	83.339 7	92.540 0	122.971
QZ	94.656 9	105.854 0	117.153 0	126.090 0	135.151
QZ2	27.160 8	50.155 8	74.042 3	97.158 3	122.971
TD	54.376 7	54.376 7	54.376 7	87.530 6	122.971
TY	101.177 0	101.177 0	101.177 0	101.177 0	122.971
YF	71.463 5	81.236 6	95.668 9	109.139 0	122.971

表 1 中存在安全约束最小技术出力的电厂有 BH、FCG、FC、LB、LB2、LZ、LJ、QZ、YF 电厂共 9 座,其中 FCG2 电厂和 SL 电厂均为 11 月投运的新电厂,所以其 11 月之前的发电量均为 0。

LB2 电厂 12 月底电量完成率为 94.386%,因为该电厂共有 2 台 360 MW 容量机组,一台机组在 9 月 1 日到 30 日安排了检修,而其余时间 LB2 电厂机组均已经达到了约束的最大发电能力,造成该电厂的电量完成率较低的原因是前期的发电量安排不足,导致后期无法完成,这也印证了对发电计划进行年度滚动优化的重要性。BH 电厂年底电量完成率为 111.476%,较基准完成率 122.971% 稍低,原因类似 LB2 电厂,一台机组在 9 月有一次小修,而另一台机组在 10 月到 12 月有大修。QZ 电厂的年底电量完成率为 135.151%,较基准完成率 122.971% 稍高,因为 QZ 电厂优化计算日前的电量完成率较高,且存在安全约束最小技术出力,即电厂一直维持最小出力,电量完成率仍然会超标。

由表 1 结果可见,17 座火电厂中,除去 LB2 电厂,其余 16 座电厂均完成了年度计划上网电量,并且除了 BH 电厂、QZ 电厂外,其余 14 座电厂年度电量完成率相同,均为 122.971%,这说明各电厂在完成年度计划电量的同时,平均分配了预测偏差电量,符合“三公”调度对各电厂应完成计划电量以及平均分配偏差电量,即年底计划电量完成率相近的要求,结果较好。

### 2.2 直接交易电量通过情况

随着电力市场的发展,直接交易是中国电力市场由发电侧的单边市场转向负荷侧进入的双边市场的一个跨越<sup>[20]</sup>,目前已经在国内逐步推广。

直接交易电量份额所占比重逐年上升,在优化机组计划上网电量完成情况时,有必要考虑直接交易电量份额。在优先保障完成上网电量的情况下,预估电厂可发的直接交易电量大小,校核营销部制定的直接交易电量是否能够满足,如若不能满足直接交易电量,则给出最大可实现的交易电量,对营销部制定直接交易电量起到辅助决策作用。

以广西电网 2016 年 4 季度为例,由于交易电量所占的比重仍较小,优化计算中直接交易电量计划通过率均为 100%,即发电计划都满足直接交易计划电量份额。随着交易电量所占比重的逐渐增大,在滚动发电计划优化中校核交易电量计划具有实际意义。

### 2.3 机组开停机及平均负荷率情况

根据广西电网火电机组轮停原则,当火电机组平均负荷率低于 55% 时,在满足电网安全稳定运行及电力可靠供应的前提下安排火电有序停机,提高系统平均负荷率水平,从而获得经济效益和节能效益。根据机组轮停原则,优化机组组合,一般要求机组最小停机时间以及最小开机时间不少于 7 d。

表 2 中选取了 9 月火电厂的平均负荷率变化情况,其中火电机组总装机容量为 16 150 MW,存在安全约束最小技术出力的机组容量为 1 870 MW。由于在年度“三公”发电计划及机组组合模型中优化时间长,负荷预测一般是按月给出平均预测负荷值,而对于计算日的当月或次月可以给出具体的日负荷预测值,计算精度更高,结果也更具有参考性,算例中 9 月的负荷预测值即按每日给出。

由表 2 火电厂运行信息结果可知,通过优化机组开停机组合,9 月火电厂的平均负载率基本都在 55% 以上,机组整体负荷率水平较高。

### 2.4 机组日间负荷率变化情况

根据 1.1 节的第一阶段优化模型可确定各机组各日的运行状态,即机组组合,但电厂每日出力不唯一,有可能出现电厂日间负荷率大幅度变化的情况,所以需要根据 1.2 节优化模型对发电计划进行进一步的优化调整。

表2 火电厂运行信息

起始日期	终止日期	开机容量/ MW	平均出力/ MW	平均负载率/ %
09-13	09-13	6 145	3 857.03	62.767 0
09-14	09-14	6 145	4 108.28	66.855 7
09-15	09-15	5 145	2 678.44	52.059 2
09-16	09-16	6 145	3 680.00	59.889 8
09-17	09-17	6 775	4 592.05	67.779 3
09-18	09-18	6 775	5 131.56	75.742 5
09-19	09-19	6 775	5 089.69	75.124 6
09-20	09-20	6 775	4 843.24	71.486 9
09-21	09-21	7 820	5 357.29	68.507 6
09-22	09-22	7 820	5 355.75	68.487 8
09-23	09-23	8 140	5 314.76	65.291 9
09-24	09-24	8 140	5 422.74	66.618 4
09-25	09-25	8 140	5 602.59	68.827 9
09-26	09-26	8 140	6 328.41	77.744 6
09-27	09-27	8 140	6 681.31	82.080 0
09-28	09-28	8 140	6 573.44	80.754 8
09-29	09-29	8 140	5 683.56	69.822 6
09-30	09-30	8 140	4 579.71	56.261 8

以FC电厂为例,比较该电厂10月出力计划的单阶段和两阶段法优化结果,火电机组的日负荷率变化曲线如图2所示,其中单阶段法指1.1节的优化方法,两阶段法指1.1节和1.2节两阶段的优化方法,结果表明采用两阶段优化模型,机组出力稳定性大幅提高,负荷率相对均衡。

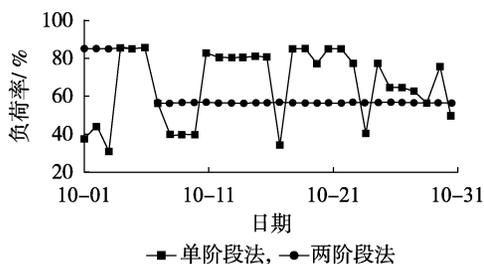


图2 FC电厂日负荷率变化曲线

Fig.2 Curves of daily load rate for FC power plant

### 3 结论

本文建立了考虑“三公”调度的两阶段年滚动发电计划优化模型,该模型能够滚动计算年度剩余周期的发电计划,辅助“三公”调度下发电计划编制。

a. 提出了以年度计划电量完成率为主要目标,直接交易电量及运行机组平均负荷率、启停机次数为次要目标的优化模型。从时间维度上拓展了“三公”发电调度的优化空间,能够在保证机组年度计划电量完成率趋同的前提下,校核交易电量、优化机组组合,提高机组运行平均负荷率,兼顾发电调度的节能要求。

b. 建立了两阶段优化模型,第一阶段确定机组组合状态,第二阶段优化机组日出力计划,使电厂的日间负荷率相对稳定。

c. 基于广西电网2016年9月的实际数据进行测试,算例结果表明,该模型能够在年度剩余周期内优化发电计划和机组组合,且计算性能满足电网实际应用的要求。

今后可进一步研究机组检修计划与考虑“三公”调度的发电计划的协同优化。

### 参考文献:

- [1] 谢丽荣,张勇,王岗,等. 中短期多周期发电计划的协调方式和闭环控制[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):126-131.  
XIE Lirong, ZHANG Yong, WANG Gang, et al. Coordination method and closed-loop control of medium-short term multi-cycle generation scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10):126-131.
- [2] 杨争林,唐国庆. 全周期变时段“三公”调度发电计划优化模型[J]. 电网技术,2011,35(2):132-136.  
YANG Zhenglin, TANG Guoqing. A generation scheduling optimization model suitable to complete period and variable intervals and conforming to principles of openness, equity and justness[J]. Power System Technology, 2011, 35(2):132-136.
- [3] 龙军,郑斌,郭小璇,等. 一种求解环境经济发电调度的交互式多目标优化方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):83-88.  
LONG Jun, ZHENG Bin, GUO Xiaoxuan, et al. Interactive multi-objective optimization of environmental and economic power generation scheduling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5):83-88.
- [4] 韦化,梁振成,阳育德,等. 节能调度中的水火电力最优协调问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):1-4.  
WEI Hua, LIANG Zhencheng, YANG Yude, et al. Optimal coordination between hydraulic and thermal powers in energy-saving dispatch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4):1-4.
- [5] 白杨,钟海旺,夏清,等. 电量协调与成本控制的日内滚动发电计划[J]. 电网技术,2013,37(10):2965-2972.  
BAI Yang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. An intraday rolling scheduling with unit energy coordination and operating cost control[J]. Power System Technology, 2013, 37(10):2965-2972.
- [6] 陈之栩,李丹,梁吉,等. 华北电网日内发电计划及实时调度系统[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):54-57.  
CHEN Zhixu, LI Dan, LIANG Ji, et al. Intraday generation plan and real-time dispatch system of North China Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19):54-57.
- [7] 陈之栩,谢开,张晶,等. 电网安全节能发电日前调度优化模型及算法[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):10-13,98.  
CHEN Zhixu, XIE Kai, ZHANG Jing, et al. Optimal model and algorithm for day-ahead generation scheduling of transmission grid security constrained conventional dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1):10-13,98.
- [8] 汪洋,苏峰,邓立,等. 考虑机组合同电量完成动态均衡的日内安全经济调度[J]. 中国电力,2016,49(9):125-129,136.  
WANG Yang, SU Feng, DENG Li, et al. Dynamic intraday rolling scheduling considering electricity quantity progress[J]. Electric Power, 2016, 49(9):125-129,136.
- [9] 李利利,管益斌,耿建,等. 月度安全约束机组组合建模及求解[J]. 电力系统自动化,2011,35(12):27-31,64.  
LI Lili, GUAN Yibin, GENG Jian, et al. Modeling and solving for monthly security constrained unit commitment problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12):27-31,64.
- [10] 李利利,涂孟夫,丁恰,等. 适应大规模风电接入的发电出力计

- 划两阶段优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 48-52.  
LI Lili, TU Mengfu, DING Qia, et al. Two-stage optimization method for generation output scheduling with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 48-52.
- [11] 颜伟, 李翔, 梁文举, 等. 基于负荷分段技术的多目标月度发电计划及其遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 47-52.  
YAN Wei, LI Xiang, LIANG Wenju, et al. Multi-objective monthly generation scheduling based on load partition technology and its genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 47-52.
- [12] 朱泽磊, 周京阳, 潘毅, 等. 考虑电力电量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.
- [13] 谢应昭, 卢继平. 含风储混合系统的多目标机组组合优化模型及求解[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 18-26.  
XIE Yingzhao, LU Jiping. Multi-objective unit commitment optimization model including hybrid wind-storage system and its solution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 18-26.
- [14] 张智刚, 夏清. 智能电网调度发电计划体系架构及关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 1-8.  
ZHANG Zhigang, XIA Qing. Architecture and key technologies for generation scheduling of smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 1-8.
- [15] 施磊, 耿照为, 张晶, 等. 风险适应型的月度发电计划管理模式[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3384-3389.  
SHI Lei, GENG Zhaowei, ZHANG Jing, et al. Risk-adaptable monthly generation scheduling mode[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3384-3389.
- [16] 滕晓毕, 李继红, 吴臻, 等. 有序调停燃煤机组的节能调度模式及效益分析[J]. 中国电力, 2010, 43(9): 19-23.  
TENG Xiaobi, LI Jihong, WU Zhen, et al. New mode of energy-conservation dispatching based on thermal unit cyclic operation and its benefit analysis[J]. Electric Power, 2010, 43(9): 19-23.
- [17] 夏清, 钟海旺, 康重庆. 安全约束机组组合理论与应用的发展和展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 94-103.  
XIA Qing, ZHONG Haiwang, KANG Chongqing. Review and prospects of the security constrained unit commitment theory and applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 94-103.
- [18] 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, 102.  
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, 102.
- [19] 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, HUANG 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.
- [20] 张显, 刘福斌, 彭涛, 等. 电力用户与发电企业直接交易相关问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 33-37.  
ZHANG Xian, LIU Fubin, PENG Tao, et al. A discussion on key issues for direct trading between power users and plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 33-37.

#### 作者简介:



谢冰

谢冰(1993—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化调度(**E-mail**: xiebing602@163.com);

杨小卫(1982—),男,江西宜春人,高级工程师,硕士,主要从事电力调度、电力市场和电网运行管理工作(**E-mail**: dvyoung@163.com);

于壮壮(1987—),男,山东烟台人,工程师,硕士,主要从事电力系统分析及新设备调度启动管理工作(**E-mail**: yuyzz2002@gmail.com);

罗刚(1970—),男,浙江宁波人,高级工程师,主要从事电网调度工作(**E-mail**: lgghouse2000@163.com);

郭瑞鹏(1972—),男,福建莆田人,副研究员,博士,主要研究方向为电力系统状态估计、可靠性评估、最优化技术及其在电力系统中的应用等(**E-mail**: eegrp@zju.edu.cn)。

## Two-stage optimization model for annual rolling generation scheduling considering open and impartial dispatching

XIE Bing<sup>1</sup>, YANG Xiaowei<sup>2</sup>, YU Zhuangzhuang<sup>3</sup>, LUO Gang<sup>4</sup>, GUO Ruipeng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Electric Power Dispatching and Control Center of Guangxi Power Grid, Nanning 530023, China;

3. North China Electric Power Dispatching and Control Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China;

4. Shaoxing Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** With the deepening reform of electric power system in China, the commonly used security constrained economic dispatching model cannot meet the calculation period requirement of open and impartial dispatching, and in order to overcome the influence of electric power direct trading on open and impartial dispatching, a two-stage optimization model for annual rolling generation scheduling with the consideration of open and impartial dispatching is proposed. In the first stage, the optimal rolling unit commitment model considering the direct trading and open and impartial dispatching is built, which optimizes unit commitment and power generation schedule in the annual residual period. In the second stage, the generation scheduling optimization model considering the balance of daily load rate of power plant is built to avoid the rapid change of average daily load rate. The simulative results of a practical provincial power grid verify the correctness of the proposed model and the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** open and impartial dispatching; generation scheduling; unit commitment; completion rate of electricity energy; direct trading