

考虑月度机组组合的节能发电调度模式与方法

夏清¹, 陈雨果¹, 陈亮²

- (1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
2. 广东省电力调度中心, 广东省 广州市 510600)

Establishment of Mode and Method for Energy-Conservation

Monthly Unit Commitment Considering Dispatching

XIA Qing¹, CHEN Yuguo¹, CHEN Liang²

- (1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;
2. Guangdong Provincial Electric Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Since the implementation of energy-conservation based dispatching (ECD), the structure of power generation in China is significantly changed, namely the lower the energy consumption of unit, the higher the number of utilization hours, and in pilot provinces, where the ECD pattern is implemented, good energy-conservation result and social effects are attained. Based on existing ECD pattern, a novel ECD pattern that is more scientific, ordered and effective is proposed. The proposed pattern emphasizes on the decision of monthly unit commitment status, to fulfill ECD in longer period through the interworking of high-capacity units. Based on the actual coal consumption characteristic of thermal units, monthly unit commitment model is established, and a piecewise linearization algorithm is proposed, which can improve the computational efficiency and keep the best solution. Finally, actual data of Guangdong provincial power grid in October of 2010 are used to validate the proposed algorithm, to illustrate the validity of the proposed pattern.

KEY WORDS: energy-conservation based dispatching; monthly power generation plan; unit commitment; piecewise linearization; coal consumption

摘要: 自实施节能发电调度办法以来,我国发电量的结构发生了重大变化,能耗越小的机组,其利用小时数越高,各节能发电调度试点省份均取得了良好的节能与社会效益。以现有节能发电调度模式为基础,提出更有序、更有效的新型模式。该模式着重在月度优化决策机组的开机方式,通过大机组之间的有序配合,在更长的时间范围内实现节能发电调度。根据机组实际的煤耗特性,建立了月度机组组合高效模型;采用分段线性化的方法,在不损失最优性的前提下求解

模型;应用广东电网2010年10月的实际调度运行数据验证了新型模式的科学性和有效性。

关键词: 节能发电调度;月度发电计划;机组组合;分段线性化;煤耗

0 引言

自节能发电调度办法^[1]实施以来,传统的均衡调度模式逐步被打破^[2],电网的调度目标逐渐转向最大限度地减少能源、资源消费和污染物排放,促进电力系统高效、清洁运行。有关节能发电调度背景下的发电计划编制算法,已发表大量的文献^[2-12]。广东省作为首批试点省份,积极开展理论研究,完成了节能发电调度相关技术支撑系统的建设^[3-4],获得了良好的节能效益,并取得了宝贵的运行经验。

现行的节能发电调度模式尚存在可以完善的地方。首先,随着高能耗小机组的逐步关停,电力系统中运行的大部分是同类型大机组,如何在大型机组之间进一步提升发电调度的节能潜力,是当前亟待解决的难题;其次,当前的节能发电调度模式重在日前决策次日机组的发电计划,这样的调度方式忽视了在更长时间范围内开展节能调度的重要性。

本文提出一种完善当前节能发电调度的新型模式。该模式以电网安全运行为前提,以节能减排为主要优化目标,同时开展月度开机方式和日前经济分配的节能优化,实现月度与日前发电计划的有效衔接与相互协调,在更长时间跨度内实现节能发电调度^[13-16],进一步提升电网发电计划的节能减排潜力。本文考虑机组实际的煤耗特性,建立了月度

基金项目: 全球环境基金项目(TF094204-CN)。

Project Supported by Global Environment Facility (TF094204-CN)。

机组组合模型，最后应用广东电网的实际运行数据进行测算分析。

1 新型节能发电调度模式设计

1.1 新型节能发电调度模式的内涵

目前节能发电调度面临着新的挑战。节能发电调度是一种制度的安排，激励低能耗机组多发电，将提升低能耗机组的利用率，促进电源结构调整和火电小机组关停，从试点各省份来看，已取得显著的效果。然而，当前的节能发电调度模式有待进一步完善：如小机组逐渐被淘汰，大机组将在电网中成为发电的主体，在这种情况下，大机组互相配合、实现开机方式的优化将成为决定系统运行煤耗的主要因素；当机组的开机方式确定以后，发电机组之间的负荷经济分配优化空间并不大^[2]。同时，以日前发电节能调度为主的制度安排未能考虑到电力生产的连续性和有序性，容易造成机组的频繁启停，增加了系统的运行成本，影响设备使用寿命。

鉴于此，本文提出以月度开机方式优化为主、日前节能调度为辅的新型节能发电调度模式。该模式在月度范围内，综合考虑机组运行、负荷平衡、电网备用等实际约束条件，全面优化发电机组的开机方式，实现各机组在合同电量约束下的互相配合，着重提高各机组运行负荷率，进而全面降低其能耗水平。在安全校核方面，月度的机组组合模型仅考虑关键断面的传输容量限制，保证机组开机方案具有一定的时空均衡性。根据月度开机方案，在日前可依据更为准确的短期负荷预测结果以及网络拓扑信息，精细化考虑电网安全运行约束条件，精确定机组的日出力曲线。若出现网络阻塞无法消除的情况，可适当调整机组的启停状态，确保发电计划的安全性。如果发生重大月度负荷预测和机组检修方式的偏差，可在月内实现开机方案的滚动优化。

1.2 新型节能发电调度模式的优越性分析

本文的调度模式以优化开机的方式提升发电调度计划的节能水平；以最小能耗包容未来负荷预测的误差，未雨绸缪地决策机组的开机方式，降低未来供需平衡、调峰需求、安全校核的风险度。主要优越性归纳如下：

1) 提高节能发电调度的有序性。

燃煤火电机组具有较大的物理惯性，其开停机过程涉及锅炉热力系统的缓慢动态过程，完成启停

过程需要较长时间，并在开机一段时间后才能达到最佳运行工况。为此迫切要求节能发电调度能够在更长时间范围内优化开机方式，优化决策机组合同电量的完成进度，避免机组频繁启停，提高节能发电调度的有序性。

2) 提高节能发电调度的有效性。

实测的机组煤耗曲线表明：机组的平均煤耗曲线呈现下降趋势，即随着机组负荷率的提升，单位kW发电煤耗降低。通过月度开机方案的优化，可实现同类型大机组之间的互相配合，通过机组间的有序调停，大幅提升机组的运行负荷率，降低系统的总发电煤耗，提高节能发电调度的有效性。

3) 实现与电力市场的有效衔接。

在电力市场环境下，当机组的报价能够反映机组发电的外部成本时，必然形成通过竞争产生的年度与月度合同电量；然而，完成这些合同电量的方式不同，其节能效果是有差异的。本文提出的模式可在确保完成合同电量的基础上，通过对机组开机方案的优化，进一步挖掘发电计划的节能潜力。节能发电调度不是权宜之计，是对电力市场有益的补充。市场竞争确定机组的发电量，而节能发电调度优化机组的开机方式。

2 月度机组组合模型

2.1 目标函数

广东省的水能与煤炭资源均非常匮乏^[17]，长期以来形成了以火电为主的电源结构^[18]，省内发电计划的节能性大部分由火电机组的运行状态所决定。为此，本文针对广东电网的统调火电机组开展建模，在月度范围内优化决策统调火电机组的启停方案。

月度机组组合模型的目标函数为

$$\min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N (\alpha_{i,t} F^i(P_{i,t}) + S_{i,t,U}) \right] \quad (1)$$

式中： T 为月度所考虑的时段总数； N 为机组的总台数； $P_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的出力； $F^i(P_{i,t})$ 为机组 i 的煤耗特性，即机组出力为 $P_{i,t}$ 时的煤耗水平， t ； $S_{i,t,U}$ 为机组的启动费用，元； $\alpha_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的启停状态，若机组开机则 $\alpha_{i,t}=1$ ，机组停机则 $\alpha_{i,t}=0$ 。在本文模型中假定机组在同一天之内的启停状态不变，机组每天只有一个启停变量 $\alpha_{i,d}$ 。

在目标函数中，由于机组运行煤耗 $F^i(P_{i,t})$ 与机组启动费用 $S_{i,t,U}$ 的单位不一，需要将二者的量纲进行统一。简化起见，仅以标煤的价格作为比例因子，

将机组的启动费用转换为等效的煤耗值来考虑。

2.2 约束条件

月度机组组合模型主要考虑以下约束条件。

1) 负荷平衡约束。对于每个时段 t ，负荷平衡约束可以描述为

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

式中 $P_{D,t}$ 为系统负荷。

2) 最小备用容量约束。即

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{i,d} P_{i,\max} \geq \max\{P_{D,t,t \in S(d)}\} + P_R \quad (3)$$

式中： $\max\{P_{D,t,t \in S(d)}\}$ 为第 d 天的最大负荷； P_R 为所需的备用容量； $P_{i,\max}$ 为第 i 台机组的容量。

3) 机组最小启停时间约束。根据火电机组的物理属性及实际运行需要，要求火电机组满足最小连续开机/停机时间。最小启停时间约束可以描述为

$$\begin{cases} T_{i,d}^D - (\alpha_{i,d} - \alpha_{i,d-1})T_D \geq 0 \\ T_{i,d}^U - (\alpha_{i,d-1} - \alpha_{i,d})T_U \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： T_U 、 T_D 为机组的最小连续开机时间和最小连续停机时间； $T_{i,d}^U$ 、 $T_{i,d}^D$ 为机组 i 在第 d 天时已经连续开机的时间和连续停机的时间。

4) 机组启动费用约束。定义 $\beta_{i,d}$ 为机组 i 在第 d 天的状态变化量，并且仅反映机组的开机过程，应满足如下的约束条件，即

$$\beta_{i,d} = \begin{cases} 1, & \alpha_{i,d} - \alpha_{i,d-1} > 0 \\ 0, & \alpha_{i,d} - \alpha_{i,d-1} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

机组月度的总开机费用可表示为

$$S_{i,t,U} = \sum_{d=1}^D \beta_{i,d} C_i \quad (6)$$

式中： C_i 为机组开机 1 次所需的费用； D 为机组在该月处于开机状态的天数。

5) 机组最大启停次数约束。火电机组的启停过程需要较长的时间周期，且启动过程中能耗量较大，机组的频繁启停不仅不利于电网的节能减排，还会对机组的运行寿命造成一定的影响。因此，在月度机组组合模型中，需要对机组的最大启停次数进行限制，即

$$\sum_{d=1}^D \beta_{i,d} \leq N_{UT} \quad (7)$$

式中 N_{UT} 为机组在月度的最大启停次数，一般考虑为 1 次。实际上，由于在目标函数中考虑了机组启动费用的影响，优化结果中机组的启动次数会自动满足约束条件，以实现目标函数的最优性。

6) 机组出力上下限约束。机组出力 $P_{i,t}$ 应该处于其最大/最小技术出力范围之内，其约束条件可以描述为

$$\alpha_{i,d} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq \alpha_{i,d} P_{i,\max} \quad (8)$$

若机组停机，则机组出力被限定为 0；若机组开机，式(8)即常规的出力上下限约束。

7) 机组电量约束。本文模型考虑机组的月度合同电量约束条件，即

$$T_0 \sum_{i=1}^T P_{i,t} = W_i \quad (9)$$

式中： T_0 为计划周期内 1 个时段的长度； W_i 为机组的月度电量。

8) 机组爬坡能力约束。即

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_{i,\max,\text{up}} \alpha_{i,d} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta P_{i,\max,\text{down}} \alpha_{i,d} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\Delta P_{i,\max,\text{up}}$ 和 $\Delta P_{i,\max,\text{down}}$ 分别为第 i 台机组在所考虑的时间间隔内增、减出力的最大值。

机组每天只有 1 个启停状态变量 $\alpha_{i,d}$ ，在爬坡约束条件中，暂不精细考虑机组的开停机过程。

9) 断面潮流约束。基于直流潮流(DC-flow)模型，在月度机组组合模型中只考虑关键断面的潮流约束，即

$$\begin{cases} \sum_{l \in L} \left(\sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} - \sum_{k=1}^K G_{l-k} D_{k,t} \right) \geq \bar{P}_{L,\min} \\ \sum_{l \in L} \left(\sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} - \sum_{k=1}^K G_{l-k} D_{k,t} \right) \leq \bar{P}_{L,\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\bar{P}_{L,\min}$ 、 $\bar{P}_{L,\max}$ 为断面 L 的潮流传输极限； l 为属于断面 L 的线路； G_{l-i} 为机组 i 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； K 为系统的节点数量； G_{l-k} 为节点 k 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 为节点 k 在时段 t 的母线负荷。

3 求解方法

本文模型将精确考虑机组的实际煤耗特性，由于机组在不同出力点的煤耗水平各不相同，将与单一煤耗值作为机组价值系数的方法相比，模型将更具精确性。

根据实测结果，火电机组的总煤耗量曲线如图 1 所示(以容量为 300 MW 的机组为例)，曲线上的点表示机组处于某出力水平时，其在单位时间内的总煤耗量。

火电机组平均煤耗率曲线如图 2 所示(仍以 300 MW 机组为例)，曲线上的点表示机组处于某出

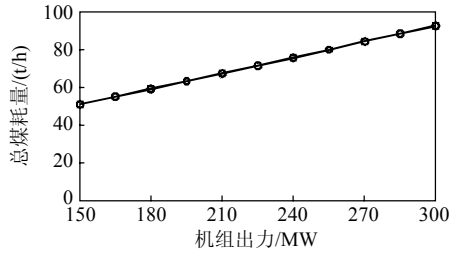


图1 火电机组的总煤耗量曲线

Fig. 1 Total coal consumption curve of thermal unit

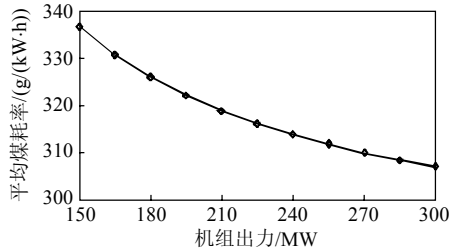


图2 火电机组的平均煤耗率曲线

Fig. 2 Average coal consumption curve of thermal unit

力水平时,发出单位电量所消耗的煤。可以看出,火电机组的平均煤耗率曲线呈下降趋势,即随着机组运行负荷率的提高,机组发电效率提高,平均煤耗率降低。

由图1可以看出,火电机组的总煤耗量曲线具有高度的线性性质,可用一系列分段线性函数对其进行拟合,如图3所示。本文基于火电机组的总煤耗量曲线进行建模,利用文献[19-20]中提到的分段线性化方法,将月度机组组合模型转化为线性混合整数规划问题进行求解。

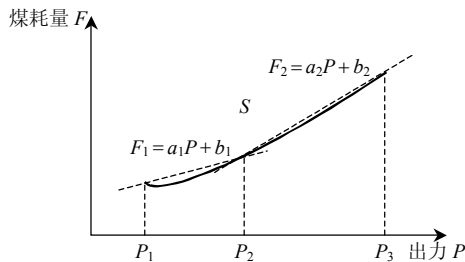


图3 火电机组的总煤耗量曲线的分段线性化

Fig. 3 Piecewise linearization of total coal consumption curve of thermal unit

假设对于机组*i*,将其总煤耗量曲线分为*K*段,第*k*段的线性拟合方程为 $F_{ik}=a_{ik}P_{i,t}+b_{ik}$,对于每一台机组每个时段的出力 $P_{i,t}$,均添加如下的约束条件:

$$F_{i,t} \geq a_{i1}P_{i,t} + b_{i1}\alpha_{i,d}, \dots, F_{i,t} \geq a_{iK}P_{i,t} + b_{iK}\alpha_{i,d}, \quad t \in d \quad (12)$$

式中: $\alpha_{i,d}$ 为第*d*天的机组启停状态变量; t 为第*d*天所属的时段。此时目标函数相应变为

$$\min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N (F_{i,t} + S_{i,t,U}) \right] \quad (13)$$

若机组开机, $\alpha_{i,d}=1$,根据式(12),模型的可行域为直线群 $F_{ik}=a_{ik}P_{i,t}+b_{ik}$ 上方的交集*S*,显然*S*为凸集。根据凸线性规划的性质,其最优解在可行域的边界上取得,因此可保证最优解中机组的出力点必然落在*K*段直线中的某一段上,机组出力与总煤耗量满足 $F_{i,t}=a_{ik}P_{i,t}+b_{ik}$ 的函数关系;若机组停机, $\alpha_{i,d}=0$, $P_{i,t}=0$,式(12)退化为 $F_{i,t} \geq 0$,通过最小化目标函数,能保证机组停机时段的煤耗量为0。

采用机组总煤耗曲线建模;通过分段线性化,本文将原非线性混合整数规划物理模型转化为线性混合整数规划问题。从而,可采用高效的商用软件包 CPLEX 求解。实际算例表明,在保证计算精度的前提下,能够大幅提高模型的求解效率。

4 反映节能效果的支撑指标

由于模型中精确考虑了机组的煤耗特性,而机组的能耗水平与机组的负荷率直接相关;因此,不仅应从电网的总煤耗、平均煤耗等直接评价发电计划的节能效果,还应从机组的运行负荷率、利用率等指标反映发电计划节能效果的真实性,作为反映节能效果的支撑指标,详细指标定义如下。

机组的月度平均运行负荷率为

$$\rho_{i,\text{month}} = \sum_{t \in \Phi_{U,d}} P_{i,t} / (D_i T_d P_{i,\text{max}}) \quad (14)$$

式中: $\Phi_{U,d}$ 为机组在该月开机天数的集合; D_i 为机组*i*在该月处于开机状态的天数; T_d 为每天考虑的时段数。该指标仅反映机组在运行时段的平均负荷率,不考虑停机时段,反映了机组出力水平接近最佳节能运行点的程度。若机组在该月均处于停机状态,则规定 $\rho_{i,\text{month}}=0$ 。

机组的日平均负荷率为

$$\lambda_{i,\text{day}} = \sum_{t=1}^{T_d} P_{i,t} / (T_d P_{i,\text{max}}) \quad (15)$$

日平均负荷率表示机组每天的实际出力与机组容量的平均比例。

机组的月度平均利用率为

$$\bar{\eta}_{i,\text{month}} = \sum_{t=1}^{T_d D_{\text{mon}}} P_{i,t} / (D_{\text{mon}} T_d P_{i,\text{max}}) \quad (16)$$

该指标反映机组所分配的月度电量与其最大发电能力的比例, D_{mon} 为该月的天数,本文 $D_{\text{mon}}=31$ 。

5 算例分析

5.1 场景设计

本文以2010年10月广东电网的实际调度运行

数据为基础,优化决策统调火电机组的月度启停方案,论证广东电网火电系统在现行节能调度方案上的节能潜力。场景 1 中,考虑每台机组的实际月度电量约束,论证在电量分配格局不变的情况下电网尚存在一定的节能空间;场景 2 中,机组的利用率将按照其容量等级严格排序,机组的月度发电量直接与其设计煤耗值挂钩,论证在低能耗大机组利用更为充分的情况下,电网的进一步节能潜力。

5.2 负荷曲线预处理

广东电网 2010 年 10 月典型日的统调负荷曲线如图 4 所示。将所有火电机组各时段的实际出力分别相加,得到火电系统需要平衡的负荷,而非燃煤机组的出力以及外省联络线送入功率视为定值。

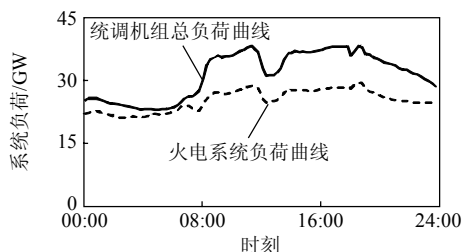


图 4 广东电网 2010 年 10 月典型日负荷曲线

Fig. 4 Typical daily load curve of Guangdong Power Grid in October, 2010

5.3 场景 1 分析

5.3.1 节煤效益分析

通过本文模型优化计算,统计全月的系统总煤耗、平均煤耗,并以实际调度场景的统计值为基准,计算优化调度场景下节煤量、节煤率,结果如表 1 所示。

表 1 场景 1 系统煤耗统计结果

Tab. 1 Statistical result of coal consumption in case 1

场景	总煤耗/kt	平均煤耗/ (g/(kW·h))	节煤总量/kt	单位节煤量/ (g/(kW·h))	节煤率/%
实际调度	5 372	306.51	—	—	—
优化调度	5 330	304.14	42	2.37	0.77

由表 1 可见,通过对机组月度启停状态的优化,在保证各机组完成其月度电量的前提下,系统仍然存在节煤空间,相对于实际调度场景,平均节煤量达到 2.37 g/(kW·h),节煤率为 0.77%。

5.3.2 机组运行负荷率分析

本节将从机组的月度平均运行负荷率与日平均负荷率对机组的运行状态进行比较、分析。通过优化计算,统计各容量等级机组的月度平均运行负荷率,并与实际调度场景下的统计结果进行比较,如表 2 所示。

表 2 月度平均运行负荷率统计结果

Tab. 2 Statistical result of monthly-average load factor

机组容量等级/ MW	月度平均运行负荷率/%		
	实际调度场景	优化调度场景	变化量
1 000	65.96	65.96	+0.00
600	73.97	79.00	+5.03
300	71.03	83.06	+12.03
200	79.10	88.41	+9.31
100	76.71	78.51	+1.80
<100	83.24	89.19	+5.95

由表 2 可见,由于大容量机组启动费用较高,一般在月内不启停,其平均运行负荷率与实际调度场景基本持平;而小机组启动费用较低,在月内将进行有序的启停,在该场景下考虑了机组实际电量的约束条件,机组需在其开机时段完成月度电量指标,这将使得机组运行时段的负荷率得到有效提升,达到提高机组运行效率,降低发电煤耗的效果。

以汕头 1#1 机组(容量为 300MW)为例,通过月度机组组合模型得到的机组全月的日平均负荷率曲线和实际调度情况下机组全月的日平均负荷率曲线如图 5 所示。

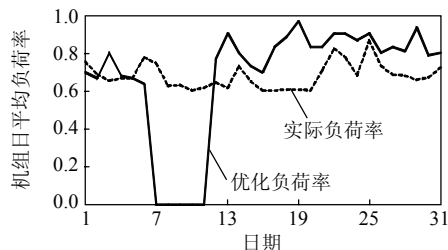


图 5 汕头 1#1 机组日平均负荷率曲线

Fig. 5 Daily-average load factor curve of Shantou 1#1 unit

测算结果表明,在现行调度模式下,机组全月均处于开机状态,日平均负荷率较低。经过机组启停状态的优化,机组在 7—11 日停机,在现行的基础上提升了机组开机时段的负荷率。

5.3.3 机组有序调停分析

机组的有序调停是指在满足电网安全运行的前提下,通过合理调停燃煤机组,提高开机机组的运行负荷率,实现机组间的相互配合并获得节煤减排效益的过程^[11]。以汕头 1#1 机组与妈湾#1 机组为例(容量均为 300 MW),实际调度场景下两机组的日平均负荷率曲线如图 6 所示,通过优化计算得到的日平均负荷率曲线如图 7 所示。

2 台机组在实际调度场景与优化调度场景下的月度平均运行负荷率如表 3 所示。由表 3 可见,2 台机组分别在 7—11、17—21 日关停,通过错开关停时间,实现同类型机组之间的有序配合,在保证同类型机组之间公平性的前提下,提升机组的平均

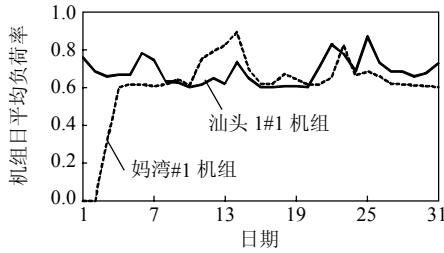


图6 汕头1#1机组和妈湾#1机组的实际日平均负荷率曲线
Fig. 6 Daily-average load factor curve of Shantou 1#1 unit and Mawan #1 unit in real dispatch case

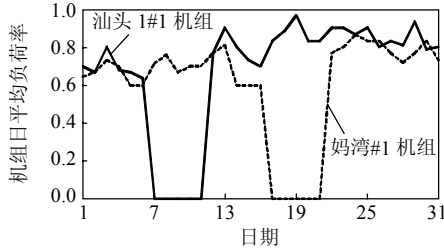


图7 汕头1#1机组和妈湾#1机组的优化日平均负荷率曲线
Fig. 7 Daily-average load factor curve of Shantou 1#1 unit and Mawan #1 unit in optimizing dispatch case

表3 汕头1#1机组、妈湾#1机组的月度平均运行负荷率
Tab. 3 Monthly-average load factor of Shantou 1#1 unit and Mawan #1 unit

月度平均运行负荷率/%	实际调度场景	优化调度场景	变化量
汕头1#1机组	67.47	80.45	+12.98
妈湾#1机组	60.57	72.22	+11.65

运行负荷率。

测算结果表明，月度机组组合模型在保证系统备用、电力平衡、电量平衡的基础上，整体提升了机组月度平均运行负荷率，最大限度提升发电计划的节能效益。

5.4 场景2分析

5.4.1 机组利用率分析

该场景下机组的平均利用率曲线如图8所示，由图可见，在该场景下，机组的利用率随着其容量等级下降而降低，即大机组比小机组得到了更为充分的利用。

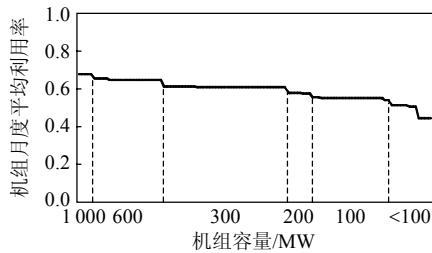


图8 场景2下机组的平均利用率曲线
Fig. 8 Average utilization rate curve in case 2

5.4.2 节煤效益分析

该场景下系统的节煤效益如表4所示。可以看出，通过对机组发电量的调控，电网中大机组的利

表4 场景2系统煤耗统计结果

Tab. 4 Statistical result of coal consumption in case 2

场景	总煤耗/kt	平均煤耗/(g/(kW·h))	节煤总量/kt	单位节煤量/(g/(kW·h))	节煤率/%
实际调度	5372	306.51	—	—	—
优化调度	5298	302.32	74	4.19	1.37

用率更为充分，电网的节煤效益相应增加，相对于实际调度场景，平均节煤量达到4.19 g/(kW·h)，节煤率为1.37%。随着节能发电调度力度的增大，大小机组之间利用率的差异将逐步增大，电网的节能潜力也将得到进一步的挖掘。

6 结论

1) 以月度开机方式优化为主、日前节能调度为辅的新型节能发电调度模式，从时间维度上拓展了节能发电调度的优化空间，能在保证机组完成月度合同电量的前提下，通过优化机组的开机方式，全面提高机组的运行负荷率，尽可能使机组出力水平接近最佳能效运行点。该模式也实现了节能发电调度与电力市场的有效衔接，在电力市场环境下，由市场竞争确定机组的合同电量，节能发电调度优化机组的开机方式。

2) 建立的月度机组组合模型综合考虑了电网运行与机组运行的各类约束条件；根据机组总煤耗量曲线具有高度线性的特征，采用分段线性化处理的方式，将月度机组组合模型转化为混合线性整数规划模型进行求解，在不损失计算精度的前提下，大幅提升了模型的计算速度。

3) 基于广东电网2010年10月的实际调度运行数据，对本文设计的月度机组组合模型进行测算，表明本文提出的模式、模型和方法的科学性和有效性。

参考文献

[1] 国务院. 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(国办发[2007]53号文)[S]. 2007.

[2] 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).

[3] 胡建军, 李嘉龙, 陈慧坤, 等. 基于煤耗和排放的日发电曲线编制模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 43-45.
Hu Jianjun, Li Jialong, Chen Huikun, et al. A generation dispatch scheduling model based on coal constion and emission of generation unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 43-45(in Chinese).

[4] 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(24): 11-15(in Chinese).
- [5] 施建华, 谭素梅. 节能发电调度发电计划编制算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 48-51.
- Shi Jianhua, Tan Sumei. Fundamental research and case studies of impacts on voltage when resuming load through a black startup process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 48-51(in Chinese).
- [6] 韩彬, 周京阳, 崔晖, 等. 引入 SO_2 排放惩罚价格因子的节能减排发电调度模型及实用算法[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 50-54.
- Han Bin, Zhou Jingyang, Cui Hui, et al. An energy conservation and emission reduction based power generation scheduling model leading in factor of penalty price due to SO_2 emission and its practical algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 50-54(in Chinese).
- [7] 温丽丽, 刘俊勇. 混合系统中、长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 24-29.
- Wen Lili, Liu Junyong. Monte Carlo simulation of medium and long-term generation plan in hybrid power system based on environmental/economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 24-29(in Chinese).
- [8] 颜拥, 文福拴, 王健, 等. 计及节能减排要求的大规模电力系统长期发电计划的制定[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(1): 35-38.
- Yan Yong, Wen Fushuan, Wang Jian, et al. Longer term generation scheduling for large scale power systems considering energy saving and emission reduction[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(1): 35-38(in Chinese).
- [9] 毛毅, 车文妍. 兼顾节能与经济效益的月度发电计划模型[J]. 现代电力, 2008, 25(5): 73-78.
- Mao Yi, Che Wenyan. Monthly generation scheduling considering energy-saving and economic benefit[J]. Modern Electric Power, 2008, 25(5): 73-78(in Chinese).
- [10] 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 model of energy-conservation based on thermal unit cyclic operation and its benefit analysis[J]. Electric Power, 2010, 43(9): 19-23(in Chinese).
- [11] 滕晓毕, 吴臻, 黄静, 等. 面向低碳发展的燃煤机组有序调停模型和算法[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 33-39.
- Teng Xiaobi, Wu Zhen, Huang Jing, et al. Model and algorithm of coal-fired unit cyclic operation toward low-carbon development[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 33-39(in Chinese).
- [12] 王治国, 刘吉臻, 谭文, 等. 基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 86-92.
- Wang Zhiguo, Liu Jizhen, Tan Wen, et al. Multi-objective optimal load distribution based on speediness and economy in power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 86-92(in Chinese).
- [13] 梁志飞, 夏清, 许洪强, 等. 基于多目标优化模型的省级电网月度发电计划[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 90-95.
- Liang Zhifei, Xia Qing, Xu Hongqiang, et al. Monthly generation scheduling method based on multi-objective optimization model for provincial power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 90-95(in Chinese).
- [14] Liang Zhifei, Kang Chongqing, Xu Hongqiang, et al. A new multiple objectives optimization model of monthly generation scheduling[C]//International Conference on Power System Technology. Chongqing: IEEE, 2006: 1-6.
- [15] Gonzalez C, Juan J, Mira J, et al. Long-term generation scheduling in systems with large hydro resources in a deregulated electric power market[C]//Power Engineering Society General Meeting. Toronto: IEEE, 2003: 320-323.
- [16] Iguchi M, Yamashiro S. An efficient scheduling method for weekly hydro-thermal unit commitment[C]//Proceedings of IEEE TEHCON'02. Beijing: IEEE, 2002: 1772-1777.
- [17] 常浩. 试论南方电网发展规划[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 15-21.
- Chang Hao. A preliminary research on planning for development of southern power grid in China[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 15-21(in Chinese).
- [18] 陈旭, 左郑敏. 抽水蓄能电站在广东的发展分析[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 56-61.
- Chen Xu, Zuo Zhengmin. Analysis on development of pumped-storage station in Guangdong province[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 56-61(in Chinese).
- [19] Frangioni A, Gentile C. Perspective cuts for a class of convex 0-1 mixed integer programs[J]. Math Program, 2006, 106(2): 225-236.
- [20] Frangioni A, Gentile C, Lacalandra F. Tighter approximated MILP formulations for unit commitment problems power systems[J]. IEEE Transactions, 2009, 24(1): 105-113.



夏清

收稿日期: 2011-04-15.

作者简介:

夏清(1957), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为经济调度、电力市场, E-mail: qingxia@mail.tsinghua.edu.cn;

陈雨果(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为经济调度、电力市场, E-mail: chenyg1987819@126.com;

陈亮(1977), 男, 硕士研究生, 从事电力调度工作, E-mail: chenliang1999@sina.com.

(责任编辑 马晓华)