

Optimization Research and Application of Medium and Long Term Scheduling Scheme Considering the Direct Power Purchase for the Large User Constraints

Huiling Zhang¹, Ting Li¹, Wenzhao Mao², Shaoqing Guo²

¹Ningxia Provincial Power Dispatch and Control Center, Yinchuan Ningxia

²Beijing QTCT Limited Company, Beijing

Email: 13592440890@139.com

Received: Apr. 3rd, 2016; accepted: Apr. 17th, 2016; published: Apr. 20th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper takes account of the mode of energy generation dispatch, economic dispatch and energy conservation dispatch which has been across multiple time dimensions including year, quarter, month, week and day. This paper is based on power system basic theory and mathematical optimization theory. It utilizes advanced design ideas to develop key technologies and models which take adequate account of actual scheduling experiences, actual needs in operation and trading constraints of direct power purchase of large consumers and also implement long-term scheduling optimization decisions on annual electricity decomposition, unit combination formulation and the coordination of them. The research improves the quality of scheduling in many methods like the precision and efficiency of scheduling, and the rationality of scheduling results.

Keywords

Ningxia Power Grid, Large User Direct Purchase of Electricity, Medium and Long Term Scheduling Scheme, Annual Energy Decomposition

考虑大用户直购电交易约束的中长期调度计划优化研究与应用

张慧玲¹, 李 婷¹, 毛文照², 郭少青²

文章引用: 张慧玲, 李婷, 毛文照, 郭少青. 考虑大用户直购电交易约束的中长期调度计划优化研究与应用[J]. 智能电网, 2016, 6(2): 107-115. <http://dx.doi.org/10.12677/sg.2016.62012>

¹宁夏电力调控中心, 宁夏 银川

²北京清大科越科技有限公司, 北京

Email: 13592440890@139.com

收稿日期: 2016年4月3日; 录用日期: 2016年4月17日; 发布日期: 2016年4月20日

摘 要

宁夏电网考虑大用户直购电约束的中长期调度计划优化研究与应用在优化模式上兼顾了节能发电调度、经济调度、兼顾节能的经济调度等模式, 在时间维度上跨越了年度、季度、月度、周、日前等多个时间维度, 立足于电力系统基础理论和数学优化理论, 充分考虑实际调度经验和实际运行中的实际需求, 以及大用户直购电交易约束, 采用先进的设计思想, 并对应研究开发相应的关键性技术和模型, 全面实现年度电量分解、机组组合制定、年度电量分解与机组组合相协调的中长期调度计划一体优化决策, 从调度计划的制定精度、制定效率、计划结果合理性等多个方面全面提升调度计划的质量。

关键词

宁夏电网, 大用户直购电, 中长期调度计划, 年度电量分解

1. 引言

在我国的电力体制改革实施过程中, 电网调度机构的地位日益凸显, 电网调度运行管理已成为我国电网企业众多业务中最为核心的业务之一。受限于大规模优化计算技术的制约, 长期以来, 发电机组月度电量的分解与机组组合是分离决策的, 没有考虑机组启停费用对电量分解的影响, 没有考虑大用户直购电对机组组合计划的影响; 如有问题将采用人工干预的方法影响机组月度电量的分解。这种分离决策的模式难以保证机组组合与月度电量分解相协调, 难以保证电网安全与合同电量完成相配合, 难以保证机组组合方案与电网安全相配合。考虑大用户直购电交易约束的中长期调度计划系统将研究突破这种传统分离计算的模式, 全面实现月度电量分解、机组组合制定、月度电量分解与机组组合相协调的月度调度计划一体优化决策, 从而获得高效、高精度、高可靠性的月度调度计划, 确保这一决策过程能够在 15 分钟内计算完成。将三个独立的问题统一决策必将产生巨大的经济效益、公平效益、节能效益、安全效益, 提升月度电量分解、机组组合的协调效率[1]-[3]。

2. 系统总体功能

如图 1, 宁夏电网考虑大用户直购电交易约束的中长期调度计划系统主要功能包括:

基础支撑模块: 系统管理、基础信息管理、数据采集模块等;

负荷预测模块: 数据准备、负荷预测、结果管理、计划发布等;

年度电量分解模块: 计算数据准备、约束条件设置、年度电量分解、结果分析等模块;

月度机组组合模块: 计算数据准备、约束条件设置、月度机组组合、结果分析等模块;

分析评估模块: 统计报表及后评估模块。

3. 系统编制流程

如图 2, 考考虑大用户直购电交易约束的中长期调度计划系统编制流程如下:

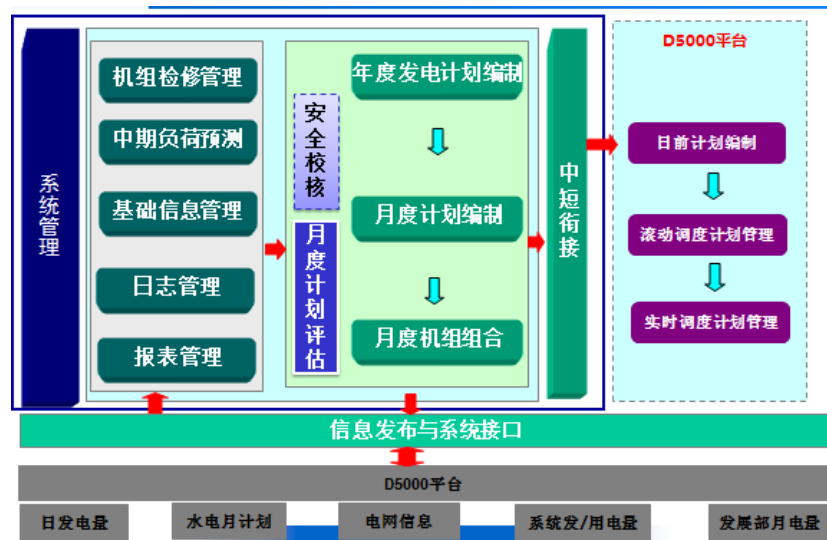


Figure 1. The main function of medium and long-term scheduling

图 1. 中长期调度计划主要功能

首先根据历史负荷数据及节假日等信息预测未来月份的发电量、最大、最小负荷以及未来各天的最大和最小负荷、工作日和节假日的负荷曲线；

然后导入 EMS 系统最新的实际电网模型，导入审批后的电网设备检修计划；

根据实时电网模型和计划检修生成计划月的未来态电网模型；

年度剩余电量分解，考虑年度电量计划、已发生月份电量、大用户直购电约束等信息；

月度机组组合优化决策，考虑安全校核及校正。

4. 约束设置

考虑大用户直购电交易约束的中长期调度计划编制过程中考虑各种约束功能，主要包括：

- 1) **负荷预测**: 各个节点母线有功负荷是考虑电网安全、系统负荷平衡、系统备用预留等约束的基础；
- 2) **机组运行功能**: 机组煤耗参数、机组容量、出力上下限、机组爬坡能力和降出力能力、最小启停时间、机组电量约束条件、机组检修计划等主要机组参数；
- 3) **电厂参数功能**: 包括电厂的容量约束参数、电厂的电量约束参数、电厂最小开机台数、电厂运行负荷率约束等，如图 3；
- 4) **大用户直购电**: 电厂年度和月度大用户直购电约束；
- 5) **电网拓扑参数**: 电网在发电计划决策周期内的拓扑信息、拓扑变化信息以及线路实际参数、发输变电设备的检修数据；
- 6) **电网的实际运行参数设置**: 线路、断面、变压器的传输容量等；
- 7) **机组指定状态**: 机组的实际运行中，部分机组的状态由于供热、检修等原因需要指定开停机状态，不参与优化求解，其他为自由优化状态，如图 4；
- 8) **系统受限约束**: 包括并网减发，电网原因造成的窝电容量、电煤原因造成的缺煤停机容量、煤质差原因造成的降出力容量。

5. 大用户直购电与计划编制模型的整合

考虑大用户直购电交易约束的中长期调度计划是一项综合性的工作，需要考虑电网模型、电网潮流

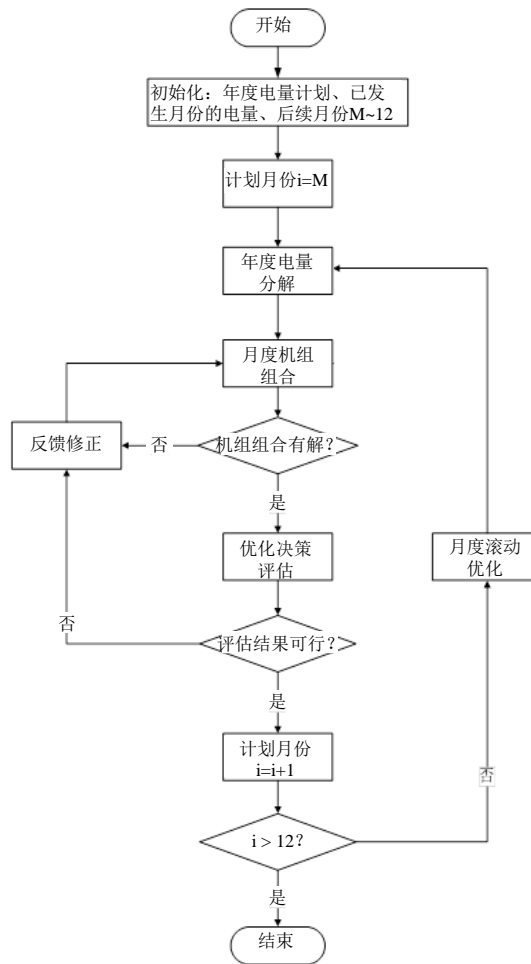


Figure 2. Scheduling process of medium and long-term scheduling

图 2. 中长期调度计划编制流程

电厂名称	机组台数	装机容量(MW)	是否考虑最小运行方式	最小开机机组数	最大月度运行负荷率%	最小月度运行负荷率%
灵武电厂二期	2	2120	<input type="checkbox"/>	1	80	60
鸳鸯湖电厂	2	1320	<input type="checkbox"/>	1	80	60
京能宁东电厂	2	1320	<input type="checkbox"/>	1	80	60
大坝三期	2	1200	<input type="checkbox"/>	1	90	70
灵武电厂	2	1200	<input type="checkbox"/>	1	80	60
大坝电厂	4	1320	<input type="checkbox"/>	1	80	60
石嘴山二电厂	4	1320	<input type="checkbox"/>	1	80	60
石嘴山技改电厂	2	680	<input type="checkbox"/>	1	80	60
马莲台电厂	2	660	<input type="checkbox"/>	1	80	60
中宁二电厂	2	660	<input type="checkbox"/>	1	80	60
大武口热电厂	2	660	<input type="checkbox"/>	1	80	60
六盘山热电厂	2	660	<input type="checkbox"/>	1	80	60
国华宁东电厂	2	660	<input type="checkbox"/>	1	80	60
英力特电厂	2	660	<input type="checkbox"/>	1	80	60
青铜峡铝业电厂	2	660	<input type="checkbox"/>	1	80	60
临河电厂	2	700	<input type="checkbox"/>	1	80	60
西夏热电厂	2	400	<input type="checkbox"/>	1	80	60
灵州电厂	2	270	<input type="checkbox"/>	1	80	60

Figure 3. Operation parameter setting of power plant

图 3. 电厂运行参数设置

指定状态设定		初始状态设定																		
设定出力: <input type="text" value=""/>		*24 (MWH) 条件选择: <input type="radio"/> B备用停机 <input checked="" type="radio"/> ◆正常运行 <input type="radio"/> =固定出力 <input type="radio"/> Y自由优化																		
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
灵武电厂二期# 3机	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	T	T	T	T	T	Y	Y	
灵武电厂二期# 4机	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
鸳鸯湖电厂# 1机	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
鸳鸯湖电厂# 2机	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
京能宁东电厂# 1机	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
京能宁东电厂# 2机	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
大坝三期# 5机	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	
大坝三期# 6机	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	

Figure 4. Assign state of unit
图 4. 机组指定状态

断面、检修申报数据、母线负荷预测、机组发电计划、大用户直购电计划、外网交换计划等诸多数据。近几年宁夏电网规模发展很快，电网结构日新月异，特别是大用户直购电的快速增长，为了保证中长期计划的正确性、科学性和合理性，需要及时更新 EMS 电网模型。通过对各类数据的研究我们发现，电网模型(来自 EMS)数据最庞大、结构更规范、信息更全面，以电网模型为源数据，实现大用户直购电与中长期计划编制系统的规范整合，是切实可行的方案。

- 1) 考虑线路、主变、母线检修方式对电网拓扑的影响，对直购电量进行安全校核。
- 2) 考虑大用户直购电对机组开停机方式的影响，机组最大可发电量必须大于大用户直购电量。
- 3) 年度电量分解结果必须满足大用户直购电电量约束。

6. 年度电量分解

根据所制定的年度电量计划，需要将其按照一定的原则滚动分解至月度(或季度)，以实现年度计划到月度(季度)的最佳分解。

年度电量分解至各月的目标是在电厂年度合同确定的情况下，根据月度负荷预测、机组检修，按电厂将合同电量滚动分解到每个月，保证各月分配的总电量等于该月预测电量，并尽可能保证各电厂每月的合同完成进度接近[4]。

年度电量分解至各月的数学模型可描述如下：

1) 目标函数：

各电厂月平均负荷率与其年平均负荷率的偏差大致相近。

2) 求解方法：

为确保年度电量分解的灵活性，适应现阶段实际应用的需求，在建立标准线性规划模型的同时，也为用户提供了启发式的年度电量分解方法。

年度电量分解的流程图如图 5 所示。

步骤 1：计算各电厂年度实际需要分配的电量

由于月度电量预测的不断更新，各电厂年度剩余合同电量的总和并不与月度电量预测的总和相等，所以首先计算各电厂应分配的电量(Q_i^y)，对超出合同外的电量(或合同的缺额)按各电厂容量大小进行分配(也就是利用小时相等原则)。公式如下：

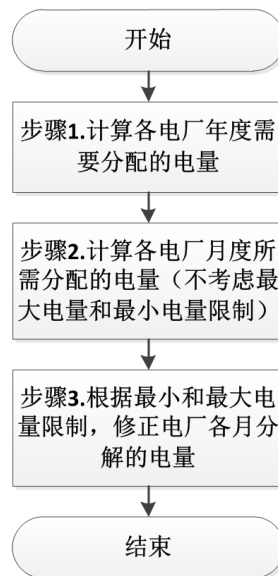


Figure 5. The process of annual energy decomposition
图 5. 年度电量分解基本流程

$$Q_i^y = Q_i^c + \left(Q^y - \sum_{i \in G} Q_i^c \right) \frac{\bar{P}_i}{\sum_{i \in G} \bar{P}_i}$$

步骤 2: 计算各电厂各月需要分配的电量。

优化目标是以电厂月平均负荷率与年平均负荷率偏差大致相近, 故可将电厂月平均负荷率表示为年平均负荷率加上一个负荷率的偏差, 相同月内各电厂的负荷率偏差相同。第 j 月的电量可表示为:

$$Q_j = \sum_{i \in G} C_{ij} R_{ij} = \sum_{i \in G} C_{ij} (R_i + \Delta R_j)$$

由于 $Q^y = \sum_{i \in G} C_i R_i$, 可得电厂 i 在第 j 月的发电量为:

$$Q_{ij} = C_{ij} (R_i + \Delta R_j) = C_{ij} \left(R_i + \frac{Q_j - \sum_{i \in G} C_{ij} R_i}{\sum_{i \in G} C_{ij}} \right)$$

由此式计算的月度分解电量, 对于各个电厂是满足年度需要完成的电量的。

步骤 3: 修正电厂的分解电量。

上一步骤所得的电量没有考虑最小电量和最大电量。本步骤进行修正使其满足最大和最小电量的约束, 其流程如图 6 所示。

上述模型中, 下标 i 表示电厂 i , j 表示月份;

G 为电厂的集合, M 为月集合。

Q_i^y 为电厂 i 年度应分电量; Q_i^c 为电厂 i 年度合同; Q^y 为系统年度电量预测;

Q_j 为第 j 月预测的电量;

C_i 为电厂 i 年发电能力, 等于电厂 i 的容量乘以电厂 i 年度非检修时间。

C_{ij} 为电厂 i 在 j 月的发电能力, 等于电厂 i 的容量乘以电厂 i 在第 j 月的非检修时间。

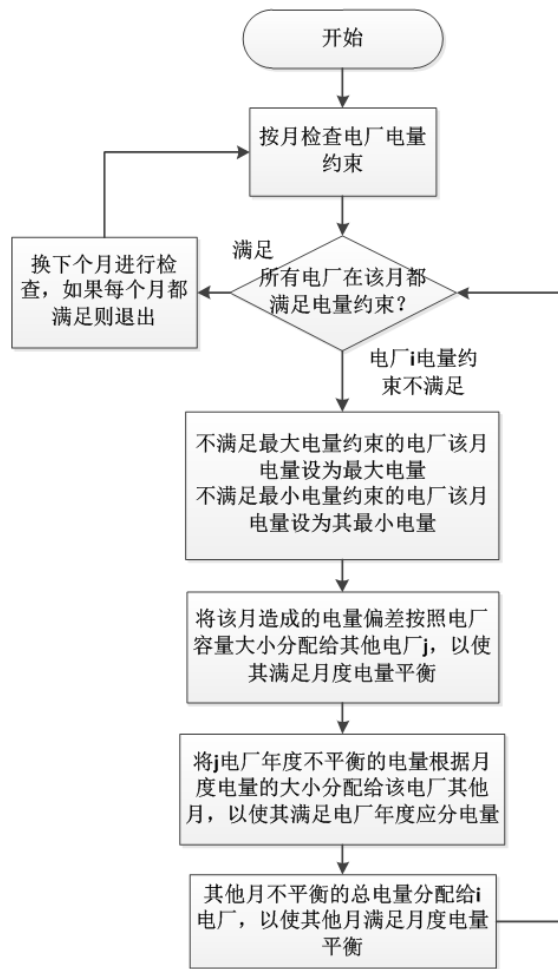


Figure 6. Modify the decomposition of energy of power plant
图 6. 修正电厂的分解电量

R_i 为电厂 i 年平均负荷率; ΔR_j 为 j 月各电厂与其年平均负荷率的偏差; R_{ij} 为电厂 i 在第 j 月的平均负荷率。

7. 月度机组组合

月度机组组合是衔接年度发电计划和周、日前发电计划的关键环节, 其核心是在保证未来月份电力供需平衡的基础上, 优化决策火电机组次月的开停机方案, 实现同类型机组之间交错开机, 有序配合, 在保证机组完成月度分解电量的前提下, 提高机组的运行负荷率, 并确保整个电网发电计划由长期至短期的有序性、安全性和平稳性[5]-[7]。

月度机组组合的数学模型可描述如下:

1) 目标函数:

系统发电煤耗最低、三公调度(计划跟踪)、系统购电费用最低、电力市场等多种优化目标[8]。

2) 求解方法:

以传统的分枝割平面算法为框架, 通过对节点问题进行“松弛解优化趋整”处理, 取得问题的次优解, 进而快速地获得最小化问题的上界, 促进分枝问题尽早多地裁剪, 提高传统分枝割平面算法的计算速度。

月度机组组合问题最显著的计算特点有两条：一是它具有关于整数变量的时段耦合约束，二是其启停成本参数与运行成本参数具有基本相当的优化效益。这两者都导致了月度机组组合问题的计算困难。据此，可以依据下式设置惩罚向量 $\beta_s^{(k)}$ 的各分量 $\beta_{ii}^{(k)}$ ：

$$\beta_{ii}^{(k)} = \frac{1}{\overline{I_{i,\tau}^{(k)}} \Big|_{\tau \in \delta(t,m)}} - 1$$

其中， $\delta(t,m)$ 表示 t 的时段邻域，它的中心为 t ，半径为 m ； $\overline{I_{i,\tau}^{(k)}}$ 表示在 t 的邻域内机组 i 所有时段松弛最优解分量 $I_{i,\tau}^{(k)}$ 的平均值。从上式中可以看到， $\beta_{ii}^{(k)}$ 随 $\overline{I_{i,\tau}^{(k)}}$ 的增加而减少；当 $\overline{I_{i,\tau}^{(k)}} = 1$ 时， $\beta_{ii}^{(k)} = 0$ ，说明对于已经在 t 的邻域内取 1 的各时段的 $I_{i,\tau}^{(k)}$ 都不会受到惩罚；当 $\overline{I_{i,\tau}^{(k)}} = 0$ 时， $\beta_{ii}^{(k)}$ 无意义，为了避免这种情况，应追加附加条件：当 $\overline{I_{i,\tau}^{(k)}} < \varepsilon$ 时， $\beta_{ii}^{(k)} = M$ ，这里 ε 和 M 分别代表一极小正数与一极大正数。

这里，首先用 $I_{ii}^{(k)}$ 代替 $\overline{I_{i,\tau}^{(k)}}$ 来说明上式的“趋整”效果。在机组组合模型中，受系统备用约束的限制以及目标最小化的引导，同一时段的机组启停变量 $I_{ii}^{(k)}$ 的加和几乎为一个定值，它反映的是该时段内系统总的开机容量。从这一角度看，整个机组组合问题的实质是如何将同一时段内的系统总开机容量分配给各个机组。对于同一时段 t ，如果 $I_{ii}^{(k)} < I_{jj}^{(k)}$ ，则根据上式罚因子的设置，在第 $k+1$ 次迭代时， I_{ii} 会趋向于取更小的值，而 I_{jj} 会趋向于取更大的值，这样就通过多次的惩罚迭代形成了一种将较大的非整数变量逼向整数 1，将较小的非整数变量逼向 0 的驱动力，并且变量一旦取得 1 或者 0，则其数值将不会在迭代过程再发生变化，因为其罚因子已经在同时段中取得最小或最大。这种惩罚向量的取值方式异化了问题部分变量的价值系数，打破了机组运行费用参数与启停费用参数的优化效益均衡模式，有利于问题的快速收敛。按此方式取得的整数解其优化性能也将是较好的。

然而，在月度机组组合模型中，还有最小启停时间约束这一关于启停状态变量 I_{ii} 的时段耦合约束，其收敛效果必然会受到 I_{ii} 时段间耦合的限制。因此，在对每个时段 t 的 I_{ii} 进行惩罚时，都使用时段 t 邻域内 $I_{ii}^{(k)}$ 的均值，充分考虑了时段耦合特性，使其收敛效果更好。

另外“松弛解优化趋整”的迭代过程需要其他辅助方法将松弛解中的剩余非整数分量取整，可以利用邻域搜索的办法将剩余的非整数分量取整。



Figure 7. Analysis of the ratio of direct power purchase for large user
图 7. 大用户直购电比例分析

状态说明: 0是停机 1是开机 -1是检修		导出打印报表		导出		保存		发送到OMS		火电最小可调系数设置		全屏																									
电厂名称	发电量	负荷率(%)	机组名称	当前	11/01	11/02	11/03	11/04	11/05	11/06	11/07	11/08	11/09	11/10	11/11	11/12	11/13	11/14	11/15	11/16	11/17	11/18	11/19	11/20	11/21	11/22	11/23	11/24	11/25	11/26	11/27	11/28	11/29	11/30			
六盘山热电...	35641	75	六盘山热电厂#1机	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
			六盘山热电厂#2机	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
国华宁东电...	10366	59.49	国华宁东电厂#1机	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			国华宁东电厂#2机	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
英力特电厂	20452	86.08	英力特电厂#1机	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
			英力特电厂#2机	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
青铜峡铝业...	28540	80.08	青铜峡铝业电厂#1机	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			青铜峡铝业电厂#2机	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
类型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19																		
水电最大可调	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	
水电最小可调	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
光伏最大出力	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
最大可调	1404	1404	1404	1404	1404	1437	1437	1404	1437	1437	1437	1437	1404	1404	1404	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447	1447
最小可调	859	859	859	859	859	877	877	859	877	877	877	859	859	859	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887	887
高峰正备用	47	47	47	47	47	80	60	27	60	60	58	58	25	25	25	25	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
低谷负备用	276	276	276	276	276	258	260	278	260	260	262	262	280	280	280	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284	284
中午负备用	188	188	188	188	188	170	170	188	170	170	172	172	190	190	190	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208	208

Figure 8. The results of monthly unit commitment

图 8. 月度机组组合结果

8. 结果分析评估

1) 对大用户直购电在电厂分月计划电量所占的比例进行分析, 如果所占比例过高, 则进行相应的手工调整, 如图 7。

2) 对月度机组组合结果进行分析, 根据组合结果计算电厂月度运行负荷率以及系统电力电量平衡, 如图 8。

9. 结论

考虑大用户直购电交易约束的中长期计划编制系统是电网智能调度的重要创新, 全面实现了中长期负荷预测、考虑大用户直购电约束的年度电量分解、月度机组组合中长期计划编制全过程, 可以为宁夏电网调度工作提供科学高效的技术支持, 有利于提高和改善宁夏电网调度工作的管理水平与实施效果, 实现发电计划编制的最优化、协调化、规范化、流程化, 并创造显著的社会效益与经济效益, 实现多方共赢。

参考文献 (References)

- [1] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 2.
- [2] 张利. 电力市场中的机组组合理论研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2006: 12.
- [3] 高宗和, 耿建, 张显, 陈皓勇, 文福拴. 大规模系统月度机组组合和安全校核算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 28-30.
- [4] 黎灿兵, 胡亚杰, 赵弘俊, 等. 合约电量分解通用模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 26-30.
- [5] 夏清, 康重庆, 沈瑜. 考虑电网安全约束条件的机组组合新方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(9): 14-17.
- [6] 白晓民. 利用动态规划法进行电力系统经济调度中机组最优组合的实用研究[D]: [硕士学位论文]. 中国电力科学研究院, 1982: 6.
- [7] 朱瑞云. 用网络规划法计算电力系统的最优机组组合[D]: [硕士学位论文]. 中国电力科学研究院, 1986: 8.
- [8] 梁志飞, 夏清, 许洪强, 朱明祥, 张健, 杨明辉. 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.