中国电力市场模式的探讨

沈 瑜，夏 清，康重庆
（清华大学电机系，北京 100084）

摘要：根据我国电力体制改革现状，对电力市场模式进行了探讨，提出了改进的电力联营模式。该模式建立了提前电能市场、发电辅助服务市场、实时平衡市场、电力期货市场等各类市场，并通过各类市场的竞争机制以及在时序上的配套、在空间上的相互协调，能够有效地保障电力系统的安全可靠运行和各类市场的有效竞争。并提出了将实时平衡市场应用于拥塞管理的模型以及求解思路。

关键词：电力市场；电力联营；交易计划；拥塞管理

中图分类号：TM 73；F 123.13

0 引言

在电力市场环境下，发电商与电网公司成为公平买卖、进行电力交易的平等的市场成员。传统的基于粗放成本管理和行政手段的一系列调度和控制方案，将完全不能适应充满竞争的市场环境。必须用全新的视角重新审视电力系统运行控制及规划工作的各个环节，尽可能引入市场调节手段。

本文对电力市场模式进行了探讨，提出了改进的电力联营模式，建立了各个市场模型，并提出了相应求解思路。

1 改进的电力联营模式及其市场结构设计

当前世界各国的电力市场模式各种各样，世界各国向市场化发展的道路也各不相同。就我国国情而言，比较适合采取渐进的改革路线。市场化实践的第1步应当本着“结构简单、规则简单”的原则，优先借鉴国外成熟的市场模式。

英国电力市场[1]的电力联营(Pool)模式自1990年至今，作为一种先进的市场模式，为世界各国的电力市场化提供了相当宝贵的借鉴经验。但近10年的运行实践，也暴露了该模式的一些缺陷，当前正处于改革完善阶段。该模式与其他模式相比，体制结构比较简单，值得我国初期电力市场化借鉴。

本文提出的模式是传统Pool模式的改进型，借鉴了国际上其他模式的思路，以避免传统的Pool模式的缺陷。主要包括：

a. 将发电辅助服务从提前市场中分离出来，建立单独的发电辅助服务市场，其中典型的是调频市场和各种备用市场。以备用市场为例：在提前电能市场结束之后，交易中心将组织备用服务的投标。如果发电商在购电计划安排之后，还有备用能力，就可以向交易中心申报备用容量以及相应的报价信息。交易中心将按照报价由低到高逐步采购，直到采购的备用总额达到规定的数量为止。

b. 组织了实时平衡市场，以经济手段鼓励市场成员为实时调度和控制提供尽可能大的调节空间。实时平衡市场在实时运行前短时间内开市，各发电商申报机组的上、下可调容量和相应报价。当调度员需要对系统进行预防性控制或者事故后恢复控制时，就可以利用这些申报信息，确定一个最优的调节方案，对交易计划进行实时调整。

c. 与传统实时控制不同，本模式利用实时经济控制策略。实时经济控制策略将考虑各发电商提供的各种发电辅助服务以及实时平衡市场的报价信息，选用有利于提高系统资源利用率且报价低的机组参与控制。

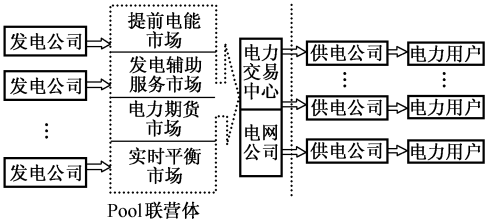
总之，就市场的组织来说，一方面，交易中心将通过提前电能市场和辅助服务市场制订大致可行的最优交易计划，并预先采购足够的发电辅助服务合同。另一方面，组织实时平衡市场，鼓励市场成员为实时调度和控制提供尽可能大的调节空间。另外，为了保持电价的相对稳定性，以及为电力工业的发展吸引足够的资金，还可以组织电力期货市场。通过在以上4类主要的市场中引入竞争机制，电网公司可以有计划地组织电力生产和交易，确保系统安全、可靠、经济地运行，为电力用户提供优质的电力；并且可以促进整个电力工业的健康、可持续发展。

另外，需要特别指出的是：在电力市场环境下，电力用户和发电商、输电公司、供电公司之间是平等的市场伙伴关系，相互之间更多地以经济纽带相联系。传统的切负荷操作被负荷侧管理(DSM)的理念

收稿日期：1999-11-18。

所取代,全新的管理思路给系统操作员带来了新的调度手段。如果为了保障系统安全,或者出于其他经济上的考虑,系统操作员需要切负荷,必须提前通知用户,并按照事先达成的双方均能接受的价格补偿电力用户的停电损失。这种补偿措施将供电可靠性以经济指标量化,给实时调度带来了新的思路。

图 1 表示了改进的电力联营模式下各市场成员之间的关系。



虚线部分表示了与传统 Pool 模式的结构差别

图 1 改进的电力联营模式
Fig. 1 The improved Pool model

2 提前电能市场的组织

提前电能市场是电力交易系统的主要部分。按照提前的时间可分为小时前市场、日前市场、周前市场或者更长时间的提前市场。在该市场中,发电商参与发电电能的竞标,由交易中心决策最优的交易计划及结算电价。

交易中心在收到各发电商的申报数据之后,首先利用无约束的购电计划模块,在不考虑输电网络约束的条件下,形成系统各时段的边际发电价格;然后再利用考虑输电网络约束条件的购电计划模块进一步决策出对各发电机组的购电计划。该购电计划必须适合未来时段负荷状况、满足电网安全稳定运行和机组技术参数约束。

电网公司对发电商的购电价格主要根据系统边际发电价格(SMP)计算得到。SMP 由不考虑输电线路约束的电力交易计划确定,这是为了排除输电网络的影响,尽可能真实地反映电力供需状况、体现发电商之间的公平竞争。

电网公司对电力用户的售电价格是在购电价格的基础上增加一部分电网运行与管理所需要的费用。这部分附加费用分为 2 类:一类是发电辅助服务费用,包括用于无功补偿和电压控制的系统辅助装置的成本,由负荷预测误差及系统备用需求、系统调频需求引起的成本;另一类是使用输电服务的费用,包括引起的网损补偿及输电线路资源的使用费用。

在英国市场模式中,购电计划的制订沿用了原有的发电计划模型。该模型假定机组的报价为边际生产成本,建立的目标函数是发电总成本最低。但是,发电总成本最小化这一目标实际上内含了原有体制下的结算规则:按各机组的发电成本付费。这一点与市场模式下按统一价付费的结算方式是矛盾的,也就是说定价规则与结算规则之间存在矛盾。基于以上观点,作者建立了新的购电计划模型,有关讨论总结于文献[2]。

新模型以各机组的报价曲线作为制订边际电价的参考,其目标函数是购电总成本最低。其中购电总成本的计算反映了实际的结算规则。进一步的研究给出了交易计划的公平性准则和最优性准则。文献[2]还对系统边际电价的概念做了部分改进,以精确反映电力供需状况,并体现发电商之间的公平性。

3 发电辅助服务市场

发电辅助服务包括:①有功频率控制(AGC);②旋转备用;③非旋转备用;④替代备用;⑤无功及电压支持;⑥恢复及黑启动。

其中旋转备用、非旋转备用和替代备用三者的区别,只在于机组响应调度的速度。对于旋转备用,机组始终处于开机状态,可以在极短的时间内响应调度需要;对于非旋转备用,机组处于停机状态,但可以在 10 min 内成为可调度机组;对于替代备用,指可在 60 min 内成为可用的发电容量。

交易中心对前 4 种辅助服务每天单独组织拍卖市场,市场开市的顺序是:AGC,旋转备用,非旋转备用,替代备用。后两者一般由长期合同规定,暂不予讨论。

在辅助服务市场中,发电商需要提交每种服务的容量投标价和电量投标价格。成功的竞标者将预留发电容量并获得容量付费。在实时调度中,如果中标者被实时调用,则再付给一定的电量电价。因此,电网公司必须付给发电商两方面的费用。

在一定的备用容量总额及各发电商报价情形下,电网公司的总付费与备用容量在实际运行时被调用的概率有关。

假设发电商对某种服务的容量投标价和电量投标价格分别为 C_{Ri},C_{Ei},并假设备用容量被调用的概率因子为 x。

在采购容量时,首先对各辅助服务商的报价排序,采用的排序指标为 $C_{Ri}+xC_{Ei}$。为了使得竞价更透明,x 必须预先由电网公司根据系统中各机组的可靠性及负荷不确定性等因素确定,并公布给所有辅助服务提供商[3]。

付费规则是:

a. 在该市场中,成功的竞标者按以下公式被付给容量价格:

$$C_i = \max_{i \in \Omega}\{C_{Ri} + xC_{Ei}\} - xC_{Ei}$$

b. 如果被调用，则按报价 C_{Ei} 结算电量付费。

有关的采购模型及算法参见文献[3]。

4 实时平衡市场

在实际运行时，由于非计划内机组停运以及市场成员的策略决定，发电量和电力负荷出现偏差是不可避免的。这种不可预料的偏差将导致电力不平衡。AGC 机组会在几秒之内首先响应该偏差。为了周期性地恢复 AGC 机组的基本工作位置点，调度员必须定期采购电力。这种调整产生的偏差叫做指导性偏差。在这种情况下，各种备用都可以被调用。另外，每隔一定的时间(大约 0.5 h)，根据全系统是否缺电或剩余电力，交易中心还组织实时平衡市场。平衡市场与备用资源同时被作为调节的手段。

实时平衡市场是为了鼓励发电商参与调节电力不平衡量。愿意参与平衡市场的发电商可以提前数小时申报可用上调范围及上调价格、可用下调范围及下调价格。在实时调度中，系统调度员首先根据系统总不平衡量，决定启用上调机组还是下调机组。然后，根据调节价格排序，从价格低的机组开始调度，直到满足不平衡量。最后一台调节的机组成为边际调节机组，其报价成为边际调节价格。按照统一定价原则，所有参与调节的机组都被付给边际调节价格。

平衡交易模型将考虑各种实际运行约束，优化目标是总调节费用的最小化。

实时平衡市场可以用于多种情形下的运行控制。例如消除电力不平衡量以及下一节中的拥塞管理。现以简单的消除电力不平衡量为例，说明实时平衡市场的采购原则。

模型的目标函数是：

$$\min \sum_i [\max_i (I_{it}^{r+} C_{it}^{r+}) I_{it}^{r+} |\Delta P_{it}|] \tag{1}$$

或

$$\min \sum_i [\max_i (I_{it}^{r-} C_{it}^{r-}) I_{it}^{r-} |\Delta P_{it}|] \tag{2}$$

式(1)、式(2)分别对应于需要增加和降低总发电量的情形。约束条件是：

$$\sum_i \Delta P_i = P_{\text{spec}}^{\Delta} \tag{3}$$

以及所有系统约束和机组约束条件，参见文献[2]。

其中 I_{it}^{r+} 和 I_{it}^{r-} 是机组 i 在时段 t 是否参与上调或下调市场的布尔变量，若 $I_{it}^{r+} = 1$ 表示机组 i 在时段 t 参与了上调市场，而 I_{it}^{r-} 必然为 0；若 $I_{it}^{r-} = 1$ 表示机组 i 在时段 t 参与了下调市场，而 I_{it}^{r+} 必然为 0；另一种可能性是 $I_{it}^{r-} = 0$ 且 $I_{it}^{r+} = 0$，表示既不参与上调市场，也不参与下调市场。

C_{it}^{r+} 和 C_{it}^{r-} 分别是对应的调节报价；ΔP_{it} 是机组 i 在时段 t 的调节量。

在求解时，根据原计划做微小调整。先对上调机组或下调机组集合根据机组调节价格进行排序，选取最便宜的机组尝试调节。如果调整一个较小的数值步长 δ，其解依然可行，则调整之；如果调整的解不可行，则尝试次便宜的机组。按照这一原则直到不平衡量被消除。如果剩下的机组都不能调整得到可行的解，说明实时平衡市场不能满足调度的需要，需启用其他控制手段，比如备用机组，或者切负荷。

5 拥塞管理

当输电网络出现拥塞时，如何实现最优的实时控制也是电网公司必然面临的难题之一。控制策略必须保证对所有的市场成员是公平和公正的。

在实际应用中，大约需要 30 min 校核一次系统拥塞情况。在市场环境下，可以通过微调 Pool 的交易计划、裁减 Pool 的可中断负荷等市场调节手段来实现。这种拥塞管理机制既体现了对各市场成员的公平性，也鼓励了各市场成员积极参与市场的积极性，为系统调度员提供了更多调节手段。

在建立平衡市场之后，系统调度员可以从平衡市场获得发电商和电力用户参与调节的报价意愿。然后，调度员调用拥塞管理程序以确定计划微调方案。该方案可能是调整机组出力，也可能是切负荷，也有可能同时采取两种调节手段。这取决于整个系统的运行状况、线路拥塞的情况、发电商的调节报价以及电力用户能够承受的电价水平。

与简单的实时平衡市场不同，拥塞管理可能在上调某些机组的出力的同时，下调其他机组的出力。拥塞管理模型的目标函数是未来一段时间内总调节费用的最小化，其中调节费用的计算考虑了平衡调节市场的结算规则，即按照统一的边际上调价格和边际下调价格付费。

调节费用是各机组出力的调整量 ΔP_{it} 及各用户的负荷裁减量 ΔL_{jt} 的函数：

模型的目标函数是：

$$\min \sum_t \left\{ \sum_{j \in N} [\max_i (I_{it}^{r+} C_{it}^{r+}) I_{it}^{r+} |\Delta P_{it}| + \max_i (I_{it}^{r-} C_{it}^{r-}) I_{it}^{r-} |\Delta P_{it}|] + \sum_{j \in M} C_{jt}^{C} \Delta L_{jt} \right\} \tag{4}$$

其中 $I_{it}^{r+}, I_{it}^{r-}, C_{it}^{r+}, C_{it}^{r-}, \Delta P_{it}$ 的含义与上一节相同；C_{jt}^{C} 是用户 j 乐意支付的用电价格；ΔL_{jt} 是安排削减用户 j 的负荷量；再记裁减负荷的向量为 $\Delta \boldsymbol{L}$。

模型中包含尽可能多的约束条件，同文献[2]。

首先得到一个可行解，可行解的获得可以采用

考虑电网安全约束的交易计划模型;其次,考虑一个迭代过程,在迭代过程中,对切负荷手段和机组调节方案进行整体优化,直到得到一个最优的切负荷方案和调节方案。算法框架见图 2。

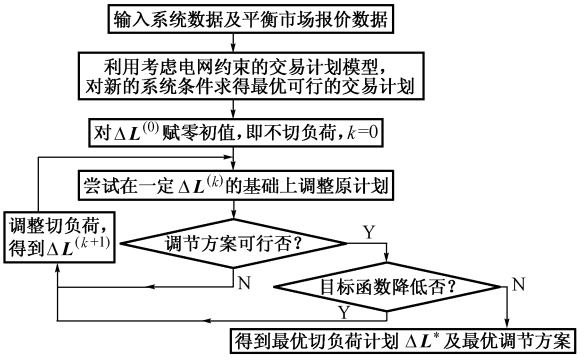


图 2 拥塞管理模型的算法流程
Fig. 2 Flow chart of the model of congestion management

图 2 中,对原计划的调节算法如下:引入变量 RMC^{+}和 RMC^{-},即上调边际电价和下调边际电价。先分别对上调市场和下调市场根据机组调节价格进行排序,然后在原购电计划与可行解中有差别的机组中,找到一对价格最高的上调机组或下调机组,尝试向差别减小的方向调整。如果调整一个较小的数值步长 δ,其解依然可行,则调整之。然后在得到解的基础上继续调整,直到得到最优的调节方案。

调度员按照优化的调节计划,向各机组下达调节指令,事后按照统一的边际调节价格付给发电商调节费用。如果同时需要采取切负荷措施,系统调度员将通知相关用户,并于实际运行时执行。

6 电力期货交易市场

对于交易管理中心来说,电力期货市场实际上可以看做纯粹的金融市场,合同的交割与现货市场在技术处理上可以是等同的。建立电力期货市场,是为了利用这种金融市场手段为电力市场增加稳定因素,并促进电力市场的长期稳定发展。

期货交易合同与现货交易合同相比,有着如下特点:①期货合同的主体与权益可以自由转移;②电力的预期价格是市场中最重要的信息,将影响着期货合同的交易量和交易价格;③期货价格将随着其他一次能源,例如煤炭、天然气的供求状况而随机变化,表现出很强的风险性。

可见,电价的预测工作对市场各方包括交易管理中心来说,是非常重要的。关于电力价格的预测模型,一方面可以借鉴电力负荷预测的经验,另一方面必须建立中长期电力交易模型。中长期电力交易模型将考虑未来时间的供求关系以及未来新项目对电价的影响,进行尽可能精确的随机生产模拟。

参 考 文 献

1 李 帆,朱 敏(Li Fan, Zhu Min). 英国的电力市场及输电系统简介(An Introduction to UK Electricity Pool and NGC Transmission System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1999,23(2):23~40

2 沈 瑜,夏 清,江健健,等(Shen Yu, Xia Qing, Jiang Jianjian, et al). 电力市场短期交易计划新模型及其求解策略研究(A Novel Model of Short-Term Trade Planning in a Deregulated Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1999,23(18):12~16

3 Harry Singh, Alex Papalexopoulos. Competitive Procurement of Ancillary Services by an Independent System Operator. IEEE Transaction on Power Systems, 1999, 14(2):498~504

沈 瑜,男,博士研究生,从事电力市场的研究。

夏 清,男,博士,教授,博士生导师,长期从事电力系统规划与运行的研究,近期主要研究方向为电力市场。

康重庆,男,博士,讲师,从事电力系统自动化的研究。

A NOVEL MODEL FOR RESTRUCTURING OF ELECTRIC POWER INDUSTRY IN CHINA

Shen Yu, Xia Qing, Kang Chongqing
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Power system operation is facing great challenges due to the electricity supply industry restructuring. Brand new measures should be introduced to survey all the aspects of electric power industry. With the status quo in China taken into account, an improved pool model is presented. Some markets such as forward energy market, ancillary services market, real-time balance market and futures market, are coordinated to ensure that power system operates in security and economy and that all market participants compete effectively. Some significant changes are also introduced into the model of trade planning. Besides, real-time balance market mechanism is successfully applied to the congestion management.

Keywords: electricity market; power pool; trade planning; congestion management