

国家自然科学基金项目

电力市场中的辅助 服务理论及其应用

曾 鸣 赵庆波 著



中国电力出版社
www.cpep.com.cn

国家自然科学基金项目

电力市场中的辅助 服务理论及其应用

曾 鸣 赵庆波 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

我国电力改革进入新的历史阶段,电力市场是必然的趋势。电网运营与电能交易必然需要相关辅助服务。本书共分四章,其主要内容有:电力市场辅助服务概述;国外电力系统中的辅助服务及市场运作;电力市场中的辅助服务理论及应用专题研究;我国某区域电网旋转备用定价与交易技术支持系统的开发及应用。

本书的读者对象为:电力市场专业研究人员,大专院校相关专业师生,电力系统各级管理决策人员。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力市场中的辅助服务理论及其应用/曾鸣,赵庆波
著. —北京:中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1724-6

I. 电… II. ①曾…②赵… III. 电力工业-市场-研究-中国 IV. F426.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 073535 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 10.625 印张 280 千字

印数 0001—3000 册 定价 20.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



在电力市场中，电能是一种多属性商品（服务），即在电能（有功出力）的生产、交易和使用的时候，必须提供诸如频率控制、电压支持以及各种备用容量等服务，即辅助服务。随着电力工业市场化改革的不断深入，有一些辅助服务也必然会逐步单独形成市场（即单独核定成本、单独定价和交易）。目前已出版的有关电力市场方面的专著都是侧重于电能市场，即有功出力市场，及其相关问题研究，本书将力图比较全面地、系统地、定性分析与定量计算相结合并以定量计算为主地、理论研究与实证研究相结合地、国外经验与国内实际相结合地研究论证电力市场中各种辅助服务的成本、定价及其市场交易的理论、数学模型及其应用问题。

本书共分四章。第一章对电力市场中的辅助服务的基本内容、定价方法及其市场运作模式等方面作了概述。

第二章分别阐述了美国、英国、德国等国家电力市场中的辅助服务运作方法和经验，以及电能市场与辅助服务市场协调优化运作的经验。

第三章是本书的重点内容。根据本书作者近年来负责完成的四项国家自然科学基金项目及其他相关科研项目所获得的部分理论和应用成果，分成十三节进行阐述。第一节分析研究了电能市场（主市场）与辅助服务市场在电网运营调度方面二者的协调优化模型方法及其实施问题。第二节则从市场运作及其交易的角度给出了电能市场与辅助服务市场运作的协调优化模型和方法，以及实证分析。通过这两个专题研究，比较全面地给出了主市场与辅助服务市场如何整体协调的定量模型方法，并通过了实例验证。

第三节是在传统的发电机组优化调度模型中加入了可靠性效益影响因素，给出了一个新的优化调度模型及其算法，也进行了实例验证。第四节给出了在竞争性电力市场环境下，以保证电网安全运营为首要目标，如何设计和运作辅助服务市场的方法。建立了定量模型，给出了算法，并进行了案例研究。第五节给出了备用容量边际损失以及输电损失（风险）的定价方法，将其纳入电力市场交易模型总体框架中。建立了相应的数学模型，并给出了应用实例。第六节和第七节研究了电力市场环境下如何设计和实施负荷频率控制（LFC）的方案和运作模式。给出了各种 LFC 运作模式和实施方案建议；设计给出了用于电力市场环境下 AGC 模拟分析的方案及其软件系统框架，并进行了实际模拟分析。第八节和第九节研究论证了辅助服务市场，尤其是各种备用容量的辅助服务市场的招投标及其交易的方法、市场运营规则等问题。分析研究了在不同的市场模式下如何实现各类备用服务投标“向下”替代的功能，以及这种功能对市场效率的影响；给出了备用容量招投标的一种新的方法，并进行了实证研究。第十节给出了按电网供电可靠性分级定价的数学模型，根据这个模型分析制定了有功和无功旋转备用容量的定价方法和运作机制。并给出了多个案例分析。第十一节和第十二节对电力市场环境下无功服务的成本、价格及其无功服务市场的运作机制和模式进行了较为深入的、定量的研究论证，给出了无功服务招标计划优化的数学模型及其算法，并进行了实证研究。最后一节给出了二级备用市场，既非旋转备用市场，招标计划优化的数学模型，给出了可中断负荷（IL）的市场结构设计方案，并对一个实际电网进行了案例研究。

第四章的内容来自作者负责并作为主要参与者进行研究的一项课题的部分成果。研究论证了我国某区域性电网在未来电力市场条件下旋转备用容量定价与市场交易的数学模型及其算法，开发了相应的技术支持系统，并进行了实证研究。

本书第一章以及第三章的第六节和第七节由赵庆波撰写，其

余章节由曾鸣撰写并负责统稿。作者指导的部分博士研究生及硕士研究生参加了与本书内容相关的科研项目，他们是刘敏、孙昕、童明光、张艳馥、赵永亮、赵海燕、黄琰、吴至复、林廷康、顾翔、敬鑫等。本书适于从事电力企业经营管理及电力市场研究的各方人士以及相关专业的研究生阅读和参考。

由于作者水平有限，加之在整个国际上有关电力市场的理论都还不够成熟，书中难免存在不妥之处，请读者批评指正！

作者

2002 年 12 月于北京

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 辅助服务的定义及其分类	1
第二节 负荷频率控制	4
第三节 发电容量备用	8
第四节 无功服务的定价与管理	10
第五节 本章小结	16
第二章 国外电力系统中的辅助服务及其市场运作	17
第一节 美国纽约州电能市场及其辅助服务市场运作经验分析	17
第二节 英国电力市场中的辅助服务	30
第三节 英国输电网中无功市场的计划与运营	35
第四节 德国辅助服务市场机制及其定价方法概述	40
本章参考文献	45
第三章 电力市场中的辅助服务理论及应用专题研究	46
第一节 电力市场中发电服务与辅助服务调度及交易的协调优化	46
第二节 电能市场和辅助服务市场投标策略的协调与整体优化	61
第三节 考虑发电机组可靠性效益的优化调度模型及其应用	81
第四节 基于保证电网安全运营的辅助服务市场交易模式及其应用	104
第五节 考虑边际备用容量及输电损失的电力市场交易模型及其应用	116
第六节 电力市场中的负荷频率控制及其实施方案	131
第七节 自动发电控制 (AGC) 在电力市场环境下的模拟分析	145

第八节	备用容量辅助服务市场及其运作模式的设计	166
第九节	一种新的辅助服务市场招标与交易方法及其应用	186
第十节	有功、无功旋转备用容量分级可靠性定价理论 及其应用	209
第十一节	无功服务的成本及其定价方法	229
第十二节	无功服务市场招标与交易模型及其应用分析	241
第十三节	二级备用容量辅助服务市场中的可中断负荷管理	257
本章参考文献		271

第四章 我国某区域电网旋转备用定价与交易技术支持 系统的开发及其应用分析

第一节	旋转备用定价与交易的模型及算法研究	283
第二节	区域电网旋转备用市场定价及交易管理技术支持系统 的开发	296
第三节	实例计算过程与结果分析	310
第四节	本章小节	321
第五节	本章附录	322

辅助服务本身并不是新的技术，并非由于电力市场的出现才提出了辅助服务问题，只是在传统的电力系统管理运行方式下，辅助服务问题一直未引起足够的重视。以往电力公司主要重视的是电能。在研究一切与电力生产经济性有关的课题时（经济调度、最优潮流、水火电协调和电价等），其研究对象基本上都是电能，而提供辅助服务的费用与电能的费用是捆在一起的。这是因为，辅助服务的作用是保证供电质量和电力系统安全水平，但不论是供电质量、系统安全水平的确定，还是辅助服务的管理都没有建立在经济分析的基础上。既不清楚提供各种辅助服务的费用，也未能建立衡量系统安全水平和供电质量的经济指标。

尽管在电力市场环境下的电价仍要受到一定程度的管制，但定价也要讲究成本和收益。在电力市场环境下，提高辅助服务的质量可以增加电网的输电容量和效率。但是辅助服务往往与发电、输电、配电的各环节密切相关，而且为了达到某种期望的运行状态需要系统调度员协调各种辅助服务，很难将其作用与费用单独划分出来。在电力市场环境下，独立发电厂对用户不可能无条件的提供辅助服务，因此，必须能够确定与每一项辅助服务相关的费用、各辅助服务供应者相应的贡献、各用户使用了哪些辅助服务及其使用量。辅助服务定价机制不但要确保供应者收回成本，还要保障其合理的利润，并在用户的帐单上单独列出其辅助服务的费用。

第一节 辅助服务的定义及其分类

一般将辅助服务定义为，为将电能从发电厂输送到用户，并

保证安全 and 质量所需要采取的所有辅助措施，对辅助服务各国定义不尽相同。因为辅助服务的供应由电力系统需要决定。其决定因素如下：

(1) 电力系统协调方式。有无统一的电力系统调度中心决定了辅助服务供应的模式。

(2) 电源结构。电网中各类电源所占比例决定了辅助服务的重要程度。

(3) 电网结构。决定各种辅助服务的具体需要。

(4) 管理模式。在电力市场的不同阶段，为避免过于剧烈的振荡，可以采取不同的辅助服务定价方法。

(5) 标准。电力系统的运行水平不同，不能定义一个通用的质量和安全标准。

(6) 量测和监视系统。辅助服务定价采用的算法要以系统的量测和监视水平为基础，水平较低的电力系统不能采用那些信息量需求较大的算法。

根据上述定义，辅助服务可分为以下几类。

(1) 负荷跟踪与频率控制。实时处理较小的负荷与发电功率的不匹配，维持系统频率，并使控制区内负荷与发电功率的偏差及控制区之间的交换功率实际值与计划值的偏差最小。

(2) 旋转备用。由于发电或输电系统故障，使负荷与发电功率发生较大不平衡量时，10min 内可以提供急需的发电容量（增加或降低），恢复负荷跟踪服务的水平。

(3) 运行备用（也称非旋转备用）。30min 内可达到最大的发电设备容量，也包括可中断负荷，用于恢复旋转备用的水平。

(4) 无功备用和电压控制。通过发电机或输电系统中的其他无功电源向系统注入和从系统吸收无功功率，以维持输电系统的电压在允许范围内。

(5) 发电再计划（也称校正计划）。对于较大的发电与负荷功率偏差，调度中心要重新安排各机组发电功率。

(6) 处理能量不平衡。补偿实际的交易电量与计划交易电量



的差额。

(7) 有功网损补偿。输电时造成的功率损耗通过此项服务来补偿。

(8) 事后恢复服务。

(9) 稳定控制服务。

(10) 其他。

各类辅助服务特征列入表 1-1。

表 1-1 各种辅助服务的特征

服 务	是否区分 供应者	是否区分 用户	是否由系统运 行人人员控制	是否允许 竞争	是否必须要在 本控制区内
负荷跟踪设备	是	是	是 ^①	是 ^①	否 ^①
旋转备用	是	是	是 ^①	是 ^①	否 ^①
运行备用	是	是	是	是 ^①	否
无功设备和电压控制					
发电	是	否	是	是或否 ^②	是
输电	否	否	是	否	是
发电再计划	是	是	是	否	是
处理能量不平衡	是	是	是 ^②	是	否
有功网损补偿	是	是	是	是	否
事故后恢复服务	是	否	是	是	否
稳定控制服务	发电：是 输电：否	否	是	否	否

① 存在双边合同时，可能会出现相反的情况。

② 取决于具体情况。

根据国际上电力市场的经验，提供辅助服务的模式一般有三种，统一型、投标型和双边合同型。统一型是指，辅助服务必须由系统调度员统一安排协调，结算时根据各参与者与对辅助服务命令执行的情况进行奖惩。投标型指，各用户分别对每一种辅助服务进行投标，调度员根据用户们的投标情况排定优先次序，安排辅助服务供应计划，使提供辅助服务的费用最小。双边合同型是指，某一辅助服务的用户直接与供应者签定双边合同，从而得

到其所需的辅助服务，而无须通过电力系统调度人员。某一服务到底应采取哪种供应方式，这与整个电网的管理运行水平和电力市场发育的完善程度有关。如英国、阿根廷等国采用统一型模式提供频率响应与无功控制等服务；而美国西部加州电网，以投标型与双边合同型结合的方式提供负荷跟踪与频率响应的服务。



第二节 负荷频率控制

频率是电力系统的主要变量之一，它的稳定依赖于发电功率与负荷功率间复杂的平衡关系。不平衡可能是由于负荷预测的误差、缺少跟踪负荷变化的发电容量或由于故障造成的突然失去发电功率或负荷等。频率偏差调整的方法主要是调整发电功率和负荷管理。通过调整发电功率进行频率调整即频率的三次调整。频率的一次调整是动力系统的自然属性，依靠调速器完成。所有发电机组承担调频任务，只能做到有差调控。频率的二次调整，即传统的自动发电控制（Automatic Generation Control，简称 AGC），由系统中的 AGC 机组承担，同时对联络线功率进行监视和调整。频率的三次调整实质是完成在线经济调度。通过频率调整，可以完成以下功能：

- (1) 使发电功率自动跟踪负荷功率的变化。
- (2) 响应负荷功率或发电功率的随机变化，维持系统频率为规定值。
- (3) 在区域内分配系统发电功率，维持区域间净交换功率为计划值。
- (4) 对周期性负荷变化，按发电计划调整发电功率；对偏离计划的负荷功率，实现在线经济负荷分配。
- (5) 监视、调整备用容量，满足安全需要。

频率调整问题是电力系统最基本的控制问题。AGC 的基本假设是，电力公司控制中心有权要求控制区内各发电机组无条件地执行 AGC 控制信号。但是，随着电力市场逐渐形成，发电与



输电分离，对传统的频率控制方式和算法提出了新的要求。

1. 一次调频备用容量分配

为满足频率一次调整的需要，发电公司发电机组在参与电力市场前，必须首先满足一系列技术要求，主要包括调速器的控制死区、调差系数、可调的频率范围、在不同的热力条件下的同步时间等。不同国家对这些参数有不同的要求，并且要求发电公司提供详细的发电机组及其控制系统的模型给调度中心。电力系统调度员按季度制定一次调频备用容量计划，一般以一次调频备用容量占时段 t 发电容量的百分比 r_t (%) 的形式给出。在安排短期计划时（如周计划），按季节计划中设定的一次调频备用水平进行调度。而在日调度或实时调度时，如果某些发电厂在提供服务时遇到困难，不能完成其分配的备用份额，则应该立即通知系统调度员，使其可以尽快重新设定一次调频备用容量的百分比 $r_{e,t}$ (%)，其值小于 r_t 。时段 t 的一次调频备用容量以 $P_{rl,t}$ 表示

$$P_{rl,t} = P_{g,t} r_{e,t} \quad (1-1)$$

式中 $P_{g,t}$ ——时段 t 系统运行发电机总容量。

在某些极端的情况下，调度员可能为满足一次调频备用容量而启动一台机组。而当电网约束使电力系统中某区域成为“孤岛”时，应为其单独进行一次调频备用容量调度。

一次调频备用不进入市场投标交易，此服务针对所有机组，这与一次调频是机组的自然属性有关。电力系统调度员根据各厂调速器参数将 $P_{rl,t}$ 分配到各机组。例如，阿根廷采取下列较为简明的一次调频备用分配方法：

对水电机组 i

$$P_{rl,t,i} = R_{H,t} P_{g,t,i} \quad (1-2)$$

$$R_{H,t} = \max (r_{e,t}, 10\%) \quad (1-3)$$

式中 $P_{g,t,i}$ ——水电机组 i 时段 t 分配的发电功率。

对火电机组 k

$$P_{rl,t,k} = R_{T,t} P_{g,\max,k} \quad (1-4)$$



$$R_{r,t} = \max (r_{r,t} \%, 5\%) \quad (1-5)$$

一般以提供一次备用容量的边际机组的发电微增费用($\lambda_{M,t}$)作为一次备用容量的价格,记作 $\rho_{r,t}$ 。如果该机组为水电机组,则 $\lambda_{M,t} = \rho_t$, 这里 ρ_t 为系统实时电价。若该机组为火电机组,则 $\lambda_{M,t}$ 为该机组的微增费用(根据其对发电市场的投标)。 $\rho_{r,t}$ 值为:

$$\rho_{r,t} = \begin{cases} \rho_t & r_{e,t} \% < r_t \% \\ \max (\rho_t - \lambda_{M,t}, \rho_m) & r_{e,t} \% \geq r_t \% \end{cases} \quad (1-6)$$

式中 ρ_m ——认为规定值,防止 $\rho_{r,t}$ 值过高。

因此,发电厂虽然不对一次调频服务进行投标,但调度员要根据机组在发电市场中的投标选择一次性调频备用机组。

各发电厂必须承担其分担的一次性备用容量,这部分费用已包含于能量费用中,不再单独进行补偿。仅仅在发电厂提供的一次性备用容量超过或少于其分配份额时,才有额外的报酬或罚款 C_r 。其值为:

$$C_{r,t,k} = \rho_{r,t} P_{g,t,k} \frac{r_{d,t,k} \% - r \%}{1 - r_{d,t,k} \%} \quad (1-7)$$

上式中, $r_d\%$ 对于水电和火电机组分别等于 $R_{H,t}$ 和 $R_{T,t}$ 。系统调度员应有足够的量测手段监视发电厂对一次备用调度的执行情况,一旦有违约发生,则视情节轻重,按一月内未提供一次备用服务处理,情节较严重的,取消其提供一次备用的资格。

由式(1-7)可知,只有 $r_d\% = r\%$ 时,才对用户(买电方)收取额外的一次调频费用。原则上,该费用只由大用户承担,并根据其峰荷和节点调节系数进行分配。

2. 频率的二次调整

一次调频留下了频率偏差和净交换功率偏差, AGC 因此而动作,开始频率的二次调整。在传统的 AGC 控制中,由于电力公司拥有发电厂,因此调度中心的控制信号可以直接发送给各发电厂以完成自动发电控制功能。但是,电力市场中必须提供一种能够推动和监督不同产权的发电厂共同参与自动发电控制的机

制，保证系统的安全。其核心应该是，对 AGC 服务提供合理的报酬并做到优质优价。在这种机制下，输电公司执行 AGC 算法测量频率偏差和联络线交换功率偏差，并且发送控制信号给各电厂调整出力。区域控制误差（ACE）的计算与传统的 AGC 是一致的，因为控制边界并未改变，为：

$$ACE = (P_{ED} - P_E) + 10 \beta (f_0 - f) \quad (1-8)$$

式中 P_{ED} ——规定净交换功率；

P_E ——实际净交换功率；

f_0 ——规定功率；

f ——实际功率。

计算区域控制误差时，首先要计算出 P_{ED} 。在电力市场环境下，区域间交易数目和交换功率大大增加， P_{ED} 的值实时变化，必须根据流过控制区边界的交易功率来计算。

$$P_{ED} = \sum p_g - \sum p_d \quad (1-9)$$

在电力市场条件下，AGC 服务产生的最大变化是 AGC 对机组功率的分配问题。传统的 AGC 算法对机组功率的分配分两个部分：

(1) 按经济调度原则分配计划负荷和计划外负荷，送出基点功率。

(2) 将区域控制误差分配到各机组。

分配的基本原则是按发电费用最小为目标进行控制。在电力市场中，仍需遵守同样的原则，但费用的含义是输电公司从发电公司购买 AGC 能量的费用。由各发电公司在辅助服务市场中对 AGC 服务进行投标得到，投标一般提前一天进行，各发电厂应在投标信息中提供每台机组可提供的 AGC 备用容量及其价格。价格包括三部分，一是应系统要求提供 AGC 服务的价格；二是仅仅作作为 AGC 备用容量的价格；三是提供补偿设备投资和热效率降低价格附加项。如果各厂按固定价格投标，则按费用从低到高的顺序排定提供 AGC 服务的优先次序表，若给出的是投标费

用曲线, 则按类似与经济调度的算法, 得到其最小费用 AGC 机组分配结果, 还应考虑使用各机组 AGC 备用容量的概率。

对用户来讲, 其 AGC 费用项与电能消耗成正比。二次调频的基本目标是恢复频率的正常值, 较长时间的频率偏移会降低系统一次调频备用水平。

3. 频率的三次调整

频率的三次调整服务, 实际上就是发电再计划。有些国家将其归入备用服务中, 或者直接归入电能消费中。

第三节 发电容量备用



备用服务与调频服务是紧密相连的, 在周期上它们有所重叠。电力市场中备用问题的核心是确定备用容量及其分配的算法, 并提出相应的价格机制, 使各发电厂积极响应调度的备用容量安排。

1. 旋转备用 (可靠性备用)

旋转备用又称热备用, 指能够保证 10min 内增加的同步容量。对水电厂来说, 旋转备用一般为总容量的 10%。对火电厂, 其值为最大发电功率与当前发电功率的差值。在传统的运行方式下, 旋转备用的容量是确定的, 一般定义为系统中最大机组的容量 (或为最大机组容量的 1.5 倍) 或系统负荷的一定比例。在竞争型的电力市场中, 提供旋转备用的一般过程为:

(1) 发电厂投标。发电厂 i 应提前 24h 向调度中心进行旋转备用投标。要求提供的投标信息与调频投标类似, 包括投标容量和投标价格。投标价格应由两部分组成: $\rho_{rw,i}$ 代表备用容量的能量价格, 即使用旋转备用容量发电的价格; $\rho_{rp,i}$ 代表备用容量的容量价格。

(2) 投标选择。调度中心根据 $(\rho_{rw,i} + \rho_{rp,i})$ 值排定提供旋转备用的优先次序表。市场结算价格为优先次序表中边际机组的 $(\rho_{rw,m} + \rho_{rpm})$ 值。



(3) 服务结算。对每个中标的旋转备用容量供应者, 应该得到的报酬 $C_{rs,i}$ 如下:

$$C_{rs,i} = P_{rs,i}(P_{rswm} + P_{rspm} - P_{rsw,i}) + (P_{g,i} - P_{go,i})(P_{rswm} + P_{rspm}) \quad (1-10)$$

式中 $P_{rs,i}$ ——供应者 i 提供的旋转备用容量;

$P_{g,i}$ ——供应者 i 实际发电功率;

$P_{go,i}$ ——供应者 i 计划发电功率 (不包括旋转备用);

$(P_{g,i} - P_{go,i})$ ——被调度中心用于发电的备用容量。

这种结算方法, 可以使发电厂提供旋转备用容量的收入与提供电量的收入相当。

2. 运行备用

运行备用容量一般由峰荷火电机组提供, 指能在 20 ~ 30min 内启动并达到正常发电功率。一般每 6 个月, 由调度中心设置计划运行备用水平。发电厂和大用户可以通过运行备用协议指定一部分容量作为另一发电厂或用户的运行备用。在电力市场中, 一般按以下步骤安排运行备用容量:

(1) 发电厂投标。各发电厂应提供的信息除 $\rho_{row,i}$ 和 $\rho_{rop,i}$ 外, 还应包括响应时间。

(2) 投标选择。先根据过去一段时间内各厂对备用配额的完成情况, 对各发电厂按其表现进行评估, 这是投标选择中的一个主要原则。在 60d 内 3 次未完成指标的发电厂将失去投标资格。然后依据备用的使用概率进行投标选择, 可按式 (1-11) 计算 $\rho_{ro,i}^{(0)}$ 值排出提供运行备用的优先次序表。

$$\rho_{ro,i}^{(0)} = \rho_{rop,i} + \rho_{row,i} \sum P_{ru,i} P_{rob} \quad (1-11)$$

式中 $P_{ru,i}$ ——节点 i 的某一备用使用容量;

P_{rob} ——该情况发生的概率, %。

按下式计算运行备用容量价格。

$$\rho_{ro,i} = (\rho_{ropm} + \rho_{rowm}) \sum P_{ru,i} P_{rob} - \rho_{row,i} \sum P_{ru,i} P_{rob} \quad (1-12)$$

最终运行备用供应者得到的报酬是:

